

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR ALEX ÁLISON BANDEIRA
SANTOS E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 23.02.2001.

Leonardo Goldstein Jr.
ORIENTADOR

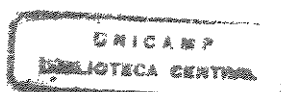
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**Influência do Teor de O_2 e da Velocidade do Ar na
Formação da Fuligem em Chamas Difusas de Acetileno com
Escoamento Anular Paralelo do Oxidante**

Autor: Alex Álisson Bandeira Santos
Orientador: Leonardo Goldstein Jr.

06/01



UNIDADE BC
N.º CHAMADA:
TV UNICAMP
Sa 59i
V. Ex
TOMBO BC/ 45129
PROC. 16-392101
C ☐ D ☒
PREÇO R\$ 11,00
DATA 05/07/01
N.º CPD

CM00157845-4

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS

**Influência do Teor de O_2 e da Velocidade do Ar na
Formação da Fuligem em Chamas Difusas de Acetileno com
Escoamento Anular Paralelo do Oxidante**

Autor: **Alex Álisson Bandeira Santos**
Orientador: **Leonardo Goldstein Jr.**

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Térmica e Fluidos

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

Campinas, 2001
S.P. – Brasil

0115756

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

Sa59i Santos, Alex Álisson Bandeira
Influência do teor de O₂ e da velocidade do ar na
formação da fuligem em chamas difusas de acetileno
com escoamento anular paralelo do oxidante / Alex
Álisson Bandeira Santos.--Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Leonardo Goldstein Jr..
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

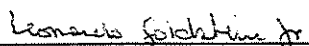
1. Fuligem. 2. Oxigênio – Aplicações industriais. 3.
Ar - Velocidade. 4. Chama (Combustão). 5. Laser
hélio-neônio. I. Goldstein Jr., Leonardo. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Influência do Teor de O₂ e da Velocidade do Ar na
Formação da Fuligem em Chamas Difusas de Acetileno com
Escoamento Anular Paralelo do Oxidante**

Autor: Alex Álisson Bandeira Santos
Orientador: Leonardo Goldstein Jr.



Prof. Dr. Leonardo Goldstein Jr., Presidente
Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica - DETF



Prof. Dr. Jerônimo dos Santos Travelho
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais



Prof. Dr. Jorge Isaias Llagostera Beltran
Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica - DE

Campinas, 23 de fevereiro de 2001

Dedicatória:

Dedicar este trabalho a uma única pessoa seria injusto, portanto, presto minha homenagem a algumas pessoas especiais:

À amada Claudiane, pela sua paciência e força nos momentos mais inquietos e difíceis, só ratificando o quanto você é uma mulher especial para mim.

À memória do amigo - irmão Nelson, na certeza de um dia nos reencontrarmos e novamente passar bons momentos.

Aos meu pais, Antônio Carlos e Luiza, pelo apoio e força.

As irmãs Viviane e Vânia e irmão Jean, pelo carinho e amizade.

À minha querida avó Hildete pelo seu amor.

Ao amigo Jorge pelo companheirismo e pela atenção dada à minha mãe.

Aos verdadeiros amigos que possuo, cujo os nomes não citarei na esperança de aumentar este grupo seleto.

Agradecimentos

Agora presto meus profundos agradecimentos as pessoas que tornaram este trabalho possível:

Ao meu orientador, Leonardo, pelo conhecimento e capacidade no desenvolvimento e finalização do trabalho e pela amizade nos momentos propícios.

Ao professor Carlos Alberto Ferrari, do Instituto de Física da Unicamp, que nos cedeu o laboratório para realização dos ensaios e pelo conhecimento transferido durante o trabalho.

Ao companheiro Fábio Fassani, do DETF, pela ajuda na minha iniciação no assunto de formação da fuligem.

Aos professores e companheiros do DETF.

À CAPES pelo financiamento do trabalho através de bolsa de estudos.

Aos companheiros nordestinos, paulistas e latino-americanos por tornarem mais agradável a minha estadia em Campinas.

Ao meu querido estado da Bahia, em especial à cidade de Salvador e ao lugarejo de Conceição de Salinas, que me deram tudo o que tenho de mais importante até hoje, minha educação e minha família.

“Vem vamos embora, que esperar
não é saber, quem sabe faz a hora não
espera acontecer.”

Geraldo Vandré

Resumo

SANTOS, Alex Álisson Bandeira, Influência do Teor de O_2 e da Velocidade do Ar na Formação da Fuligem em Chamas Difusas de Acetileno com Escoamento Anular Paralelo do Oxidante, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 144 p. Dissertação (Mestrado)

A formação da fuligem em sistemas de combustão industrial constitui tema de interesse da engenharia, pois a presença da fuligem na chama aumenta a transferência de calor dos produtos da combustão por radiação térmica, o que é desejável, mas constitui um problema ambiental quando é emitida para a atmosfera. O presente trabalho avalia a influência da variação do teor de O_2 e da velocidade do ar na formação da fuligem e na temperatura em chamas difusas de acetileno, em um queimador com injeção coaxial e anular de ar. A metodologia utilizada para o cálculo da concentração da fuligem foi a técnica não intrusiva da extinção da luz de laser. O estudo foi realizado com níveis baixos de enriquecimento, em que o teor volumétrico de O_2 no ar é menor que trinta por cento, não requerendo adaptações significativas dos equipamentos. Além do efeito do enriquecimento, foi estudado o da variação da velocidade do ar, verificando-se a influência conjunta destes dois fatores na formação da fuligem. Os resultados sugerem que a utilização em conjunto da variação do teor de O_2 e da velocidade do ar podem proporcionar uma ferramenta de controle da formação da fuligem, seja para o aumento e/ou para a redução desta.

Palavras Chave

- Fuligem, Enriquecimento, Oxigênio, Velocidade do Ar, Chama, Combustão, Laser.

Abstract

SANTOS, Alex Álisson Bandeira, Influence of the Oxygen Index and Air Velocity in Soot Formation in Acetylene Diffusion Flames with Parallel Anular Oxidizer Flow, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 144 p. Dissertação (Mestrado)

Soot formation in industrial combustion systems constitutes an important theme of engineering interest. The presence of soot in the flame increases the heat transfer from the combustion gases by thermal radiation, but may constitute an environmental problem when emitted in the atmosphere. This work evaluates the influence of the oxygen index and air velocity in soot formation and in the temperature of acetylene diffusion flames, produced in a burner with parallel anular coaxial oxidizer flow. The methodology used for calculation of the soot concentration was the non intrusive technique based on laser light extinction. In this work the enrichment level was varied as well as air velocity, to verify the influence of both factors in soot formation. The results suggest that the combined use of both the oxygen content and air velocity can provide a control tool for soot formation, which level can be increased or decreased. The results concern a oxygen index in the air smaller than thirty percent, which does not require significant existing equipment changes.

Keywords

- Soot, Enrichment, Oxygen, Flame, Air Velocity, Combustion, Laser.

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura	viii
1 Introdução e Objetivos	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos da Dissertação	3
2 Revisão da Literatura	4
2.1 Formação e Controle da Fuligem em Sistemas de Combustão Industrial	4
2.1.1 Características da Fuligem	4
2.1.2 Mecanismos de Formação da Fuligem	5
2.1.3 Influência de Parâmetros Físicos na Formação da Fuligem	13
2.1.4 Influência de Parâmetros Químicos na Formação da Fuligem	15
2.2 Influência do Oxigênio (O ₂) na Formação da Fuligem	25
2.2.1 Efeitos da Adição do Oxigênio	25
3 Apresentação do Dispositivo Experimental	33
3.1 Sistema de Alimentação dos Gases	33
3.2 Equipamentos de Pré-Mistura e Queima	35
3.2.1 Pré-Misturador de Ar Enriquecido PM1	36
3.2.2 Homogeneizador de C ₂ H ₂ HM1	36
3.2.3 Queimador de Acetileno QM1	39
3.3 Dispositivos de Instrumentação	42
3.3.1 Laser L1	42
3.3.2 Filtro de Radiação F1	42

3.3.3 Fotodiodo FT1	43
3.3.4 Eletrômetro ET1	43
3.3.5 Termopar	44
3.3.6 Registrador de Temperatura	45
3.3.7 Válvulas Balanceadoras	46
3.3.8 Rotâmetros	46
3.3.9 Régua Milimetrada	48
4 Procedimento Experimental	49
4.1 Metodologia Utilizada para o Cálculo da Concentração da Fuligem	49
4.2 Procedimento Experimental	53
4.2.1 Preparativos para Estabelecer a Chama	54
4.2.2 Medidas dos Sinais para o Cálculo da Concentração da Fuligem	54
4.2.3 Medição da Temperatura	55
4.3 Apresentação dos Testes	55
4.3.1 Concentração da Fuligem	55
4.3.2 Temperatura	56
4.3.3 Processamento dos Dados	56
5 Resultados e Discussão	59
5.1 Distribuição da Concentração da Fuligem ao Longo das Chamas	59
5.1.1 Teor de O_2 no Ar = 21% (Ar Atmosférico Puro)	59
5.1.2 Teor de O_2 no Ar = 23%	65
5.1.3 Teor de O_2 no Ar = 25%	68
5.1.4 Efeito do Teor de O_2 no Ar Enriquecido	74
5.2 Conteúdo Integrado de Fuligem na Chama	77
5.2.1 $V_{ar} < V_{eg}$	78
5.2.2 $V_{ar} > V_{eg}$	79
5.3 Distribuição de Temperatura nas Chamas	81
5.3.1 Distribuição de Temperatura ao Longo do Eixo das Chamas	81
5.3.2 Temperatura em Função da Potência do Queimador	85
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	88
6.1 Conclusões	88
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	89

Referências Bibliográficas	90
Anexo I - Análise da Incerteza Experimental	99
Anexo II - Resultados Experimentais	106
Apêndice A - Variação da Concentração da Fuligem ao Longo da Chama para $V_{ar} = 2,36 V_{eg}$	134
Apêndice B - Avaliação da Influência do Acúmulo de Fuligem na Leitura do Termopar	137

Lista de Figuras

2.1 Processo de Formação da Fuligem	6
3.1 Fluxograma do Dispositivo Experimental	34
3.2 Apresentação do Dispositivo Experimental	35
3.3 (a) Detalhamento Esquemático do Pré-misturador PM1	37
3.3 (b) Apresentação do PM1	37
3.4 (a) Detalhamento Esquemático do Homogeneizador HM1	38
3.4 (b) Apresentação do HM1	38
3.5 (a) Apresentação do queimador	39
3.5 (b) Detalhamento esquemático do queimador QM1	40
3.5 (c) Detalhe montagem do conjunto QM1/HM1	40
3.5 (d) Detalhe gerador de funções do sistema	41
3.6 Laser He-Ne 1mW	42
3.7 Apresentação Filtro de Radiação e Fotodiodo	43
3.8 Eletrômetro Mod. 610CR	44
3.9 Termopar T1 tipo “S”	45
3.10 Registrador de Temperatura RG1	46
3.11 Vista dos Rotâmetros	47
5.1 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72 - Teor O ₂ = 21%	60
5.2 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ = 21%	61
5.3 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72 - Teor O ₂ = 21%	62
5.4 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ = 21%	63
5.5 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72 - Teor O ₂ = 21%	64
5.6 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ = 21%	64

5.7 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72 - Teor O ₂ = 23%	65
5.8 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ = 23%	66
5.9 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72 - Teor O ₂ = 23%	67
5.10 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ = 23%	68
5.11 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72 - Teor O ₂ = 25%	69
5.12 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ = 25%	69
5.13 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72 - Teor O ₂ = 25%	70
5.14 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ = 25%	71
5.15 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Teor O ₂ = 23% e Potência = 0,72 kW	72
5.16 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Teor O ₂ = 23% e Potência = 1,16 kW	72
5.17 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Teor O ₂ = 25% e Potência = 0,72 kW	73
5.18 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Teor O ₂ = 25% e Potência = 1,16 kW	73
5.19 Concentração da Fuligem versus Posição na Chama $V_{ar}/V_{eg} = 0$ e 0,45	75
5.20 Concentração da Fuligem versus Posição na Chama $V_{ar}/V_{eg} = 0$ e 3,86	76
5.21 Conteúdo Integrado de Fuligem versus Potência $Var = 0,10$ m/s	78
5.22 Conteúdo Integrado de Fuligem versus Potência $Var = 0,15$ m/s	79
5.23 Conteúdo Integrado de Fuligem versus Potência $Var = 0,85$ m/s	80
5.24 Conteúdo Integrado de Fuligem versus Potência $Var = 1,39$ m/s	81
5.25 Concentração da Fuligem e Temperatura ao Longo da Chama Potência = 0,72 kW; Ensaio com $V_{ar}/V_{eg} = 0,45$; Teor O ₂ = 21, 23 e 25%	82
5.26 Concentração da Fuligem e Temperatura ao Longo da Chama Potência = 1,16 kW; Ensaio com $V_{ar}/V_{eg} = 0,45$; Teor O ₂ = 21, 23 e 25%	83
5.27 Concentração da Fuligem e Temperatura ao Longo da Chama Potência = 0,72 kW; Ensaio com $V_{ar}/V_{eg} = 3,86$; Teor O ₂ = 21, 23 e 25%	84
5.28 Concentração da Fuligem e Temperatura ao Longo da Chama Potência = 1,16 kW; Ensaio com $V_{ar}/V_{eg} = 3,86$; Teor O ₂ = 21, 23 e 25%	85
5.29 Temperatura versus Potência para $Var = 0,10$ m/s	86
5.30 Temperatura versus Potência para $Var = 0,15$ m/s	86
5.31 Temperatura versus Potência para $Var = 0,85$ m/s	87
5.32 Temperatura versus Potência para $Var = 1,39$ m/s	87
A.1 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ [%] = 21	135
A.2 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ [%] = 23	135

A.3 Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O ₂ [%] = 25	136
B.1 Variação Temporal da Leitura do Termopar com Acúmulo de Fuligem	138
B.2 (a) Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 1 com Menor Formação da Fuligem - Potência[kW]= 1,16; y[mm]=3,0; pos. adm.=0,02; Gás arrastando	140
B.2 (b) Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 1 com Menor Formação da Fuligem - Potência[kW]= 1,16; y[mm]=3,0; pos. adm.=0,03; Ar arrastando	140
B.3 Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 1 com Maior Formação da Fuligem - Potência[kW]= 0,72; y[mm]=5,0; pos. adm.=0,08; Ar arrastando	141
B.4 (a) Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 2 com Menor Formação da Fuligem - Potência[kW]= 1,16; y[mm]=103,0;pos. adm.=0,76; Gás arrastando	142
B.4 (b) Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 2 com Menor Formação da Fuligem - Potência[kW]= 0,72; y[mm]=50,0; pos. adm.=0,72; Ar arrastando	142
B.5 (a) Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 2 com Maior Formação da Fuligem - Potência[kW]= 1,16; y[mm]=50,0;pos. adm.=0,37; Gás arrastando	143
B.5 (b) Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 2 com Maior Formação da Fuligem - Potência[kW]= 1,16; y[mm]=43,0;pos. adm.=0,32; Gás arrastando	143
B.5 (c) Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 2 com Maior Formação da Fuligem - Potência[kW]= 1,16; y[mm]=10,0;pos. adm.=0,11; ar arrastando	143

Lista de Tabelas

2.1 Sumário das condições experimentais e resultados da adição de oxigênio no propano	28
2.2 Sumário das condições experimentais e resultados da adição de oxigênio no n-butano	28
3.1 Apresentação dos rotâmetros	47
4.1 Tabela Resumo dos Testes Executados	57
B.1 Tabela de Inclinações das Curvas de Subida na Leitura do Termopar	139

Nomenclatura

Letras Latinas

a - Raio da partícula	[μm]
a_0 - Constante de equação	adimensional
a_1 - Constante de equação	adimensional
a_2 - Constante de equação	adimensional
f_d - Fator que quantifica as forças de dispersão interplanares	adimensional
k - Parte imaginária do índice complexo de refração	adimensional
k_{bz} - Constante de Boltzmann	[$(\text{cm/s})^2\text{g/K}$]
k_{tn} - Constante de proporcionalidade	[$\text{cm}^{5/2}\text{s}^{-1}$]
k_a - Constante de reação	[$\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{atm}^{-1}$]
k_b - Constante de reação	[$\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{atm}^{-1}$]
k_t - Constante de reação	[$\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}$]
k_z - Constante de reação	[atm^{-1}]
l_{abs} - Comprimento natural de absorção	[μm]
m - Índice complexo de refração	adimensional
m_p - Massa da partícula	[g]
n - Parte real do índice complexo de refração	adimensional
p_{O_2} - pressão parcial do oxigênio	[atm]
t - Tempo	[s]
u - região superficial mais reativa de uma estrutura de carbono	adimensional
w - Taxa específica de oxidação em termos da área superficial	[$\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

x - Comprimento Característico	adimensional
y - posição axial na chama	[mm]
y ₁ - posição axial na chama	[mm]
y ₂ - posição axial na chama	[mm]
z - número de pontos	adimensional
C _{abs} - Seção média de absorção	[m ²]
C _{sca} - Seção média de espalhamento	[m ²]
D - Diâmetro da partícula	[η m]
D _h - Diâmetro do homogeneizador	[mm]
D _{pm} - Diâmetro do pré-misturador Ar/O ₂	[mm]
D _q - Diâmetro do queimador de C ₂ H ₂	[mm]
G' - Fator que quantifica as forças de dispersão interplanares	adimensional
I _L - Intensidade de luz emergente da chama	[μ A]
I _o - Intensidade de luz incidente na chama	[μ A]
K - Constante de coagulação do sistema	[cm ³ /s]
K _{ext} - Coeficiente de extinção	[m ⁻¹]
K _{abs} - Coeficiente de absorção	[m ⁻¹]
L - Comprimento efetivo que a luz percorre na chama	[m]
L _f - Comprimento total da chama	[mm]
N - Densidade do número de partículas	[cm ⁻³]
N _{c-c} - Número de ligações Carbono-Carbono	adimensional
Q _c - Vazão de combustível	[l/h]
T - Temperatura	[K]
T _{ad} - Temperatura adiabática de chama	[K]
V _{ar} - Velocidade do ar	[m/s]
V _{eg} - Velocidade do gás combustível	[m/s]

Letras Gregas

ϕ - Concentração da fuligem	[ppmv]
Δy - Intervalo entre duas posições axiais da chama	[mm]
ρ - Densidade da partícula	[g/cm ³]

ρ_c - Densidade do combustível	[kg/m ³]
ρ_{sca} - Razão entre o espalhamento e a absorção	adimensional
α - Índice de polarização de uma partícula esférica	[m ³]
α_{dp} - Função da distribuição dos tamanhos das partículas	adimensional
μ_L - Incerteza de L	[m]
μI_o - Incerteza de I_o	[μA]
μI_L - Incerteza de I_L	[μA]
μ_Φ - Incerteza da Concentração da Fuligem	[ppmv]
μ_P - Incerteza da Potência do Queimador	[kW]
μQ_c - Incerteza da Vazão de Combustível	[l/h]
μQ - Incerteza da Vazão	[l/h]
μ_v - Incerteza da Velocidade	[m/s]
μ_A - Incerteza da Área de Saída do Fluido	[m ²]
μ_{A_C} - Incerteza da Área de Saída do Gás Queimado	[m ²]
$\mu_{A_{ox}}$ - Incerteza da Área de Saída do Oxidante	[m ²]
ψ_c - Relação crítica de formação da fuligem	adimensional
τ_λ - Transmitância monocromática	adimensional
λ - Comprimento de onda do raio incidente	[nm]

Subscritos

c - combustível

ox - oxidante

Abreviações e Siglas

CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

DETF - Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos

DE - Departamento de Energia

PCI_c - Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

Im - Parte imaginária de um número complexo adimensional

Re - Parte real de um número complexo

adimensional

Unicamp - Universidade Estadual de Campinas

PM1 - Pré-misturador de Ar e Oxigênio

HM1 - Homogeneizador de C_2H_2

QM1 - Queimador

L1 - Laser

F1 - Filtro de Radiação

FT1 - Fotodiodo

ET1 - Eletrômetro

T1 - Termopar

RG1 - Registrador de Temperatura

Pos.Adm. - Posição Adimensional

Capítulo 1

Introdução e Objetivos

1.1. Introdução

A formação da fuligem em sistemas de combustão constitui tema de interesse da engenharia, pois a presença da fuligem aumenta a transferência de calor por radiação térmica na chama e a sua emissão na atmosfera constitui um problema ambiental, além de aumentar a necessidade de manutenção dos queimadores. O fenômeno da formação da fuligem ainda não está plenamente esclarecido, o que é decorrência do fato de que o processo de formação não é lento o suficiente para permitir a observação precisa de cada passo. Para a compreensão dos aspectos essenciais do fenômeno, serão necessários novos progressos das técnicas de instrumentação. Portanto, apesar dos estudos já existentes sobre os mecanismos de formação e controle da fuligem, o assunto ainda continua aberto. Esta demanda por novo conhecimento científico tem sido atendida, na atualidade, por trabalhos que, em sua maioria, são realizados com chamas elementares.

Glassman (1987) define a fuligem como o material particulado sólido proveniente da combustão de combustíveis gasosos; para combustíveis líquidos o material sólido produzido é denominado cenosferas.

Embora existam restrições para a emissão de fuligem em plantas industriais, as partículas de fuligem podem exercer tanto papéis benéficos como prejudiciais. Assim, se, por exemplo, a presença de particulado em turbinas a gás pode afetar severamente o tempo de vida das pás e, em motores diesel, pela absorção de materiais cancerígenos, constituir um risco para a saúde humana, em contrapartida, em equipamentos térmicos industriais, a presença de fuligem aumenta a transferência de calor por radiação térmica da chama para as superfícies de troca. Assim, em equipamentos industriais onde uma grande taxa de transferência de calor é desejada, é desejável a operação desses sistemas com a presença da fuligem.

Com os mecanismos da formação da fuligem definidos, porém não compreendidos por completo, foram iniciados estudos com aditivos químicos a fim de identificar substâncias que pudessem ser utilizadas para um controle efetivo da formação.

O oxigênio, um dos possíveis oxidantes da fuligem, é um gás de grande uso na atividade industrial, e constitui uma proposta razoável de possível aditivo.

O enriquecimento do ar de combustão com oxigênio, de interesse recente, pode trazer melhorias ao processo de combustão, conforme citado por Baukal (1998):

- Aumento da produtividade;
- Aumento da eficiência térmica;
- Melhoria das características da chama - maior limite de inflamabilidade, melhor ignição, estabilidade e controle da forma;
- Menor volume dos gases de combustão;
- Maior eficiência dos processos de transferência de calor;
- Melhoria da qualidade do produto;
- Redução de custos de novos equipamentos ou possibilidade de aumento da produção de equipamentos existentes;
- Redução do consumo de combustível, e
- Redução dos custos de matéria prima.

O autor também comenta que os níveis mais baixos de enriquecimento – teores volumétricos de O_2 no ar de combustão abaixo de 30% – são normalmente utilizados em aplicações de *retrofit*, em que somente pequenas modificações são necessárias no equipamento existente e benefícios expressivos são obtidos, com o aumento significativo da taxa de produção em processos de aquecimento com pequenos níveis de enriquecimento. Na maioria dos casos, queimadores podem operar com sucesso utilizando ar de combustão enriquecido com O_2 até 28%, sem modificações no equipamento.

O interesse crescente na tecnologia de enriquecimento da chama com oxigênio, acoplado à necessidade do estudo da formação da fuligem, motivou a realização deste trabalho, que teve como parâmetros de investigação o perfil de concentração da fuligem e o perfil de temperatura em chamas difusas num queimador vertical, para diversas condições de operação.

O combustível utilizado foi o acetileno, um dos possíveis precursores da fuligem e um gás combustível com grande tendência à formação da fuligem, em especial nas chamas difusas. Foram aplicados níveis de enriquecimento correspondentes a teores de oxigênio de 23 e 25%, abaixo de 30%, na faixa de aplicações acima mencionada, e levando em conta o custo elevado do oxigênio.

1.2. Objetivos da Dissertação

Os objetivos principais da dissertação são:

1. Avaliar a influência do O_2 do ar na formação da fuligem em chamas difusas de acetileno com escoamento anular paralelo do oxidante, no regime de operação com baixo nível de enriquecimento, e
2. Estudar a influência da variação da velocidade do ar puro e enriquecido na formação da fuligem e na distribuição axial de temperatura ao longo da chama.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

A revisão apresenta as características das partículas de fuligem, os mecanismos de formação, a influência de parâmetros físicos, como a temperatura, e de parâmetros químicos, como os aditivos químicos, com ênfase na atuação do oxigênio.

2.1. Formação e Controle da Fuligem em Sistemas de Combustão Industrial

2.1.1. Características da Fuligem

As palavras “fuligem” e “carbono” têm sido usadas para descrever os materiais particulados sólidos com estrutura carbônica produzidos na combustão, alguns dos quais possuem apreciável quantidade de hidrogênio, além de outros elementos e compostos que podem ter sido obtidos a partir da estrutura original do combustível.

Segundo Glassman (1987) as características dos sólidos produzidos na combustão diferem em função das suas condições de formação. Uma das diferenças mais importantes é se a partícula foi formada em reação homogênea na fase de vapor, ou como depósito sobre uma superfície sólida (crescimento superficial), que pode estar localizada dentro ou próxima da zona de reação.

Glassman também comentou que as propriedades da fuligem são pouco afetadas pelo tipo de chama – chamas difusas ou pré-misturadas –, natureza do combustível queimado e condições

nas quais foi produzida. A quantidade de fuligem, no entanto, varia apreciavelmente com o tipo de chama. Chamas difusas invariavelmente produzem mais fuligem do que chamas pré-misturadas.

Com relação ao tamanho das partículas de fuligem, Palmer e Cullis (1965) relataram que as partículas coletadas em vários processos de combustão, em condições normais de operação, como nas chamas de fornalha, em pistões de motores ou em câmaras de combustão, não diferem muito em tamanho, com diâmetro médio típico dentro da faixa de 20 a $40 \times 10^{-3} \mu\text{m}$. Segundo Glassman (1987), os diâmetros das partículas de fuligem variam de 10 até $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}$, sendo mais encontrados na faixa de 10 a $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}$. As partículas menores são encontradas em chamas de combustíveis com pouca tendência de formação de fuligem enquanto as partículas maiores são obtidas em chamas de combustíveis com grande tendência de formação de fuligem.

Com referência à composição química da partícula, Haynes e Wagner (1981) relataram em sua revisão que, fora o elemento carbono, as partículas de fuligem contêm cerca de 10% de hidrogênio em sua estrutura, e um percentual até maior quando são recém formadas.

2.1.2. Mecanismos de Formação da Fuligem

Os mecanismos de formação da fuligem em chamas consistem nos passos sequenciais, ou em paralelo, que regem a formação da fuligem. Há um grande volume da literatura sobre o assunto, que leva a crer que a formação se dê conforme o esquema mostrado na Figura 2.1.

a. Pirólise

A pirólise pode ser considerada como um processo que precede a formação da fuligem. Nele ocorrem reações de quebra das moléculas do combustível, com extensa decomposição e rearranjo atômico das moléculas.

Smith (1981) comentou que as reações de pirólise são geralmente endotérmicas, e altamente dependentes da temperatura. Na presença de algum tipo de oxidante: O, O₂ ou OH, haveria um aumento significativo das taxas de reação.

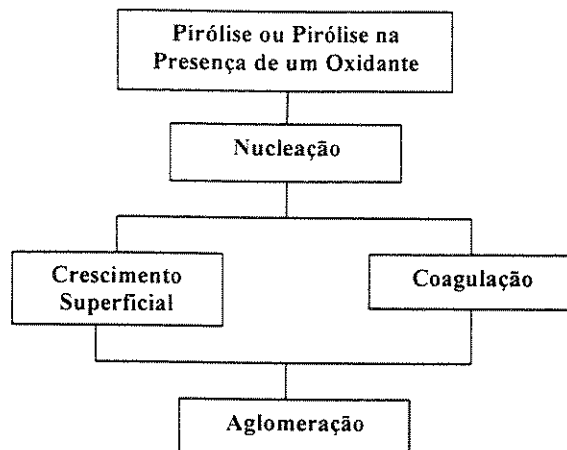


Figura 2.1. Processo de Formação da Fuligem (Smith, 1981).

Segundo Glassman (1987), a formação da fuligem dependeria das condições operacionais, do tipo de chama e se a pirólise é dada ou não na presença de um oxidante. Os produtos da pirólise gerariam, por sua vez, os elementos precursores da fuligem.

Numa ampla variedade de combustíveis alifáticos e aromáticos, a presença do acetileno (etino) é dominante em altas temperaturas, e em condições de pirólise oxidativa. Uma quantidade considerável de evidência experimental indica que o acetileno seria a última espécie estável a ser produzida antes de que partículas de fuligem sejam detectadas, sinalizando o acetileno como um importante intermediário no processo de formação de fuligem. Todavia, a tendência de algumas moléculas de combustível, notadamente as aromáticas, de produzir outros produtos além do acetileno, em condições de baixa temperatura e de ausência de oxigênio, levam à implicação de que o tipo de combustível teria um efeito na formação do precursor. Para altas temperaturas e concentrações de espécies oxidantes existentes em chamas pré-misturadas, se espera que a estrutura do combustível tenha pouco efeito nas propriedades de formação da fuligem. Entretanto, em chamas difusas, a molécula do combustível pode ter um tempo de residência significativo em regiões de baixa temperatura e essencialmente livres de espécies oxidantes, sendo de se esperar alguma influência da estrutura do combustível na formação da fuligem.

b. Nucleação

A nucleação envolve a formação de espécies embrionárias da fuligem, conhecidas como núcleos da fuligem. Os hidrocarbonetos precursores destes núcleos seriam estáveis o suficiente para resistir às altas temperaturas encontradas nos sistemas de combustão, não sendo consumidos na combustão e garantindo, portanto, a formação dos núcleos.

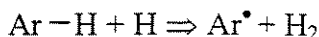
Alguns estudos colocam o acetileno e poliacetilenos como compostos importantes na nucleação da fuligem. Segundo Smith (1981), a polimerização do acetileno teria um papel importante na eventual nucleação da fuligem em chamas pré-misturadas de acetileno – oxigênio – argônio. Xu *et al.* (1998) afirmaram que nas chamas pré-misturadas, a fuligem seria formada principalmente a partir do acetileno, por ser ele uma das espécies de hidrocarboneto gasoso mais abundante nas regiões de formação da fuligem. Todavia existem controvérsias sobre o assunto.

Haynes e Wagner (1981) comentaram que, em um estudo experimental de chamas de metano e etileno (eteno) com oxigênio, foram encontradas grandes quantidades de acetileno em todos os testes, constatado como proveniente do combustível. Este aumento da quantidade de acetileno na chama não aumentou a luminosidade da chama, parâmetro este identificador da formação de fuligem, o que levou à conclusão de que o acetileno não seria um precursor da fuligem.

Glassman (1987) comentou que as estruturas aromáticas são estáveis em altas temperaturas e de difícil quebra nessas condições. Devido a esta estabilidade é provável que a fuligem possua estruturas aromáticas. Como consequência, isso pode ser uma razão para que os combustíveis aromáticos tenham uma grande tendência a formação de fuligem. Então, não foi surpresa que se tenha sugerido que estruturas com razoável estabilidade, como butadienos, diacetilenos, metil e vinil acetilenos, e formas iônicas ou radicais destes compostos, possam ser precursores importantes no processo de formação da fuligem. Em realidade, a formação de estruturas poli-aromáticas é extremamente difícil a partir de radicais aromáticos mais simples; no entanto, fragmentos alifáticos, como o acetileno e poliacetilenos, poderiam ser intermediários necessários, até mesmo para combustíveis de natureza aromática.

Frenklach e Wang (1990) propuseram um modelo de nucleação da fuligem baseado na subtração de radicais H e adição de C₂H₂ da primeira estrutura aromática formada a partir do precursor da fuligem, para o crescimento de hidrocarbonetos poli-aromáticos (HPA), que por sua vez formariam as primeiras partículas de fuligem. O modelo se baseia em três classes de reações:

(1) Subtração de H de uma molécula aromática através de reação com um radical H :



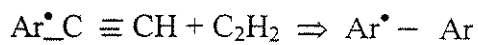
onde Ar representa um grupo aromático e o Ar[•] representa o radical aromático.

(2) Adição de acetileno ao radical formado:



reação que propaga o crescimento molecular.

(3) Ciclização do Grupo Aromático :



Os autores comentam que os resultados computacionais indicaram que a sequência principal de reação responsável pelo crescimento dos HPA seria na essência uma repetição das reações apresentadas acima. O crescimento continuado dos HPA formaria a primeira partícula identificável da fuligem.

Haynes (1991) comentou as diferenças na nucleação de chamas de compostos aromáticos e alifáticos. Em chamas de acetileno, que é um composto alifático, o início da formação de fuligem ocorreria como resultado de grande concentração de radicais poliacetilenos presentes no fim da zona de reação primária, onde sua concentração tem um máximo. Em chamas de benzeno, que é um composto aromático, acredita-se que o primeiro núcleo seria decorrente da alta concentração de compostos aromáticos e acetilenos. As maiores diferenças entre os dois tipos de compostos

estariam na taxa de geração de partículas e na fração da massa total de fuligem oriunda do processo de nucleação; essa fração pode ser maior do que 20% em chamas de benzeno trabalhando em baixas pressões, e menor do que 1% em chamas de acetileno com alimentação do combustível e do ar em contracorrente. Nas chamas em pressão atmosférica, a fração da fuligem formada no processo de nucleação é substancialmente maior na queima de compostos aromáticos, por exemplo o tolueno, do que de compostos alifáticos, como o etileno.

D' Alessio *et al.* (1992) propuseram, com base em dados experimentais, que o mecanismo de nucleação da fuligem seria o rearranjo interno de compostos com pequenas cadeias aromáticas em sua estrutura, tendo este fato maior importância do que uma possível nucleação através de uma formação progressiva de HPA.

Ciajolo *et al.* (1996) comentaram que as moléculas de HPA contribuiriam indiretamente no processo de nucleação da fuligem, começando pela construção de “blocos” aromáticos, após o que, com a participação do C_2H_2 , seguiria o processo de crescimento superficial.

Segundo Kennedy (1997) as espécies aromáticas crescem pela adição de outros aromáticos e de espécies alifáticas para formar HPA. O crescimento continuado dos HPA conduz à produção das menores partículas identificáveis de fuligem. Ele também comenta que os primeiros modelos de formação da fuligem foram baseados inteiramente no processo de nucleação. Resultados destes modelos indicavam que a quantidade de fuligem produzida era linearmente dependente das taxas de nucleação. Estas conclusões foram a base de argumento de que as taxas de crescimento superficial eram linearmente dependentes da disponibilidade de área superficial, que por sua vez, era dependente do número total de partículas criadas durante o processo de nucleação.

Uma outra explicação para a fenomenologia da nucleação foi a proposta por Olson e Calcote (1981), que atribuíram aos íons formados na chama durante o processo de pirólise. Os autores constataram que íons com tamanhos moleculares maiores, possuíam um pico elevado de concentração em chamas com grande tendência de formação da fuligem (o mesmo fato foi verificado por Delfau *et al.*, 1979). Com o aumento da concentração destes íons a produção da fuligem aumentava. Assim sendo, os autores propuseram que, através da combinação de íons e moléculas, seriam produzidos íons aromáticos com estruturas moleculares maiores (íons HPA) e

que, pela recombinação dos íons, se produziriam moléculas de HPA, partículas incipientes de fuligem, as quais cresceriam pelo crescimento superficial resultante das reações de moléculas neutralizadas e/ou íons, e pelo fenômeno de coagulação descrito mais a frente. O processo de nucleação seria induzido prioritariamente pela combinação de moléculas com o íon $C_3H_3^+$.

Todavia, existem controvérsias quanto a este mecanismo. Hall-Roberts *et al.* (2000), através da adição de Cs em chamas de acetileno, provocaram uma redução de íons $C_3H_3^+$ ($C_3H_3^+ + Cs \Rightarrow Cs^+ + C_3H_3$), o que, por conta do mecanismo iônico, levaria a esperar uma redução da produção da fuligem na zona de nucleação. Com esta redução não se verificou efeito sobre a formação da fuligem. Os autores concluíram que não haveria evidência de que os íons produzidos na chama atuariam no processo de nucleação da fuligem.

A nucleação se daria através de íons ou precursores neutralizados? Esta pergunta só será respondida com o tempo, através de mais trabalhos científicos e com o desenvolvimento da instrumentação disponível para o estudo do processo de nucleação.

c. Crescimento Superficial e Coagulação

Após o processo de nucleação, dois processos de crescimento da fuligem ocorrem em paralelo: o crescimento superficial e a coagulação.

Uma vez que os núcleos são formados, a produção da fuligem aumenta pelo crescimento superficial, que envolve o ataque de espécies na fase gasosa à superfície da partícula da fuligem, com incorporação destas espécies no seu interior, o que evidenciaria a natureza química do processo. As reações de crescimento superficial produzem um aumento na massa de fuligem, mas o número de partículas permanece inalterado no processo. O oposto ocorre no crescimento por coagulação, no qual as partículas colidem inelasticamente, decrescendo em número, enquanto a massa de fuligem permanece constante.

O crescimento da partícula – aumento do diâmetro – é resultado das reações simultâneas de crescimento superficial e da coagulação.

Para chamas de acetileno/oxigênio em pressões baixas, Homann e Wagner (1967) sugeriram que as espécies que começam o ataque à superfície da partícula seriam o acetileno e os poliacetilenos.

Haynes e Wagner (1981) comentaram que, eventualmente, o crescimento superficial pode ser lento, mesmo com altas concentrações de poliacetilenos. Isso ocorreria quando a concentração de radicais na fase gasosa cai para valores baixos.

Smith (1981), por outro lado, propôs que a coagulação seria um processo essencialmente físico, e que sua taxa poderia ser calculada a partir das hipóteses:

- .Partículas de fuligem estão em regime molecular livre;
- .Cada colisão entre duas partículas resulta em coagulação, e
- .Todas as partículas são esféricas.

Como validação das hipóteses acima, Smith (1981) apontou o estudo de Graham (1976), no qual a taxa de coagulação, expressa em termos da taxa de diminuição da densidade de partículas, $N[\text{cm}^{-3}]$, era dada por:

$$\frac{-dN}{dt} = \frac{5}{6} \times k_{\text{m}} \times \phi \times N^{11/6} \quad (2.1)$$

onde,

$$k_{\text{m}} = \frac{5}{12} \times \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{1/6} \times \left(\frac{6k_{\text{bz}}T}{\rho} \right)^{1/2} \times G' \times \alpha_{\text{dp}} \quad (2.2)$$

sendo ϕ : concentração da fuligem [cm^3/cm^3]; k_{bz} : constante de Boltzmann [$(\text{cm/s})^2\text{g/K}$]; ρ : densidade da partícula [g/cm^3]; G' : fator que quantifica as forças de dispersão interplanares, α_{dp} : é uma função da distribuição dos tamanhos das partículas, e T é a temperatura [K].

Haynes (1991) constatou que, imediatamente após a zona de formação de partículas de fuligem, a densidade de partículas cai bastante. Esse fenômeno seria resultado do processo de coagulação, que aumenta as características dimensionais das partículas (aumento de diâmetro), sem afetar a produção da fuligem.

Frenklach (1996), em trabalho sobre o mecanismo de crescimento superficial das partículas de fuligem, admitindo o crescimento dos HPA pela reação do C_2H_2 com estruturas aromáticas e sendo a fuligem uma estrutura composta de HPA, utilizando o método de Monte Carlo, obteve como resultado que a taxa de crescimento superficial seria proporcional à concentração de C_2H_2 .

d. Aglomeração

Depois que o crescimento das partículas cessa, ocorreriam colisões inelásticas das partículas esféricas de fuligem, resultando na formação de estruturas em forma de correntes, no processo a que se chamou de aglomeração.

Wersborg *et al.* (1973) observaram que, não havendo crescimento ou nucleação durante a aglomeração, a taxa de aglomeração deveria ser proporcional ao quadrado da densidade do número de partículas (N^2):

$$\frac{-dN}{dt} = \frac{1}{2} \times K \times N^2 \quad (2.3)$$

e,

$$K = 16 \times a^2 \times f_d \times \left(\frac{\pi k_{bz} T}{m_p} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

onde a : raio da partícula [μm]; f_d : fator que quantifica as forças de dispersão interplanares; m_p : massa da partícula [g] K : constante de coagulação do sistema [cm^3/s].

Segundo Kennedy (1997) a fuligem emitida nos combustores está usualmente na forma de aglomerados. Quanto à morfologia da aglomeração ele menciona que as estruturas em forma de corrente formadas neste processo possuem partículas de fuligem de diâmetros na faixa de 30 a 50 $\times 10^{-3} \mu m$. O conhecimento da morfologia dos aglomerados pode ser importante nas hipóteses formuladas para a formação de fuligem, pois traz evidências de como são estruturados os processos de crescimento superficial e coagulação.

2.1.3. Influência de Parâmetros Físicos na Formação da Fuligem

a. Temperatura

A temperatura é o parâmetro físico mais importante que influencia a formação da fuligem.

Millikan (1962) verificou que, embora a taxa de pirólise aumente com a temperatura, a taxa de ataque do radical hidroxila (OH) aos acetilenos precursores aumenta ainda mais rapidamente, havendo uma competição entre a formação e a oxidação da fuligem. Em chamas pré-misturadas, observa-se a existência de grande quantidade desses radicais na região de pirólise e, em consequência, com o aumento da temperatura, há uma menor formação de fuligem. Por outro lado, nas chamas difusas não há a presença de oxidantes na região de pirólise do combustível e, em consequência, quanto maior a temperatura de chama, maior será a taxa de pirólise, e maior a tendência à formação de fuligem. Portanto, a temperatura teria efeitos opostos, dependendo do tipo de chama.

Frenklach *et al.* (1985), que estudaram a tendência de formação da fuligem de combustíveis em várias temperaturas, verificaram que a taxa de formação da fuligem aumenta com a temperatura até um valor máximo, decrescendo a seguir. A temperatura de máxima formação ocorre numa faixa entre 1900 e 2300K.

Ciajolo *et al.* (1996), em pesquisa para verificar os efeitos da temperatura na nucleação da fuligem em chamas pré-misturadas de etileno / O₂, observaram que: (i) em altas temperaturas, a oxidação seria mais ativa, consumindo os HPA, os quais não estariam disponíveis para a formação dos precursores da fuligem, tendo como consequência, nucleação e crescimento superficial da fuligem reduzidos; (ii) em baixas temperaturas, o processo de oxidação seria menos efetivo, o qual favoreceria a produção de HPA e, por consequência, a formação de partículas de fuligem.

b. Pressão

Segundo Glassman (1977), em todos os tipos de chama, quanto menor a pressão, menor a tendência de formação de fuligem. A sensibilidade à pressão seria coerente com as menores taxas de reação do processo de nucleação, que ocorrem à medida que se diminui a pressão. Em 1987, ele afirmou que o efeito da variação da pressão seria decorrente do efeito da temperatura do sistema. Resultados obtidos em chamas difusas teriam mostrado um aumento da produção de fuligem com o aumento da pressão, o que, em realidade, seria devido ao aumento de temperatura inerente ao aumento de pressão (sob condições de volume constante).

c. Tipos e Regimes de Chama

As chamas difusas produzem maior quantidade de fuligem do que as chamas pré-misturadas. Isso é explicado pela existência de elementos oxidantes na região onde ocorre a pirólise, conforme mencionado anteriormente.

Em chamas laminares difusas, a variação da concentração da fuligem ocorre ao longo do eixo da chama. Isso seria explicado pela rápida formação da fuligem, seguida por sua lenta oxidação nas regiões onde os elementos oxidantes estão disponíveis.

Dhillon *et al.* (1994) trabalharam com chamas difusas de etileno / ar que sofrem recirculação (*recirculating flames*), conseguida através da colocação de anteparos acima destas. Os autores notaram que a concentração de fuligem em chamas com regime turbulento era maior do que em chamas laminares. Isso poderia ser atribuído a um contínuo crescimento da fuligem quando suas partículas seriam recirculadas em regiões de crescimento na chama.

Shaddix *et al.* (1994) em pesquisa com chamas difusas de metano / ar, que sofreriam perturbações ao sair do regime permanente, tornando-se “trêmulas” (*flickering flames*), constataram que a produção da fuligem nessas chamas seria muito maior do que em chamas no regime permanente (da ordem de quatro vezes maior). O mesmo também foi constatado por Zhang e Megaridis (1998) em pesquisa com chamas semelhantes. Esses autores também verificaram que a densidade de partículas primárias nestas chamas seria 30 a 50% maior que em

chamas sob regime permanente, sugerindo um aumento do processo de nucleação da fuligem, atribuído à combinação de tempos de residência e quantidade de partículas primárias de fuligem maiores encontrados nestas chamas.

Glassman (1977) comenta que em chamas difusas turbulentas a formação de fuligem seria drasticamente reduzida. Altos níveis de turbulência rapidamente misturariam o combustível e o oxidante, aumentando a oxidação dos precursores da fuligem. Do mesmo modo, a tendência de formação de fuligem decresceria em chamas pré-misturadas turbulentas.

Segundo Haynes (1991), as chamas turbulentas gasosas são diferenciadas pelo fato de emitirem fuligem com baixos fluxos mássicos de combustível, parando de emitir quando o fluxo aumenta. Apesar de tudo, a formação de fuligem em chamas turbulentas parece ser controlada pelo perfil da temperatura na chama, particularmente na região de oxidação, de maneira análoga ao que ocorre em chamas laminares.

2.1.4. Influência de Parâmetros Químicos na Formação da Fuligem

a. Tipo de Combustível

A tendência à formação da fuligem depende do tipo de combustível utilizado.

Em chamas pré-misturadas, que utilizam o ar como elemento oxidante na mistura, a tendência de formação da fuligem com o tipo do combustível é dada, em ordem decrescente, por Glassman (1987):

Aromáticos > álcoois > parafínicos > olefínicos > acetilenos.

Para chamas difusas a ordem é diferente, como apresentada a seguir:

Aromáticos > acetilenos > olefínicos > parafínicos > álcoois.

Em acordo com estudo de Frenklach *et al.* (1985) sobre a tendência de formação da fuligem dos combustíveis em várias temperaturas, Glassman (1987) também observou que o grupo dos combustíveis aromáticos têm maior tendência à formação de fuligem, com uma moderada dependência da temperatura; o grupo seguinte é o dos olefínicos, que mostram uma grande dependência da temperatura, e, por último, o dos parafínicos. Os acetilenos caem entre os olefínicos e o eteno e têm uma grande dependência da temperatura.

O autor comenta que se as chamas pré-misturadas são mantidas em condições de mistura muito ricas de combustível e operadas abaixo da relação crítica de formação da fuligem – relação ar/combustível na qual tem início a formação da fuligem – a influência do tipo de combustível se aproxima da que ocorre em chamas difusas, pois haveria um aumento substancial da pirólise frente a oxidação, fato que é característico das chamas difusas.

b. Ligações Químicas

As ligações químicas consideradas são as ligações C-C entre os elementos carbono encontradas nos hidrocarbonetos.

Segundo Takahashi *et al.* (1984), a relação crítica de formação da fuligem, ψ_c , para uma dada relação ar / combustível, a uma temperatura de chama fixada de 2200 K, é função apenas do número de ligações C-C, na qual uma ligação dupla é contada como duas e uma tripla como três:

$$\log \psi_{c,2200K} = a_1 \times N_{c-c} + a_0 \quad (2.5)$$

onde N_{c-c} é o número de ligações C-C, a_1 e a_0 são constantes independentes do tipo de combustível ($a_1 = -0,02173$ e $a_0 = 0,1372$). Esta equação pode ser generalizada como função da temperatura adiabática de chama (T_{ad}), e pode ser expressa por:

$$\log \psi_c = a_2 \times \left(\frac{1}{T_{ad}} - \frac{1}{2200} \right) + \log \psi_{c,2200K} \quad (2.6)$$

onde o coeficiente a_2 foi obtido para vinte e um combustíveis, com valores compreendidos na faixa de $-1,95 \times 10^3$ a $-0,562 \times 10^3$, correspondendo a uma aparente energia de ativação em torno de 12,6 a 37,7 kJ/mol.

Glassman (1987) comentou que a escolha do número de ligações C-C como parâmetro para determinação da taxa de formação de fuligem, tem um significado físico. Essa análise é feita levando em conta a taxa de pirólise do combustível e do ataque dos radicais hidroxila (OH) aos precursores da fuligem. O número de ligações C-C seria uma medida do tamanho da molécula do combustível e da relação carbono/hidrogênio (C/H). Assim, quanto maior a molécula, maior será a taxa de pirólise e maior será C/H, resultando numa menor concentração relativa de OH na chama devido à redução dos radicais H, que formam os radicais OH. Isto aumentaria a produção de fuligem – pirólise frente à oxidação.

c. Oxidação

Um dos parâmetros de controle da fuligem é a oxidação de partículas de fuligem e seus precursores pelas espécies oxidantes.

Millikan e Foss (1962) encontraram evidências de que a formação da fuligem em chamas pré-misturadas somente pode ocorrer após a concentração de OH ter alcançado um valor de equilíbrio. Antes disso, os radicais OH seriam inibidores da fuligem pela oxidação dos precursores e partículas embrionárias.

Fenimore e Jones (1969) explicaram o início da formação da fuligem em chamas em termos da competição entre a aglomeração e a oxidação pelos radicais OH. O processo de oxidação no início da formação de fuligem é admitido como controlado pela competição pelo OH por parte do CO e das partículas de fuligem aglomeradas.

Smith (1981) comentou pequenas ambiguidades encontradas nas informações disponíveis para a explicação do mecanismo de oxidação da fuligem. Um dos aspectos diz respeito a qual espécie oxidante predominaria no processo. Fenimore e Jones (1969) atribuem a oxidação da

fuligem aos radicais O e OH, enquanto outros autores, como Appleton, 1973, e Wagner, 1978, a atribuíram diretamente ao O₂.

Haynes (1991) comentou que a maior taxa de reação provavelmente se deve aos radicais OH, que podem dominar a oxidação da fuligem, até mesmo quando há uma presença significativa de oxigênio. Aparentemente, para valores maiores de concentração de O₂, sua contribuição na oxidação da fuligem é menor. O autor menciona que quando a oxidação da fuligem ocorre na presença de O₂, há uma tendência de quebra de aglomerados, produzindo um aumento da densidade do número de partículas. Esta tendência seria atribuído à ocorrência de queima interna dos aglomerados pelo O₂. Esse comportamento não é observado na oxidação em condições de mistura rica controlada pelo OH, que sendo mais reativo, teria ação mais efetiva na superfície dos aglomerados.

Yoshizawa (1993) observou que o O₂ teria importante papel na oxidação da fuligem nas extremidades (*postflame*) da chama (regiões de contorno). Na região central da chama a oxidação seria regida, em especial, pelo OH. O autor propõe a fórmula semi-empírica de Nagle e Strickland – Constable, criada para obter a taxa de oxidação do carbono, para verificar a taxa de oxidação da fuligem devido ao O₂:

$$\frac{w}{12} = \frac{k_{APO_2} u}{1 + k_{ZPO_2}} + k_{BPO_2} (1 - u) \quad (2.7)$$

onde,

$$u = \frac{1}{1 + \frac{k_T}{k_{BPO_2}}} \quad (2.8)$$

$$k_A = 20 \exp\left(\frac{-15100}{T}\right) \quad (2.9)$$

$$k_B = 4,46 \times 10^{-3} \exp\left(\frac{-7640}{T}\right) \quad (2.10)$$

$$k_T = 1,51 \times 10^5 \exp\left(\frac{-48800}{T}\right) \quad (2.11)$$

$$k_Z = 21,3 \exp\left(\frac{2060}{T}\right) \quad (2.12)$$

sendo w :taxa específica de oxidação em termos da área superficial [$\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}$]; p_{O_2} :pressão parcial do oxigênio [atm] , T é a temperatura[K], e $k_a[\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{atm}^{-1}]$, $k_b[\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{atm}^{-1}]$, $k_t[\text{gcm}^{-2}\text{s}^{-1}]$ e $k_z[\text{atm}^{-1}]$ são constantes de reação. A função u é a região superficial mais reativa de uma estrutura de carbono.

Smooke *et al.* (1999) comentaram que em chamas difusas, as taxas de oxidação devido ao O_2 seriam em torno de 5 a 10 vezes menores do que ocorreria na presença do radical OH. A oxidação pelo O_2 ocorreria em duas regiões separadas da chama: na base da chama, próximo à base do queimador, o O_2 seria arrastado e contribuiria para a oxidação da fuligem, mas as taxas de oxidação seriam baixas devido ao suprimento limitado de O_2 neste processo; e nas extremidades (*postflame*) da chama. Novamente as taxas de oxidação seriam baixas já que, o radical OH teria consumido a maioria das partículas no centro da chama. O radical OH claramente seria a espécie oxidante dominante na chama.

d. Aditivos Químicos

Estudos recentes têm revelado que os efeitos de aditivos químicos na formação da fuligem em chamas podem ser bastante complexos, até mesmo quando o aditivo é um simples inerte. Os aditivos podem ter influência na formação da fuligem através de efeitos na concentração do combustível, na temperatura, no tempo de residência e no mecanismo químico; esta influência pode ocorrer na nucleação, crescimento ou em estágios de oxidação. Esses efeitos são fortemente acoplados à maneira de introdução dos aditivos, não somente indiretamente, através da diluição do combustível e, conseqüentemente, modificação do campo de temperatura e do tempo de

residência, como também, diretamente, através da participação dos aditivos no mecanismo químico.

- Glassman (1977) comentou que o efeito de diluentes inertes na formação de fuligem é coerente com a diminuição da pressão parcial dos reagentes precursores da fuligem, o que diminui sua formação.
- A adição de amônia aumenta, segundo Haynes *et al.* (1982), a relação crítica de C/O (relação em que ocorre a formação de fuligem) necessária para dar início à formação de fuligem.
- Quanto ao H_2S , o autor relata que ele inibe fortemente a formação da fuligem, reduzindo significativamente sua produção em chamas com grande tendência de formação de fuligem, como as aromáticas.
- No que diz respeito à adição de vapor de água (H_2O) não foi detectada mudança na relação crítica de C/O, indicando não haver efeito na formação da fuligem. No entanto, Hall-Roberts *et al.* (2000) verificaram que a adição de H_2O diminuiu a formação da fuligem. Os autores atribuíram este efeito ao aumento de radicais OH na chama ($H + H_2O \Rightarrow OH + H_2$), aumentando a oxidação da fuligem.
- Segundo Glassman (1987), o aditivo SO_3 seria conhecido por suprimir a fuligem em chamas difusas e por aumentar a fuligem em chamas pré-misturadas. Nas chamas difusas, a diminuição seria explicada em termos da influência dos radicais H, formados durante a pirólise do combustível, que reagiriam com o SO_3 formando radicais OH ($H + SO_3 \Rightarrow OH + SO_2$), que atacariam os precursores da fuligem. Em chamas pré-misturadas, o SO_3 reduziria a produção dos radicais H, diminuindo a produção de radicais OH e, por consequência, aumentando a produção da fuligem.

Haynes (1991) também tratou do assunto e comentou que os resultados da influência do SO_3 são conflitantes; enquanto Haynes *et al.* (1982) encontraram que o SO_3 em chamas pré-misturadas tem o mesmo comportamento de outros aditivos sulfonados,

reduzindo a formação da fuligem. Outros autores, como Glassman, reportaram um efeito oposto, possivelmente pela dissociação do SO_3 em SO_2 , o que removeria os radicais H da chama ($\text{SO}_2 + \text{H} + \text{M} \Rightarrow \text{HSO}_2 + \text{M}$), reduzindo a formação de radicais OH e, assim, aumentando a produção de fuligem.

- Segundo Mitchell e Miller (1989), aditivos facilmente ionizáveis, como Cs, K, Na e Ba, são taxados como inibidores efetivos da formação de fuligem. Sua ação tem sido explicada em termos de reações íons-moléculas, onde os aditivos sofreriam ionização na chama e os íons formados neutralizariam os íons precursores da fuligem, inibindo sua formação. Outras pesquisas sugerem que estes aditivos alterariam as cargas elétricas das partículas menores de fuligem, o que inibiria o crescimento por aglomeração, devido à ação das forças de repulsão geradas entre as partículas de mesma carga, facilitando o ataque oxidativo nessas partículas.
- Mitchell e Miller (1989) também comentaram que quando freon é adicionado em chamas difusas, aumenta drasticamente a quantidade de fuligem produzida. Já o SF_6 produz uma drástica diminuição da luminosidade da chama, indicando uma produção menor de fuligem do que um crescimento da oxidação.
- Ainda Mitchell e Miller (1989) afirmaram que a adição de Mg em chamas difusas causaria um aumento dos elétrons livres, mas com pouco efeito na formação da fuligem. Essa constatação vai contra a validade da proposição de um mecanismo iônico de produção de fuligem, segundo a qual elétrons poderiam se recombinar com os íons precursores da fuligem encontrados na chama, reduzindo a formação da fuligem.
- Haynes (1991) também comentou a adição de SO_3 , SO_2 , H_2S , NH_3 , H_2O , H_2 e N_2 em chamas difusas e pré-misturadas. A influência de todos esses compostos gasosos, com possível exceção do SO_3 , seria a de decrescer a produção de fuligem em chamas pré-misturadas, sem afetar a taxa do crescimento superficial e o comportamento da coagulação.

- Gülder e Snelling (1993) verificaram a influência do N₂ na formação da fuligem em chamas difusas. Os autores constataram que para baixos níveis de diluição na chama houve redução na formação da fuligem.

Segundo Du *et al.* (1995), o efeito da adição de N₂ em chamas difusas seria devido à redução da concentração do combustível (diluição), bem como da temperatura, situações que diminuem a formação da fuligem.

- Com referência ao comportamento da adição de H₂ em chamas pré-misturadas, Haynes *et al.* (1982) observaram que, o H₂ não apresentou influência na concentração de fuligem na chama, sendo que a adição de 3% H₂ não afetou significativamente a produção da fuligem.

Em 1988, Frenklach, ao propor o mecanismo de crescimento dos HPA, um dos possíveis precursores da fuligem, por reações de subtração de H e adição de acetileno (C₂H₂), considerou três regimes possíveis, nos quais o papel do H₂ variaria: (i) um regime de “alta temperatura”, onde o [H₂] é maior ou comparável a [C₂H₂]; (ii) um regime de “baixa temperatura”, onde [C₂H₂] >> [H₂], e (iii) um regime de “baixa temperatura”, onde [C₂H₂] << [H₂]. Este modelo forneceu que, para os regimes (i) e (iii), a taxa de crescimento varia com [H]/[H₂], sendo que a dependência inversa em relação a [H₂] é devida à reação reversa à de subtração de H:



onde A_i denota uma molécula aromática contendo i cadeias aromáticas, e A_i⁻ denota um radical aromático. A adição de H₂ reduziria o crescimento dos HPA, mesmo com o aumento de temperatura decorrente da adição de H₂.

Em estudos de pirólise do acetileno, Frenklach *et al.* (1988) verificaram que a adição de H₂ reduziu substancialmente a formação da fuligem, conforme efeito antecipado pelo seu modelo.

Du *et al.* (1995) comentaram que a consideração de supressão química da fuligem em chamas difusas devido à adição de H₂ ao combustível parece adequada, mas que este

efeito também seria consequência da redução da diluição do combustível e da redução da concentração local de hidrocarbonetos.

A complexidade deste processo ainda requer um experimento adequado para verificação dos efeitos isoladamente. O estudo de como o H_2 influencia a formação de fuligem em chamas difusas com alimentação de combustível e ar em contracorrente permanece inconclusivo.

- Zhang e Megaridis (1996) em estudo sobre a influência do composto $Fe(C_5H_5)_2$ (*ferrocene*) na formação de fuligem em chamas difusas de etileno/ar verificaram um aumento das taxas de oxidação da fuligem, diminuindo sua concentração na chama. O fato foi atribuído ao efeito catalisador deste composto nas reações de oxidação da fuligem.

Também Kasper *et al.* (1999) relataram os efeitos da adição do composto $Fe(C_5H_5)_2$ em chamas difusas de metano, que levou a um surgimento precoce das partículas de fuligem. Partículas de óxido de ferro formadas no processo teriam servido como fonte de área superficial para o crescimento da fuligem. Os autores também relataram que em chamas difusas de acetileno, a adição de $Fe(C_5H_5)_2$ também formaria óxidos de ferro, que são incorporados às partículas de fuligem, e agem como catalisadores da oxidação da fuligem no topo da chama.

- McEnally e Pfefferle (1998) verificaram em trabalho com chama difusa de metano/ar que, a adição de hidrocarbonetos C_3 (com três elementos carbono em sua estrutura) aumentou a produção de fuligem nessas chamas. O aumento da produção foi atribuído a influência no mecanismo químico de formação da fuligem.
- Também McEnally e Pfefferle (1998) verificaram em trabalho com chama difusa de metano/ar que a adição de hidrocarbonetos C_4 (com quatro elementos carbono em sua estrutura) aumentou a produção da fuligem neste tipo de chama. O aumento foi atribuído à conversão dos aditivos em precursores da fuligem com cadeias aromáticas, sendo

descartados os efeitos eventuais da adição na temperatura de chama e na concentração de átomos de hidrogênio.

- Wey (1994) utilizou várias misturas oxidantes em trabalho sobre a formação da fuligem em chamas difusas. Para uma mistura de O_2 e CO_2 (sendo o percentual de O_2 na mistura no valor de 28%), verificou que a adição de CO_2 reduziu drasticamente a formação da fuligem nas chamas. O autor sugeriu que o efeito da temperatura poderia ter o maior papel nesta redução.

2.2. Influência do Oxigênio (O₂) na Formação da Fuligem

A proposição de testar a utilização do oxigênio como aditivo químico torna-se natural, já que sua adição aproxima as chamas difusas das características das chamas pré-misturadas, além de aumentar a quantidade de oxidante nas chamas pré-misturadas, causando uma possível redução na formação da fuligem pela promoção dos seus mecanismos de oxidação.

As pesquisas realizadas até agora se direcionaram à verificação dos efeitos da adição de oxigênio na formação da fuligem em chamas difusas, sem haver registro do estudo destes efeitos em chamas pré-misturadas, mesmo sendo grande o uso destas chamas em alguns setores da atividade industrial, como na produção de bens manufaturados de vidro.

Em termos de parâmetros da combustão, o uso do O₂ como oxidante na combustão de combustíveis hidrocarbonetos traz a redução do volume requerido de ar, diminuindo o volume de gases de exaustão, aumenta a temperatura adiabática de chama e a eficiência térmica, além de promover maior estabilidade da chama.

You *et al.* (1994) comentaram que HPAs e fuligem podem ser reduzidos pela oxidação, predominantemente pelo ataque via oxigênio molecular aos radicais aromáticos, quando oxidantes, como o O₂ e o OH são adicionados em processos de incineração.

Gülde (1995) comenta que o enriquecimento do ar com oxigênio tem sido considerado em motores de combustão interna para o controle de poluentes nos gases de exaustão, em especial a emissão de material particulado nos motores Diesel.

2.2.1. Efeitos da Adição do Oxigênio

Quando um aditivo ou diluente gasoso é adicionado a um combustível, um dos três efeitos a seguir pode influir na formação da fuligem:

(i) o efeito de diluição resultante da mudança da quantidade de carbono por unidade de massa da mistura do gás diluente / combustível;

(ii) o efeito térmico devido a mudança do perfil de temperatura da chama ocasionado pelo diluente e

(iii) uma interação química direta (excluindo as mudanças nas taxas de reações químicas resultado de variações do perfil de temperatura) devido a mudanças nas concentrações das espécies químicas originadas na combustão (Du *et al.*, 1990 e Gülder, 1993).

Estes efeitos se aplicam ao O_2 .

Com referência à influência química, quando o O_2 é adicionado diretamente a um combustível em uma chama difusa, pode-se esperar dois efeitos relativos à formação da fuligem. Uma aceleração das reações de quebra e rearranjo (*chain branching*) promove a pirólise do combustível e, como resultado, um aumento da produção de radicais hidrocarbonetos e de átomos H, os quais, por sua vez, aumentariam a formação da fuligem (Tabayashi e Bauer, 1979 e Frenklach *et al.*, 1986). Por outro lado, radicais aromáticos e radicais alifáticos críticos, como o C_2H_3 e C_4H_3 , que podem influenciar positivamente no aumento da formação da fuligem, são removidos por reações com o O_2 e átomos de oxigênio (O) (Frenklach e Wang, 1993). O efeito líquido do O_2 é resultante do balanço desses dois efeitos que agem contrariamente, podendo, portanto, favorecer ou não a formação da fuligem.

Seguem os trabalhos encontrados na literatura sobre a influência da adição de oxigênio em chamas difusas, divididos segundo o tipo de adição de O_2 executado: diretamente ao combustível ou ao jato de ar que circunda o jato de combustível.

a. Adição no lado do Combustível

Metano

Saito *et al.* (1986), em estudo da influência da adição do O_2 em chamas difusas de metano, verificaram que pequenos percentuais de oxigênio adicionados no metano (O_2 numa faixa de 1 a 3% da mistura em base molar), não alterariam nem a pirólise do metano, nem as reações subsequentes de formação da fuligem.

Gülde (1995), no entanto, verificou que a adição de O_2 ao metano na faixa de 2,5 a 16% da mistura em base molar reduziria a formação da fuligem, o que seria devido à combinação dos efeitos de diluição e interação química direta do O_2 , em especial pelo segundo efeito. O efeito da redução seria significativo mesmo até com pequenas frações de O_2 .

Sobre o efeito de diluição do O_2 , o autor comenta que os efeitos de diluição do N_2 e O_2 são considerados iguais para temperaturas adiabáticas de chama e frações molares de adição semelhantes, pois ambos os gases têm propriedades de transporte similares; assim, a verificação do efeito de diluição do oxigênio foi feita pela adição do nitrogênio ao combustível.

Com referência a influência química do oxigênio em chamas difusas de metano, quando ele é adicionado ao metano, a quantidade de átomos H resultante é maior que a calculada para a pirólise sem esta adição (Tabayashi e Bauer, 1979). O acetileno, que seria um dos maiores intermediários da fuligem na pirólise do metano puro, é consumido na oxidação do metano pelos radicais OH, H e em especial pelos átomos O (Hennessy *et al.*, 1986 e Warnatz, 1992). Gülde (1995), fundamentado nestas informações, considerou que se a formação da fuligem é assumida como baseada na adição do acetileno para o crescimento químico dos HPA, então a redução de sua concentração, resultado da adição de O_2 no metano, poderia ser uma das possíveis causas da redução química da formação da fuligem.

Gülde verificou, ainda, que a influência química da adição de O_2 no metano decresce quando a temperatura adiabática de chama decresce, como resultado da redução da temperatura dos reagentes.

Propano e n-Butano

No mesmo estudo, Gülde também verificou a influência da adição de O_2 em chamas difusas de propano e n-butano. Ela aumentou a formação da fuligem. O grau de crescimento é pequeno para frações molares baixas de O_2 mas aumenta quando esta fração cresce. O autor explicou este efeito como de influência química, resultante do balanço dos dois efeitos químicos da adição do O_2 , apresentados anteriormente. Os efeitos que obteve para estas duas chamas

podem ser observados nas Tabelas 2.1 e 2.2, onde F_m é a concentração máxima normalizada de fuligem e X_{O_2} é a fração molar de oxigênio.

Tabela 2.1. Sumário das condições experimentais e resultados da adição de oxigênio no propano ($T_{ad} = 2400K$).

T_r (K)	X_{O_2}	F_m
592	0.	1.
576	0.05	0.98
558	0.1	0.95 ^b
516	0.2	0.92 ^b
457	0.3	0.9 ^b
371	0.4	0.89 ^b
300	0.46	0.9 ^b

b - Dados corrigidos para mudança de tempo de residência (Gülde, 1995).

Tabela 2.2. Sumário das condições experimentais e resultados da adição de oxigênio no n-butano ($T_{ad} = 2400K$)

T_r (K)	X_{O_2}	F_m
586	0.	1.
574	0.05	0.97
561	0.1	0.94 ^b
528	0.2	0.91 ^b
484	0.3	0.88 ^b
422	0.4	0.9 ^b
300	0.51	0.94 ^b

b - Dados corrigidos para mudança de tempo de residência (Gülde, 1995).

Wey *et al.* (1984) verificaram a influência da adição de O_2 em chamas difusas de propano/ar. Os autores relataram um aumento na produção da fuligem, que consideraram decorrente do efeito do aumento de temperatura resultante da adição. Os autores também constataram que o aumento das taxas de reação química causado pela ação catalítica do O_2 resultaria na produção de partículas maiores de fuligem, sugerindo uma taxa maior de crescimento em chamas aditivadas com O_2 . Os diâmetros máximos dos aglomerados de fuligem seriam, no entanto, iguais em chamas com ou sem adição do O_2 .

Hura e Glassman (1987) observaram que a presença de pequenas quantidades de O_2 no eteno causaria um aumento substancial de átomos H e, como consequência, um aumento da taxa de pirólise para uma faixa ampla de temperaturas. Este efeito teve pouca influência na faixa de temperatura de interesse das chamas de propano e isobutano, o que sugere que a adição de O_2 não tem efeito catalisador significativo na pirólise dos alcanos. Com base nessas informações, o efeito de redução da fuligem verificado foi atribuído inteiramente ao efeito de diluição. A diluição devido à adição do O_2 , resultaria em baixas concentrações de intermediários importantes da fuligem, como o acetileno, na zona de formação da fuligem, então diminuindo a produção desta.

Du *et al.* (1990) verificaram uma redução na formação da fuligem em chamas difusas de propano quando pequenas quantidades de O_2 foram adicionadas na alimentação do combustível. Os autores atribuíram esta redução a efeitos químicos que influenciariam diretamente na formação. Eles comentam, no entanto, a necessidade de novos trabalhos para determinar o mecanismo de reação pelo qual a adição de O_2 influenciaria a formação da fuligem.

Leung e Lindstedt (1991) em trabalho sobre o mecanismo da formação da fuligem verificaram que, para chamas de propano, o enriquecimento da chama com O_2 tenderia a aumentar a taxa de crescimento superficial das partículas de fuligem.

Eteno

Também Hura e Glassman (1988) verificaram a influência do O_2 na formação da fuligem em chamas difusas de eteno. Em regime de pequenas adições de O_2 , a formação da fuligem

aumentou fortemente e este aumento seria decorrente ao crescimento da taxa de pirólise do combustível.

Du *et al.* (1990) verificaram uma redução na formação da fuligem em chamas difusas de eteno quando pequenas quantidades de O₂ são adicionadas na alimentação do combustível. Eles atribuíram esta redução a efeitos químicos que influenciariam diretamente na formação, e comentaram, também, como no caso do propano, a necessidade de novas pesquisas.

Leung e Lindstedt (1991) também verificaram no trabalho sobre o mecanismo da formação da fuligem que, para chamas de eteno, o enriquecimento da chama com O₂ tenderia a aumentar a taxa de crescimento superficial das partículas de fuligem.

Hwang *et al.* (1998) constataram que a adição de O₂ ao eteno aumentou a produção de fuligem. Este aumento foi atribuído à reação entre átomos de O e de C₂H₂, produzindo CH₂ e, eventualmente, o C₃H₃:



O C₃H₃ seria responsável pelo crescimento da formação dos HPA, possíveis precursores da fuligem, tendo como consequência um aumento da formação da fuligem.

Acetileno

Kent e Bastin (1984) verificaram que a adição de O₂ em chamas difusas de acetileno aumentou consideravelmente a formação da fuligem.

b. Adição no lado do Ar

Metano

Lee *et al.* (2000) estudaram a influência do enriquecimento de chamas difusas de metano/ar pelo O_2 . O O_2 foi injetado na corrente de ar, enriquecendo o ar para condições de 50 e 100% de O_2 em volume, para o ar considerado uma mistura de N_2 e O_2 ¹. Os autores verificaram redução da produção da fuligem nas duas condições de enriquecimento sendo, a condição de 100% a que provocou maior redução.

Zelepouga *et al.* (2000) também verificaram a influência do enriquecimento com O_2 no lado do ar em chamas laminares difusas de metano. Desta vez, o parâmetro de avaliação foi a concentração radial integrada da fuligem. Os autores constataram uma redução na formação da fuligem para teores volumétricos de O_2 no ar de 35, 50 e 100%. Os autores também constataram que a concentração de fuligem seria menor para chamas com maior teor de O_2 devido aos menores comprimentos de chama, e, por consequência, pelos menores tempos de residência que estariam disponíveis para o crescimento da partícula da fuligem.

Em alguns trabalhos a variação do teor de O_2 no lado do ar foi feita de tal forma que os teores de O_2 foram menores que o valor encontrado no ar atmosférico. Isto foi conseguido considerando o ar como uma mistura de N_2 e O_2 sendo que nesta havia uma maior proporção volumétrica a favor do N_2 . Esses trabalhos são dados a seguir.

Propano e Eteno

Glassman e Yaccarino (1980) estudaram a influência da variação da concentração de O_2 no lado do oxidante na tendência à formação da fuligem em chamas de eteno. Os teores de O_2 utilizados foram entre 9 e 50% (fração molar). Os autores verificaram que a tendência de formação da fuligem foi mínima para o teor em torno de 24%. Para teores menores do que 24%, o decréscimo do teor de O_2 aumentaria a tendência de formação da fuligem, enquanto para teores maiores do que 24%, o decréscimo diminuiria a tendência. Essas tendências foram explicadas

¹ O ar atmosférico possui uma mistura aproximada de 21% de O_2 e 79% de N_2 .

pela competição entre a taxa de pirólise do combustível com a oxidação da fuligem no domínio do processo.

Du *et al.* (1990) examinaram os efeitos da concentração de O_2 no lado do oxidante sobre a formação da fuligem em chamas de propano e eteno. Os autores concluíram que houve um aumento da concentração da fuligem com a variação da concentração de O_2 entre 15 e 21% e este efeito era devido ao aumento de temperatura ocorrido nesta variação.

Acetileno

Fassani *et al.* (2000) verificaram a influência do teor de O_2 no lado do oxidante em uma chama pré-misturada. Os autores utilizaram a chama imersa no ar atmosférico, e envolvida por uma barreira de N_2 . Foi constatado que com a barreira de N_2 , a formação de fuligem na chama foi aumentada, fato explicado pela falta de O_2 disponível para intensificar o processo de oxidação.

No trabalho executado nesta dissertação estudou-se os efeitos da adição de O_2 no lado do ar sobre a formação da fuligem em chamas laminares difusas de acetileno, sendo que os teores volumétricos do ar enriquecido foram de 23 e 25% (baixos níveis de enriquecimento). Além da influência do enriquecimento, também foi verificado a influência da velocidade do jato de ar, enriquecido ou não por O_2 , sobre a formação da fuligem.

Este trabalho constitui uma contribuição original ao estudo da presença de fuligem em chamas difusas.

Capítulo 3

Apresentação do Dispositivo Experimental

Neste capítulo é apresentado o dispositivo experimental utilizado para a realização da presente pesquisa. O procedimento experimental está detalhado no próximo capítulo.

O fluxograma do dispositivo está mostrado na Figura 3.1. A fotografia da Figura 3.2 mostra uma vista geral da instalação.

Para facilitar a apresentação do sistema, ele será dividido em três partes:

- .Sistema de Alimentação dos Gases;
- .Equipamentos de Pré-Mistura e Queima, e
- .Instrumentação.

3.1.Sistema de Alimentação dos Gases.

O sistema de alimentação dos gases é composto de três linhas de gases:

- .Linha de Acetileno (C_2H_2).
- .Linha de ar.
- .Linha de oxigênio (O_2).

- A linha do acetileno fornece o gás combustível acetileno que alimenta o queimador. O gás é armazenado em cilindro pressurizado, e alimentado ao queimador através de

mangueiras de plástico de 3/16". Um regulador de pressão do cilindro da marca White Martins, possuindo escala de 0-40 kgf/cm², manométrica, indica a pressão no cilindro e com escala de 0-4 kgf/cm², também manométrica, a pressão de saída do gás.

- A linha de ar transporta o ar que alimenta o pré-misturador ar-oxigênio que gera o ar enriquecido para formar a barreira coaxial ao redor da chama. O ar é comprimido e alimentado até o equipamento através de compressor alternativo modelo Pro Air II fabricante DeVilbiss, com potência de 2hp, com capacidade volumétrica de 20 gal. A pressão de trabalho pode ser regulada entre 0-200 psi manométrica.
- A linha de oxigênio alimenta o pré-misturador para a geração do ar enriquecido. O oxigênio é armazenado em cilindro pressurizado, sendo transportado em mangueiras de plástico de 3/16". O regulador de pressão do cilindro, da marca Record, possui escala de 0-315 kgf/cm², manométrica, para indicação de pressão no cilindro e escala de 0-15 kgf/cm², manométrica, para a pressão de saída do oxigênio.

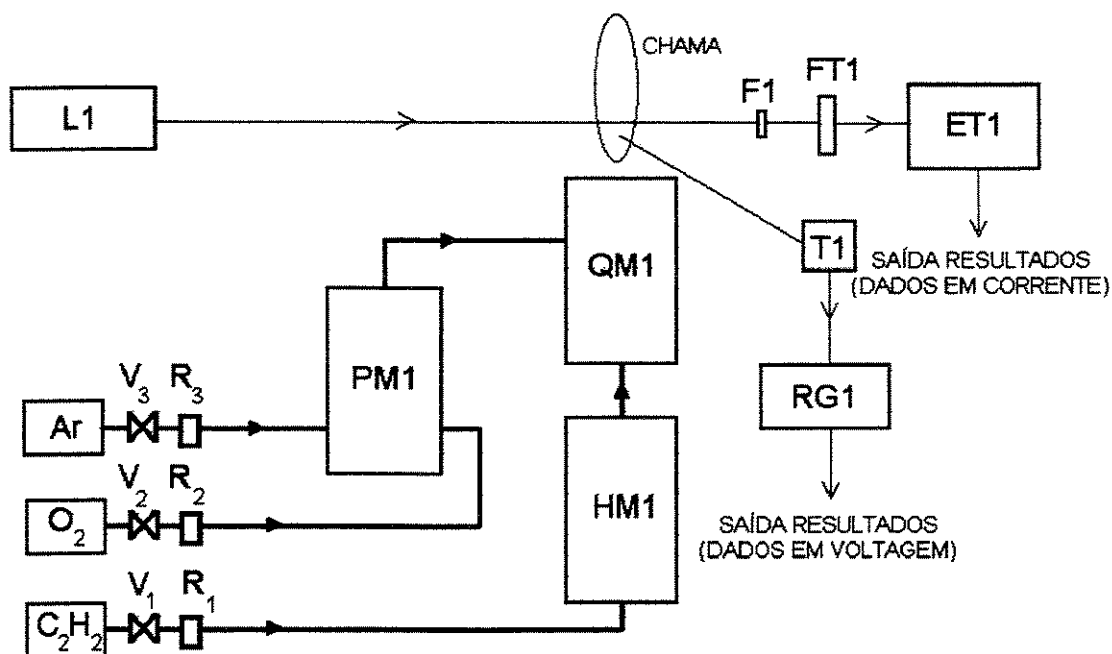


Figura 3.1. Fluxograma do Dispositivo Experimental.

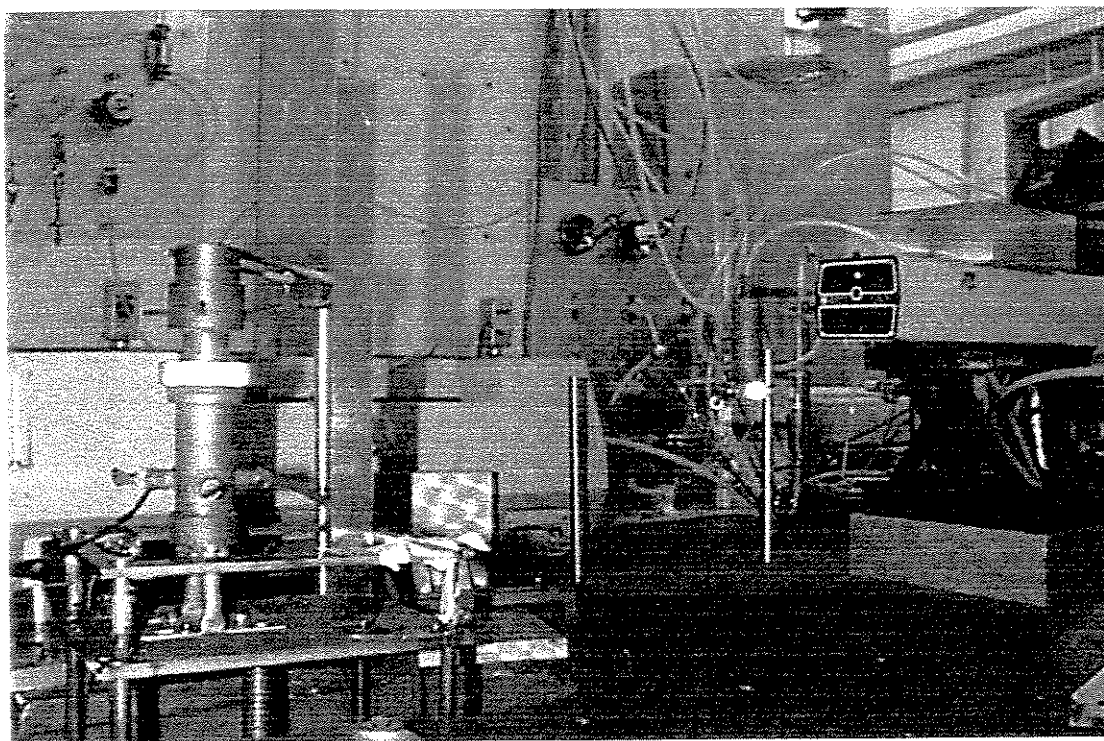


Figura 3.2. Apresentação do Dispositivo Experimental.

3.2. Equipamentos de Pré-Mistura e Queima.

São três os equipamentos considerados nesta seção:

.Pré-Misturador de Ar Enriquecido - PM1;

.Homogeneizador de C_2H_2 - HM1, e

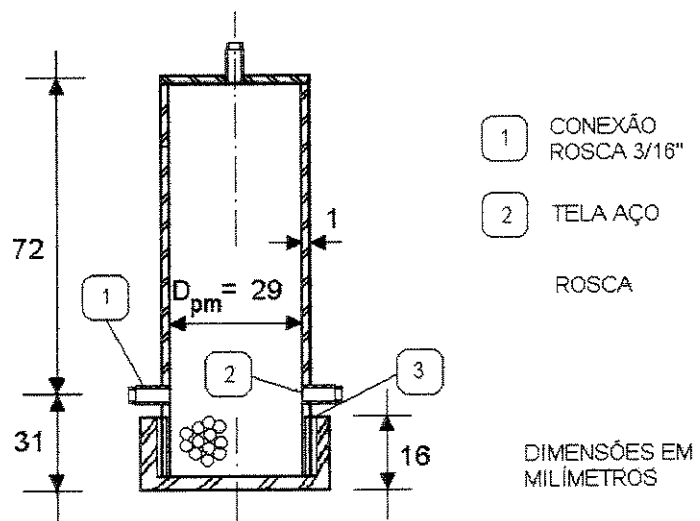
.Queimador de acetileno – QM1.

3.2.1. Pré-Misturador de Ar Enriquecido PM1.

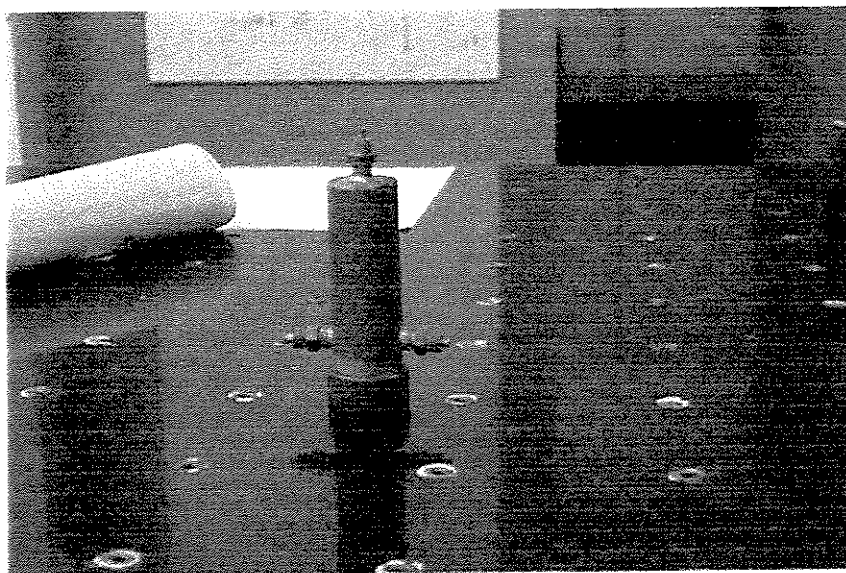
O pré-misturador de ar enriquecido foi concebido para enriquecer com oxigênio o ar fornecido do compressor afim de alimentar a barreira de proteção da chama. Ele foi confeccionado com aço inoxidável, possuindo três conexões em rosca em latão, sendo dois bocais de alimentação de ar e oxigênio e um para a descarga de ar enriquecido, conforme o esquema da Figura 3.3. No interior do equipamento estão dispostas esferas de vidro com diâmetro médio de 2,8 milímetros, utilizadas para homogeneizar a mistura dos gases. Também no interior do PM1, na região dos bocais, estão dispostas telas em aço impedindo que as esferas de vidro se acomodem nos bocais. A Figura 3.3. traz uma fotografia do pré-misturador.

3.2.2. Homogeneizador de C_2H_2 HM1.

Este equipamento foi concebido para promover a homogeneização do escoamento de acetileno antes da chegada ao queimador. O corpo do homogeneizador foi confeccionado em aço inoxidável, possuindo, em sua parte inferior, três bocais roscados de alimentação em latão dispostos igualmente ao redor do equipamento para admissão dos gases citados acima. Também no interior do equipamento estão dispostas esferas de vidro com diâmetro médio de 2,8 milímetros, utilizadas para a homogeneização. Na região dos bocais foi disposta uma tela em aço afim de evitar que as esferas de vidro se acomodem nos bocais. Na parte superior do equipamento existe a entrada para a conexão do queimador, sendo esta vedada com uma tela, para evitar a possibilidade das esferas de vidro caírem. Consta da conexão um assento para um *o-ring*, para um melhor ajuste na montagem entre o queimador e o pré-misturador, evitando folgas e possíveis vazamentos. O desenho esquemático e a fotografia do equipamento estão na Figura 3.4.

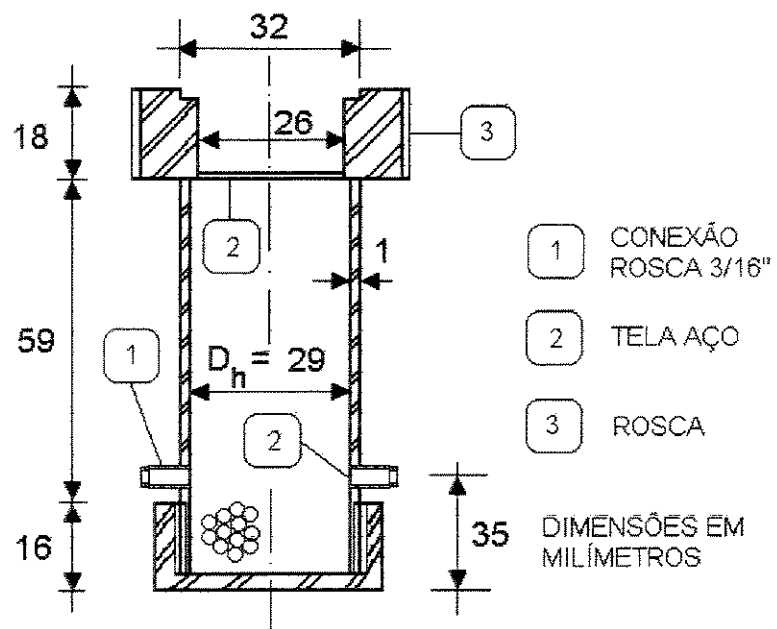


(a) Detalhamento Esquemático do Pré-misturador PM1 (sem escala).

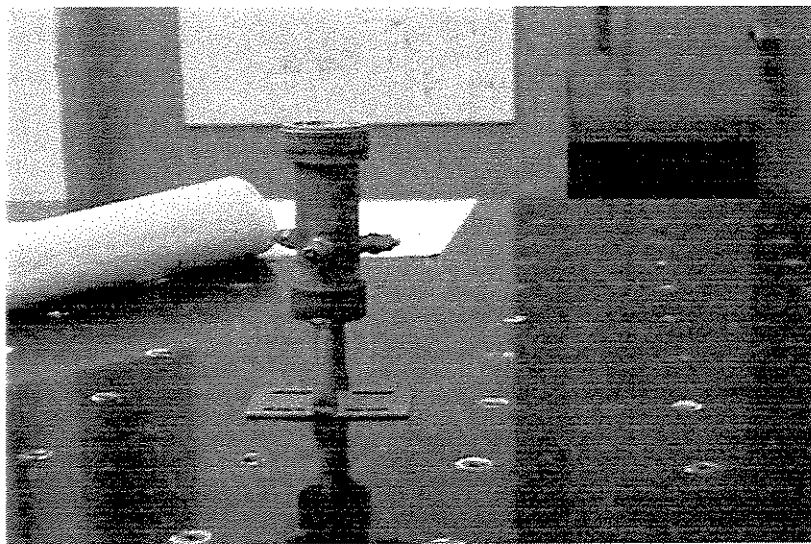


(b) Apresentação do PM1.

Figura 3.3. Apresentação do PM1.



(a) Detalhamento Esquemático do Homogeneizador HM1 (sem escala).



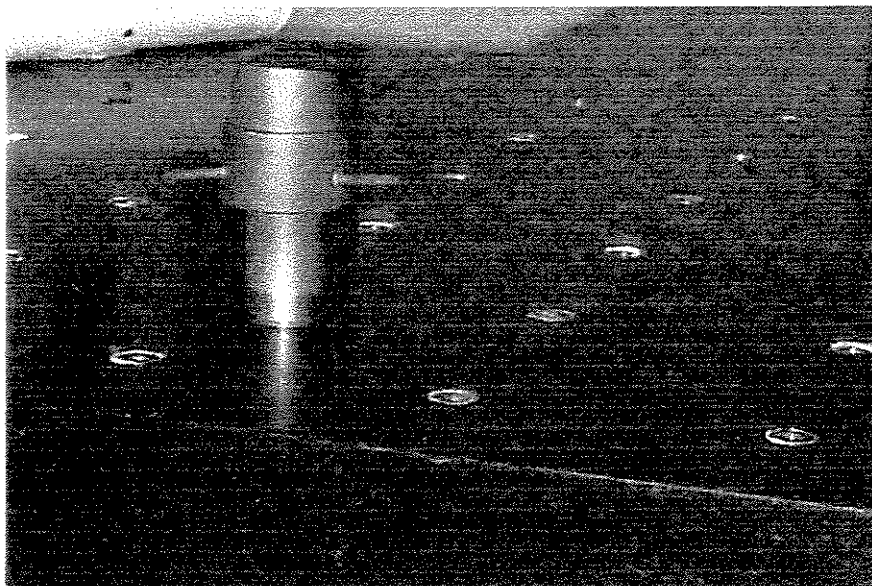
(b) Apresentação do HM1.

Figura 3.4. Apresentação do HM1.

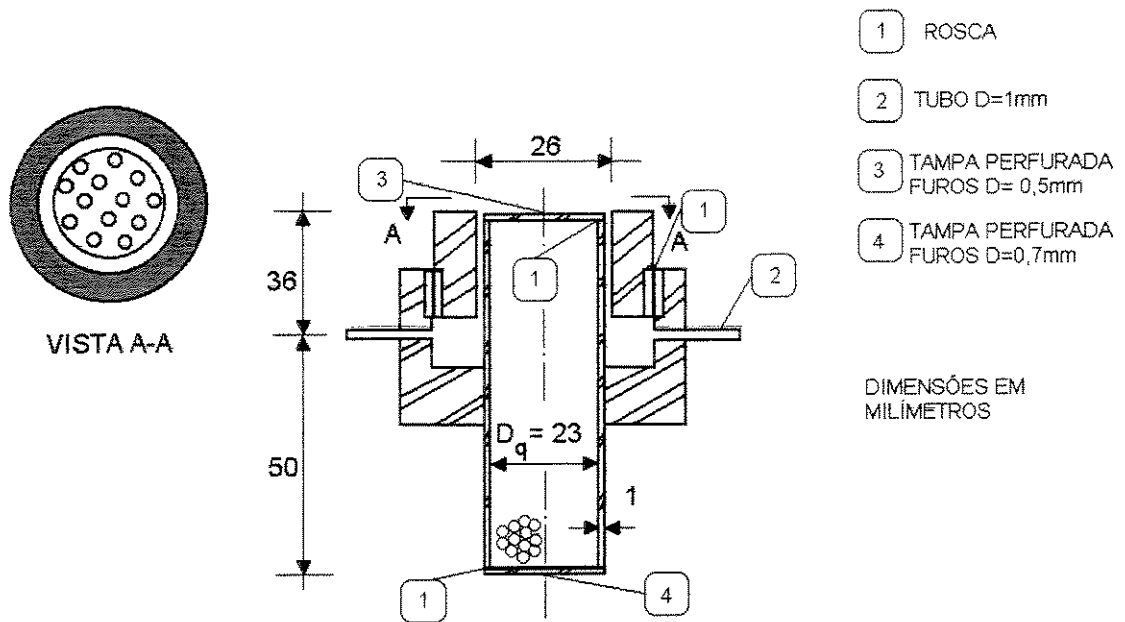
3.2.3. Queimador de Acetileno QM1.

O queimador em questão foi concebido para a queima de acetileno nas diversas condições propostas por este experimento. O equipamento foi confeccionado em aço inoxidável, possuindo três tubos de conexão em cobre, dispostos igualmente ao redor do queimador, para a entrada do ar ou ar enriquecido que irá constituir a barreira ao redor da chama. A barreira é constituída pelo escoamento de ar ou ar enriquecido através de uma fresta anular coaxial confeccionada ao redor do queimador. A admissão dos gases e sua descarga para queima são feitas através de tampas perfuradas na parte inferior e superior do queimador. A homogeneização do gás é promovida através de esferas de vidro com diâmetro médio de 2,8 milímetros, no fundo do queimador.

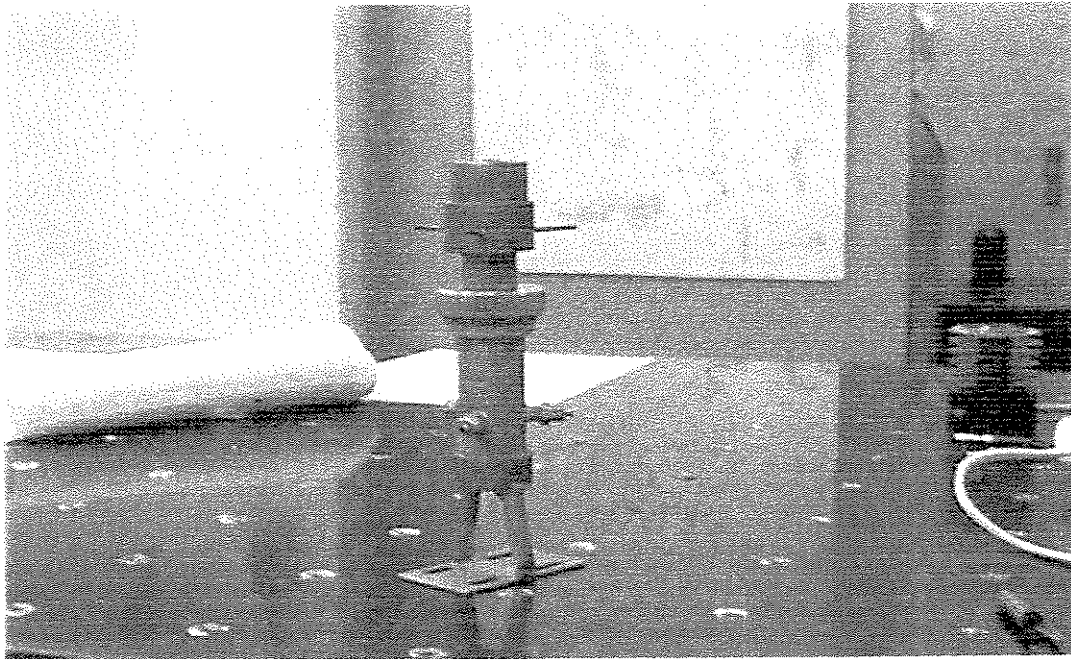
A plataforma em que está instalado o queimador possui um sistema de deslocamento vertical através de engrenagens e parafuso sem fim, a fim de possibilitar ao laser uma varredura completa da chama. A plataforma possui três velocidades de deslocamento, graças ao equipamento gerador de funções, que varia a frequência de rotação do motor, também possibilitando o deslocamento vertical tanto para cima como para baixo. A Figura 3.5 mostra um desenho esquemático, e a fotografia do queimador, bem como do conjunto queimador / pré-misturador montado, e do gerador de funções do sistema de movimentação da plataforma.



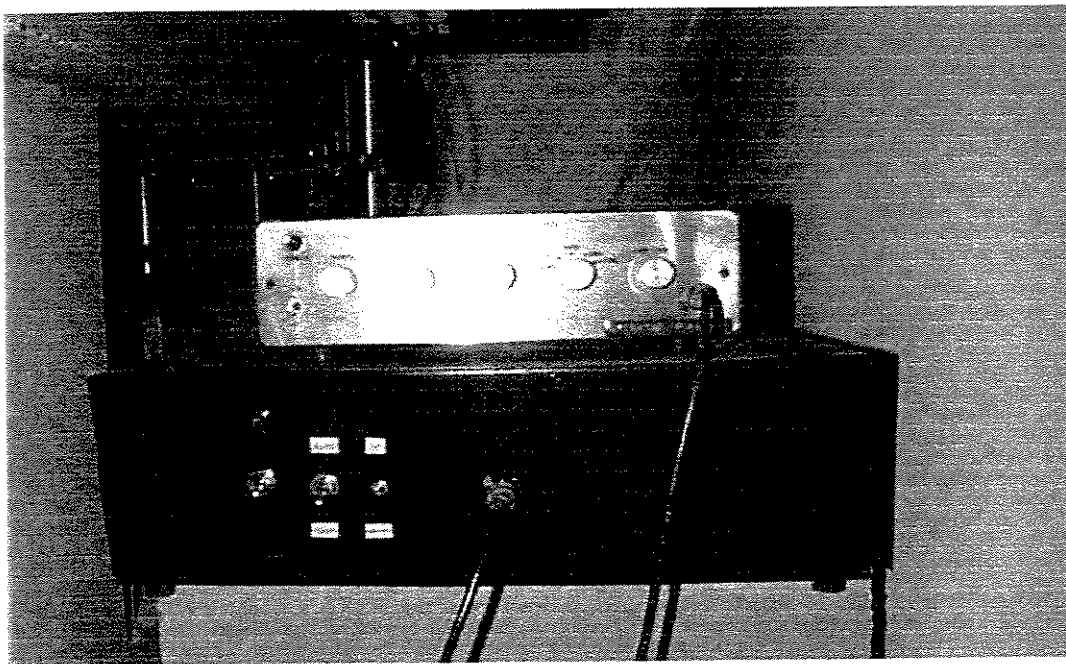
(a) Apresentação do queimador.



(b) Detalhamento esquemático do queimador QM1 (sem escala).



(c) Detalhe montagem do conjunto QM1/HM1.



(d) Detalhe gerador de funções do sistema de movimentação da plataforma onde está instalado o conjunto QM1/HM1.

Figura 3.5. Apresentação QM1, HM1 e Gerador de Funções.

3.3. Dispositivos de Instrumentação.

3.3.1. Laser L1.

O laser utilizado para medir a concentração da fuligem na chama é do tipo He-Ne, com potência de 1mW. O laser foi montado na bancada experimental de forma que fosse medido a concentração da fuligem ao longo da altura da chama cruzando o eixo vertical do queimador. O modelo do equipamento é o 155 Laser, fabricado pela Spectra Physics. Ele é mostrado na Figura 3.6.

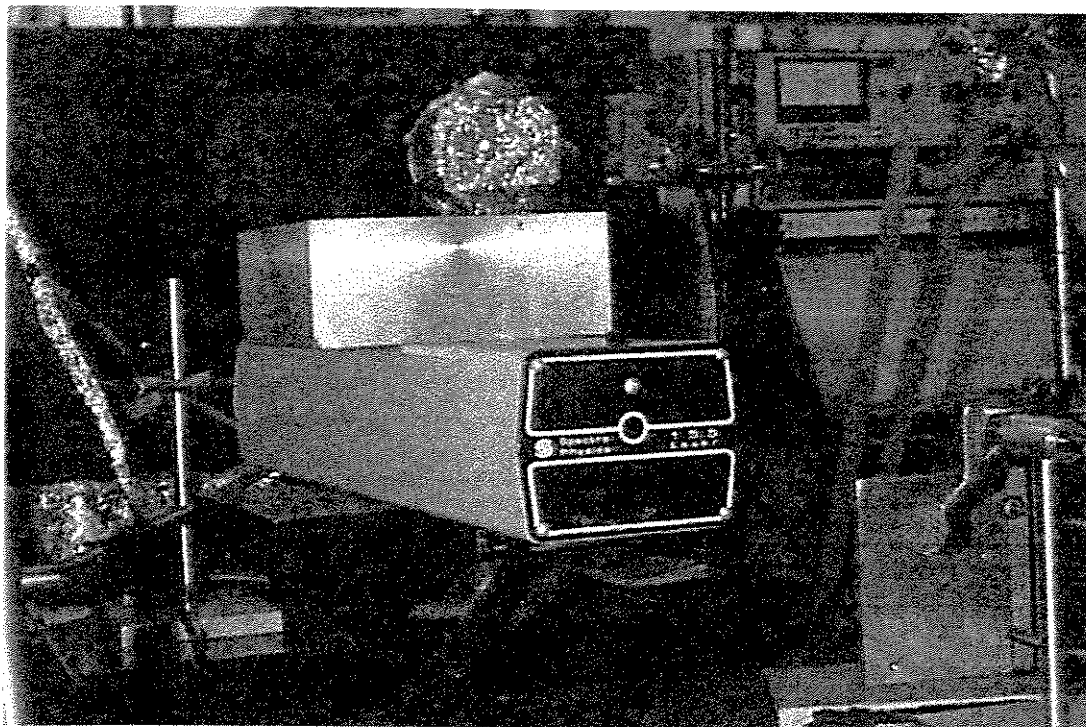


Figura 3.6. Laser He-Ne 1mW.

3.3.2. Filtro de Radiação F1.

O filtro de radiação foi montado atrás do queimador para evitar que o sinal enviado pelo laser fosse prejudicado por outros tipos de radiação provenientes da chama ou do ambiente, com comprimentos de onda diferentes do laser. Para isso, o filtro transmite apenas radiação com comprimentos de onda próximo ao do laser He-Ne que é de 632,8 nm. Ele é apresentado na fotografia da Figura 3.7.

3.3.3. Fotodiodo FT1.

O fotodiodo, também mostrado na Figura 3.7, transforma o sinal de luz do laser em um sinal de corrente para ser registrado pelo eletrômetro, gerando um dos dados necessários para o cálculo da concentração da fuligem.

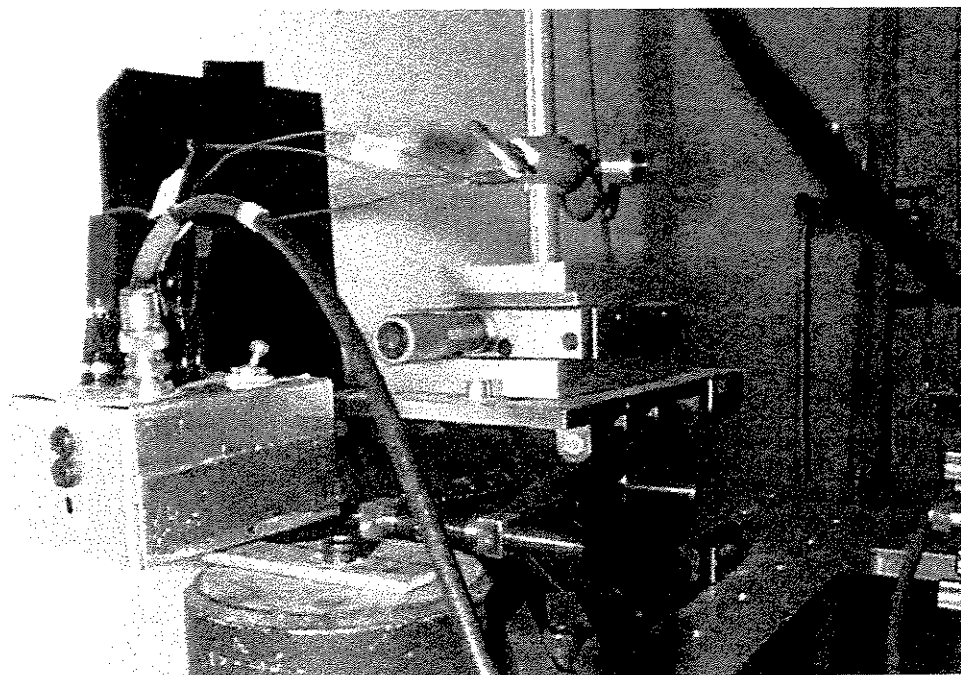


Figura 3.7. Apresentação Filtro de Radiação e Fotodiodo.

3.3.4. Eletrômetro ET1.

O eletrômetro utilizado para registrar os valores das correntes enviadas pelo fotodiodo através de cabo é do modelo 610CR, fabricado pela Keithley Instruments. Os dados foram registrados continuamente e impressos em um registrador gráfico, que está acoplado ao eletrômetro modelo HP 7101 BM *Strip Chart Records* de fabricação Hewlett Packard. O equipamento é mostrado na Figura 3.8.

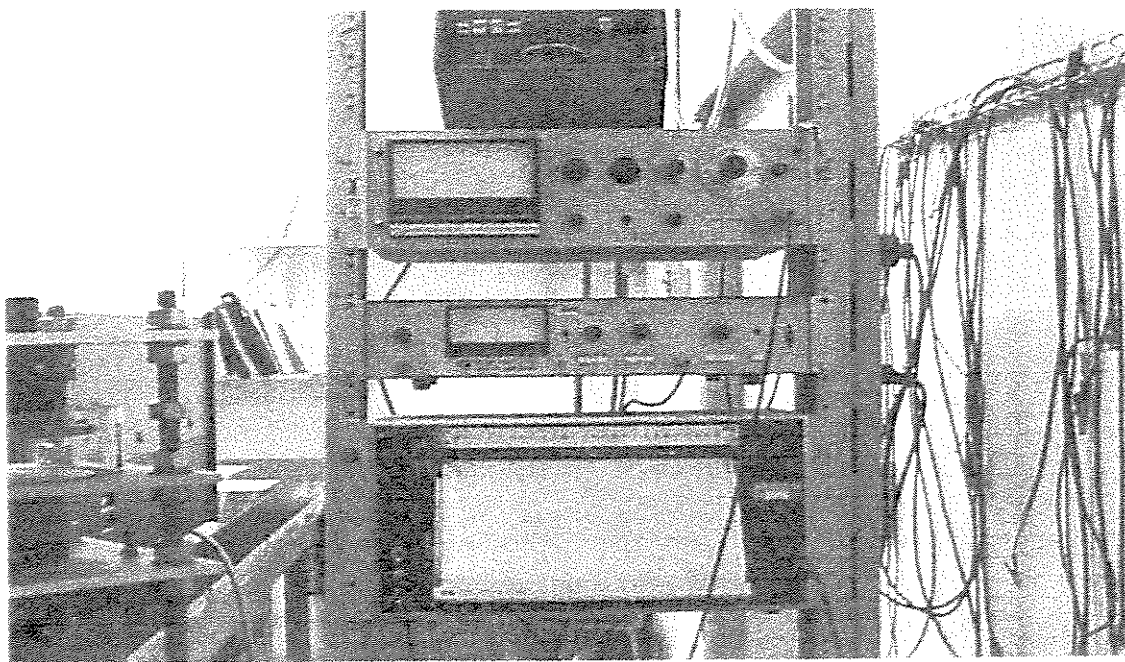


Figura 3.8. Eletrômetro Mod. 610CR.

3.3.5. Termopar T1.

O dispositivo utilizado para medição de temperatura da chama nas diversas condições de operação propostas por este experimento foi um termopar do tipo “S”, confeccionado com fios de Platina e liga de Platina-10% Ródio (Pt-Pt /10%Rh), com uma faixa de medição de temperatura entre 0-1750°C (Holman, 1994). O termopar foi montado na bancada experimental para registrar a temperatura da chama ao longo do eixo vertical do queimador, em acordo com as medidas feitas para a concentração, afim de permitir uma relação entre os resultados desses dois parâmetros. O dispositivo é visualizado na Figura 3.9 a seguir.

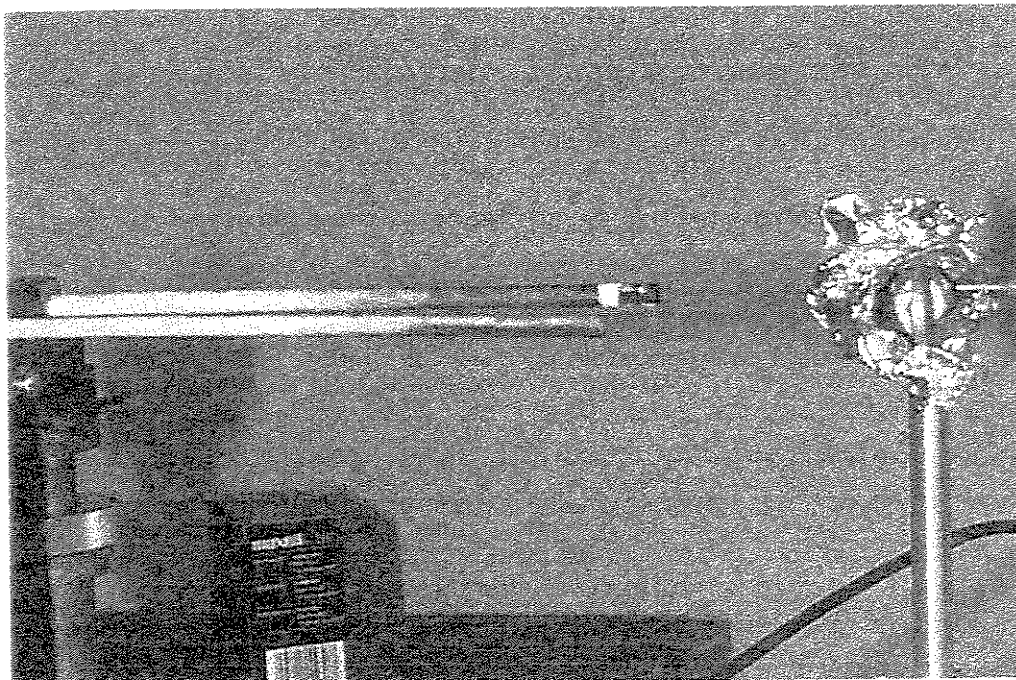


Figura 3.9. Termopar T1 tipo "S".

3.3.6. Registrador de Temperatura RG1.

Para registrar os dados lidos continuamente pelo termopar, foi acoplado a este um registrador de temperatura, que mede a força eletromotriz gerada na leitura do termopar, ou seja, fornece dados em voltagem que, posteriormente, foram convertidos em temperatura mediante a curva de calibração. O registrador de temperatura, mostrado na Figura 3.10, é do modelo 7090 A *Measurement Plotting System*, fabricado pela Hewlett Packard.

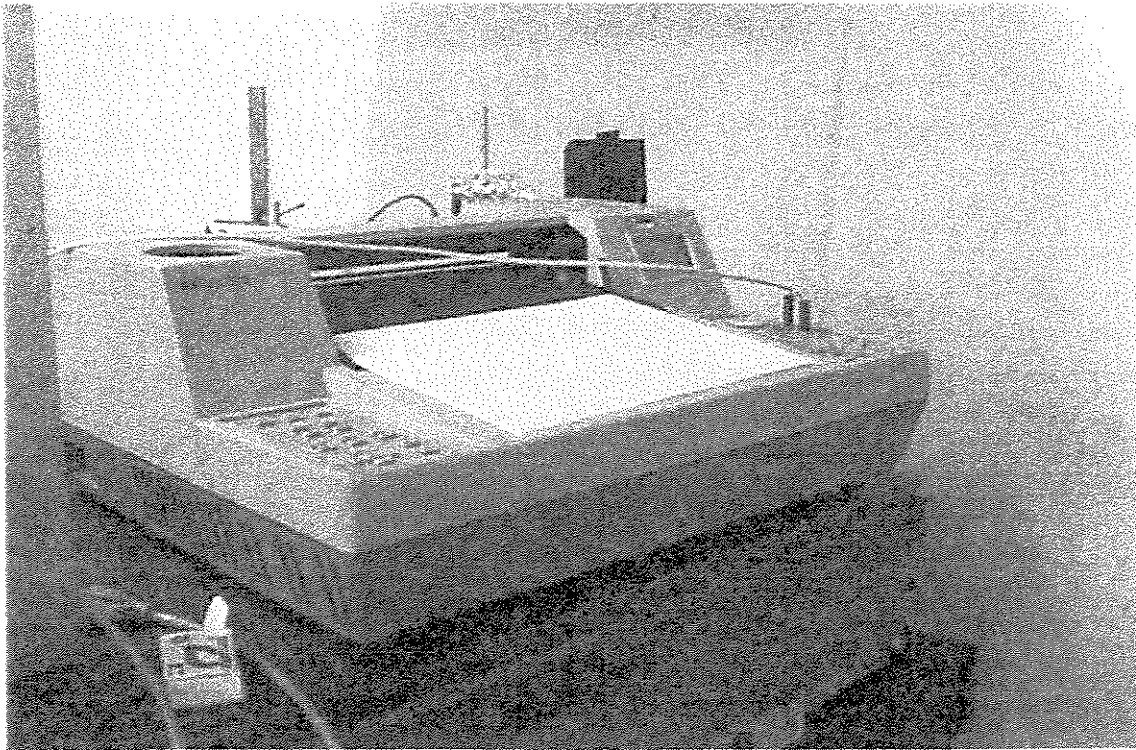


Figura 3.10. Registrador de Temperatura RG1.

3.3.7. Válvulas Balanceadoras V1, V2, V3.

Estas válvulas foram utilizadas para regular a vazão nos rotâmetros e controlar a abertura e corte do fornecimento dos gases ao experimento. Estão são do tipo agulha fabricadas em latão com diâmetro de entrada de 1/4".

3.3.8. Rotâmetros R1, R2, R3.

Os rotâmetros utilizados para medir a vazão dos gases estão listados na tabela a seguir:

Tabela 3.1. Apresentação dos rotâmetros.

Rotâmetro	Fabricante	Modelo	Gás	Faixa Vazão	Gás Referência
R1	Vögtlin	V100K	Acetileno	0-130 l/h	Ar
R2	Gilmont	23438	Oxigênio	15,2-2240 ml/min	Ar
R3	Vögtlin/Gilmont	V100K/ 32271	Ar	0-300(0-15)l/h / 0,0519-14,7 l/min	Ar

Os rotâmetros utilizados são calibrados para medir a vazão de ar, que é o gás de referência, o que levou à necessidade de introduzir correções nas leituras de vazão do acetileno e do oxigênio. A fotografia da Figura 3.11 mostra um vista de sua instalação.

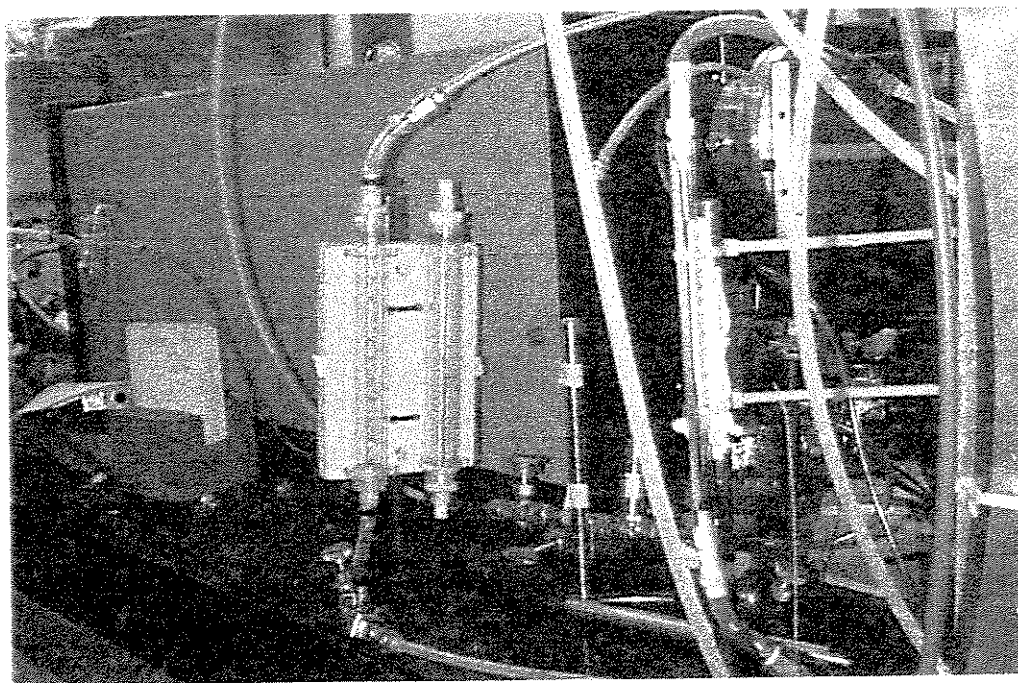


Figura 3.11. Vista dos Rotâmetros.

3.3.9. Régua Milimetrada.

Para posicionar o laser e o termopar para leitura ao longo da chama, foi instalada uma régua milimetrada em aço inoxidável de 30 cm na plataforma móvel onde está montado o queimador. A leitura é feita em uma barra de alumínio de referência, fixa em relação à plataforma.

Capítulo 4

Procedimento Experimental

4.1. Metodologia Utilizada para o Cálculo da Concentração da Fuligem

A seguir são abordados aspectos teóricos da metodologia *Laser Light Extinction* (LLE), para partículas em forma de esfera, utilizada para o cálculo da concentração da fuligem.

Segundo Iuliis *et al.* (1998) a transmitância monocromática, τ_λ , de um feixe de luz através de uma chama homogênea é dada pela razão entre a intensidade de luz emergente da chama, I_L , e a intensidade de luz incidente na chama, I_o . Esta razão é proporcional ao comprimento efetivo que a luz percorre na chama, L , e ao seu coeficiente de extinção, K_{ext} , dada por:

$$\begin{aligned}\tau_\lambda &= \frac{I_L}{I_o} \\ &= \exp(-K_{ext}L)\end{aligned}\tag{4.1}$$

O coeficiente de extinção quantifica o efeito de absorção e espalhamento de um sinal de luz por uma partícula. Este pode ser expresso em termos da densidade do número de partículas, N , e das seções médias de absorção, C_{abs} , e espalhamento, C_{sca} :

$$\begin{aligned} K_{ext} &= N(C_{abs} + C_{sca}) \\ &= NC_{abs}(1 + \rho_{sca}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde, ρ_{sca} é a razão entre o espalhamento e a absorção e depende da estrutura dos aglomerados. Na maioria dos casos, ρ_{sca} pode ser desprezada e $K_{ext} = K_{abs}$. Por exemplo, medidas em chamas laminares difusas de eteno indicaram que ρ_{sca} é menor do que 7% (Köylü e Faeth, 1994).

As seções médias de absorção e espalhamento são definidas a partir de uma hipótese física, de que a energia total absorvida em todas as direções por uma partícula pode ser igual à energia de uma onda incidindo sobre uma determinada área. Esta área, por definição, seria a seção média de absorção, C_{abs} . A seção de espalhamento é definida de maneira análoga.

Seja agora x um comprimento característico, definido por $x = \pi D/\lambda$, onde D é o diâmetro da partícula e λ o comprimento de onda do raio incidente na chama. Quando x for menor que 1 (μm) tem-se o regime de Rayleigh, onde a seção de absorção é muito maior que a seção de espalhamento, no qual é possível a utilização da metodologia de cálculo dada a seguir. Na faixa de diâmetros de partícula encontrados para a fuligem e para o comprimento de onda do laser aplicado neste trabalho, $\lambda = 632,8\text{nm}$, os experimentos ocorrem no regime de Rayleigh.

Observou-se que para o comprimento de onda do laser aplicado no experimento, a absorção da luz é basicamente feita pelas partículas de fuligem, não sendo verificada influência por parte de outros produtos da combustão (Frenklach *et al.*, 1985).

A seção de absorção das partículas é dada no regime de Rayleigh na teoria de extinção de Mie. Por esta teoria temos que:

$$C_{abs} = 4\pi x \text{Re}(i\alpha) \quad (4.3)$$

onde,

$$\alpha = \frac{3(m^2 - 1)}{4\pi(m^2 + 2)} \text{Volume}_{\text{esfera}} \quad (4.4)$$

$$= \frac{|m^2 - 1|}{m^2 + 2} \frac{D^3}{8}$$

sendo que α representa o índice de polarização de uma partícula esférica e m é o índice complexo de refração da partícula de fuligem.^{1,2}

Substituindo a equação (4.4) em (4.3) temos que:

$$C_{\text{abs}} = \frac{\pi^2 D^3}{\lambda} \text{Im} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \quad (4.5)$$

sendo, Im a parte imaginária do módulo em questão.

Por definição, a concentração da fuligem é dada por:

$$\phi = \frac{\pi D^3 N}{6} \quad (4.6)$$

e isto implica que,

$$N = \frac{6\phi}{\pi D^3} \quad (4.7)$$

¹ Quando uma partícula é inserida em um campo elétrico qualquer, este causa uma polarização da partícula, produzindo um campo elétrico próprio. Este campo próprio modifica o campo elétrico em que a partícula está inserida através de um momento dipolo, que é proporcional ao campo elétrico exterior à partícula. α é a razão entre essas duas grandezas.

² O índice complexo de refração, dado pelo número complexo $m = n - ki$, representa as propriedades de dispersão e de extinção de um feixe de luz de um determinado material. A parte real do índice, n , define o fator de dispersão, ou seja, quanto a velocidade de propagação de uma onda varia quando muda o meio através do qual se propaga. Já a parte imaginária do índice, k , determina o decréscimo da intensidade devido à absorção e/ou espalhamento do sinal de luz.

De (4.2), (4.5), (4.7), e sendo ρ_{sca} desprezada e $K_{ext} = K_{abs}$, temos que $K_{abs} = NC_{abs}$. O coeficiente de absorção fica dado por:

$$K_{abs} = \phi \frac{36\pi F(\lambda)}{\lambda} \quad (4.8)$$

onde, $F(\lambda)$ é uma função das partes real e imaginária do índice complexo de refração da partícula de fuligem, dada por :

$$\begin{aligned} F(\lambda) &= \frac{1}{6} \operatorname{Im} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \\ &= \frac{nk}{(n^2 - k^2 + 2)^2 + 4n^2 k^2} \end{aligned} \quad (4.9)$$

O comprimento natural de absorção, l_{abs} , é definido como:

$$\begin{aligned} l_{abs} &= \frac{\phi}{K_{abs}} \\ &= \frac{\lambda}{36\pi F(\lambda)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Assim, com a combinação de (4.1), (4.8) e (4.10), a concentração da fuligem pode ser calculada através da medida de absorção da luz:

$$\begin{aligned} \phi &= \ln\left(\frac{I_o}{I_L}\right) \frac{\lambda}{36\pi F(\lambda)L} \\ &= \ln\left(\frac{I_o}{I_L}\right) \frac{l_{abs}}{L} \end{aligned} \quad (4.11)$$

sendo l_{abs} [μm], L [m], ϕ [ppmv].

Esta expressão pode ser colocada na forma clássica de apresentação:

$$\phi = \frac{\lambda}{6\pi \operatorname{Im} \left[\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right]} K_{abs} \quad (4.12)$$

sendo

$$K_{abs} = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{I_0}{I_L} \right) \quad (4.13)$$

O valor adotado para o índice de refração complexo da partícula de fuligem é o proposto por Lee e Tien, em 1981:

$$m = 1,90 - 0,55i.$$

Para um conhecimento mais aprofundado desta teoria, recomenda-se os estudos de Hulst (1981) e de Iuliis *et al.* (1998).

4.2. Procedimento Experimental

O presente trabalho consiste nas medidas de concentração da fuligem e da temperatura ao longo do eixo de chamas difusas na queima do acetileno, verificando a influência na formação de fuligem do teor de O_2 na barreira de ar que circunda a chama, e da velocidade do jato anular que constitui esta barreira.

A queima foi executada no queimador QM1, e a chama foi estudada em dezesseis condições distintas:

1. Imersa no ar atmosférico ambiente;
2. Com uma barreira anular de ar atmosférico (21% de oxigênio), em cinco velocidades de escoamento;
3. Com barreiras de ar enriquecido com oxigênio (no caso em questão os teores foram 23 e 25%) em cinco velocidades de escoamento.

As misturas do ar com o oxigênio foram geradas no pré-misturador PM1. A chama de acetileno é obtida do escoamento do gás através de mangueira do cilindro até o homogeneizador HM1, e daí para o queimador QM1, onde se dá a combustão em contato com o ar que o circunda.

Um sinal de laser foi inserido na chama formada, sofrendo absorção parcial nas partículas de fuligem formadas. O sinal incidente máximo do laser é obtido da leitura no eletrômetro antes da formação da chama no queimador. O sinal que emerge da chama foi filtrado através de um filtro de radiação e depois absorvido e transformado em um sinal de corrente mediante um fotodiodo. O sinal transformado é enviado a um eletrômetro por meio de cabo. Neste dispositivo foram obtidos os sinais de resposta, que foram impressos ou lidos diretamente no amperímetro do equipamento.

As medidas de temperatura foram feitas por meio de termopar inserido diretamente na chama ao longo do eixo vertical do queimador, sendo as temperaturas obtidas a partir de um registrador da força eletromotriz térmica gerada.

4.2.1. Preparativos para Estabelecer a Chama

- ◆ Ligar o compressor de ar;
- ◆ Ligar o exaustor de gases da queima;
- ◆ Abrir o cilindro de acetileno, regulando a pressão de saída do gás em torno de $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ manométrica;
- ◆ Abrir o cilindro de oxigênio, regulando a pressão de saída do gás em torno de $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ manométrica;

4.2.2. Medida dos Sinais para Cálculo da Concentração da Fuligem

- ◆ Ligar o laser 1 hora antes do início das medidas, para estabilização do feixe de laser;
- ◆ Ligar o fotodiodo;
- ◆ Ligar o eletrômetro;

- ◆ Ligar o mecanismo de deslocamento vertical da plataforma para posicionamento do queimador;
- ◆ Direcionar o laser ao centro do filtro de radiação, de modo a cruzar a linha de centro do queimador;
- ◆ Iniciar a queima;
- ◆ Descer o queimador mediante o mecanismo de deslocamento vertical, possibilitando ao laser executar uma varredura axial da chama, registrando os sinais obtidos através do eletrômetro;
- ◆ Retornar o queimador à posição original;
- ◆ Repetir o procedimento para outra condição de combustão.

4.2.3. Medição da Temperatura

- ◆ Ligar o registrador de temperatura;
- ◆ Posicionar o termopar na chama na posição axial estabelecida;
- ◆ Manter o termopar na posição o mínimo de tempo necessário para estabilizar o sinal de saída no registrador, em um valor estável ou em torno de um valor médio;
- ◆ Estabelecido o valor, retirar o termopar da chama;
- ◆ Remover do termopar possíveis camadas de fuligem formadas na chama, a fim de minimizar perdas por radiação, já que uma maior emitância do termopar pode ser esperada quando coberto por fuligem;
- ◆ Repetir o procedimento em nova posição axial ao longo da chama.

4.3. Apresentação dos Testes.

4.3.1. Concentração da Fuligem

Teste 1 - Obtenção do perfil de concentração da fuligem em chamas com seis potências distintas (seis vazões de combustível) imersas no ar atmosférico em repouso;

Teste 2 – Obtenção do perfil de concentração da fuligem em chamas com seis potências distintas, circundadas por uma barreira anular de ar atmosférico com cinco velocidades de jato distintas;

Teste 3 – Obtenção do perfil de concentração da fuligem em chamas com seis potências distintas, circundadas por uma barreira anular de ar enriquecido com oxigênio, em teores de 23 e 25%, com cinco velocidades de jato distintas.

4.3.2. Temperatura

Teste 4 - Obtenção do perfil de temperatura das chamas no Teste 1, sendo executadas medidas em cinco posições ao longo do eixo da chama para esta identificação;

Teste 5 – Análogo ao Teste 4 para as chamas do Teste 2;

Teste 6 – Análogo ao Teste 4 para as chamas do Teste 3.

4.3.3. Processamento dos Dados

Para apresentação e discussão das variações da concentração de fuligem e da temperatura ao longo da chama os dados foram colocados em função da potência do queimador e da relação da velocidade do jato de ar, V_{ar} , com a do jato de combustível, V_{eg} . O conceito de potência foi introduzido levando em conta que este é um dos parâmetros considerados para a seleção de um queimador.

A potência de um queimador pode ser descrita da seguinte forma:

$$Potência[kW] = \frac{Q_c[l/h]PCI_c[kJ/kg]\rho_c[kg/m^3]}{3600 \times 1000} \quad (4.14)$$

sendo Q_c = vazão de combustível, PCI_c = poder calorífico inferior do combustível e ρ_c = densidade do combustível.

O PCI do acetileno foi adotado como 48.225 kJ/kg (Turns, 1996) e a densidade como $\rho_c(20^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}) = 1,0824 \text{ kg/m}^3$ (AET/IPT, 2000).

Segue uma tabela resumo das condições dos testes executados, num total de 96 (noventa e seis) testes.

As velocidades dos jatos de combustível e ar foram calculadas a partir das vazões obtidas para a condição de temperatura igual a 20°C, descritas na Tabela 4.1.

Os números de Reynolds para os jatos de combustível e de ar foram calculados isoladamente tendo como resultados valores menores que 2300 (dois mil e trezentos), estando os jatos no regime laminar e sendo visualmente estáveis.

Tabela 4.1. Tabela Resumo dos Testes Executados.

			Var [m/s]					
			0	0,10	0,15	Veg	0,85	1,39
			Teor Volumétrico de Oxigênio [%]					
			21	21-23-25	21-23-25	21-23-25	21-23-25	21-23-25
Vazão Combustível[l/h]	Veg [m/s]	Potência [kW]	Var/Veg					
50,00	0,22	0,72	0	0,45	0,68	1,00	3,86	6,32
60,00	0,27	0,87	0	0,37	0,56	1,00	3,15	5,15
65,00	0,29	0,94	0	0,34	0,52	1,00	2,93	4,79
70,00	0,31	1,01	0	0,32	0,48	1,00	2,74	4,48
75,00	0,34	1,09	0	0,29	0,44	1,00	2,50	4,09
80,00	0,36	1,16	0	0,28	0,42	1,00	2,36	3,86

A concentração da fuligem ao longo da chama foi analisada ao longo do eixo longitudinal da chama, em termos das ordenadas y , ou y/L_f e do conteúdo integrado axialmente da fuligem ao longo do comprimento da chama. O valor de L_f [mm] é definido como o comprimento visível da chama em cada condição testada, medido desde a base do queimador até o topo da chama.

A concentração integrada foi obtida pela utilização da regra trapezoidal de integração. A regra trapezoidal consiste em tomar um número z ímpar de pontos em um determinado intervalo $[y_1, y_2]$, no caso em questão, no início e no fim da chama, de uma curva $f(y)$, no caso o perfil de concentração da fuligem, tal que:

$$\int_{y_1}^{y_2} f(y) dy \cong \frac{1}{2} ((f^2 + f^1) \Delta y^1 + (f^3 + f^2) \Delta y^2 + \dots + (f^z + f^{z-1}) \Delta y^{z-1}) \quad (4.15)$$

A análise da incerteza experimental e os resultados experimentais dos 96 (noventa e seis) testes estão nos anexos I e II, respectivamente. Alguns testes foram realizados afim de se verificar a repetibilidade dos resultados. Estes são apresentados no decorrer do capítulo 5 e no anexo II.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Os resultados da concentração de fuligem são apresentados e analisados a seguir em termos da influência da potência do queimador, da relação V_{ar}/V_{eg} , do teor volumétrico de O_2 no jato de ar que circunda a chama, e da temperatura na chama.

5.1. Distribuição da Concentração da Fuligem ao Longo das Chamas

O estudo da influência dos vários parâmetros na distribuição da concentração de fuligem ao longo do comprimento das chamas está ordenado em termos do teor de O_2 no ar, e da relação entre a velocidade do jato coaxial do ar que circunda a chama e a velocidade do jato de gás: $V_{ar} \leq V_{eg}$ e $V_{ar} \geq V_{eg}$.

5.1.1 Teor de O_2 no Ar = 21% (Ar Atmosférico Puro)

a. $V_{ar} \leq V_{eg}$

Para $V_{ar}/V_{eg} < 1$ o movimento do ar é induzido pelo gás, ou seja, o gás arrasta o ar, sendo o agente que controla o contato entre os fluidos, que é tanto melhor quanto menor a velocidade do ar, até o caso em que $V_{ar} = 0$, tomado como caso de referência. A situação menos propícia em termos de contato oxidante-combustível se dá quando $V_{ar} = V_{eg}$.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam a variação axial da concentração da fuligem ao longo da chama para as potências de 0,72 kW e 1,16 kW, com V_{ar}/V_{eg} iguais a 0; 0,45 (0,42 na maior potência) e 1,0.

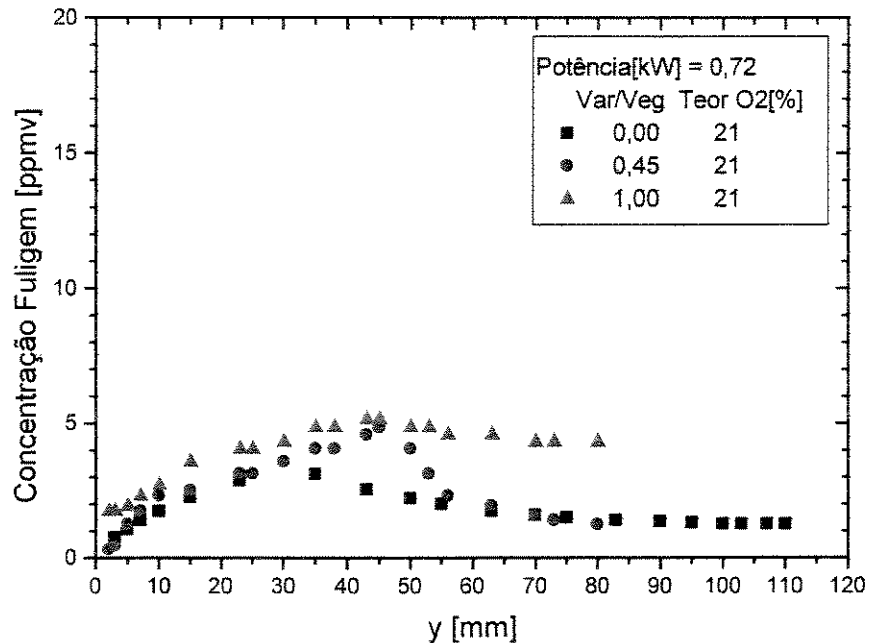


Figura 5.1. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72.

Na Figura 5.1 se constata que a utilização do jato de ar aumentou a concentração da fuligem em relação ao caso base, sendo o aumento maior verificado para o caso de $V_{ar}/V_{eg} = 1,00$. Possivelmente isto se deve ao menor arraste do ar que ocorre neste caso, pois só há difusão de massa, não havendo transferência de quantidade de movimento, devido à igualdade das velocidades dos jato de ar e de combustível. Com o menor arraste, não houve O_2 disponível suficiente para realizar a oxidação da fuligem na região de chama onde ocorre o fenômeno. Já na condição $V_{ar}/V_{eg} = 0,45$, o arraste do ar é intensificado devido à transferência de quantidade de movimento, embora em patamares menores do que no caso base, $V_{ar} = 0$. Nestes casos, portanto, a concentração de fuligem aumenta com o aumento de velocidade do ar.

A influência do aumento de potência pode ser verificado na Figura 5.2. Com o aumento

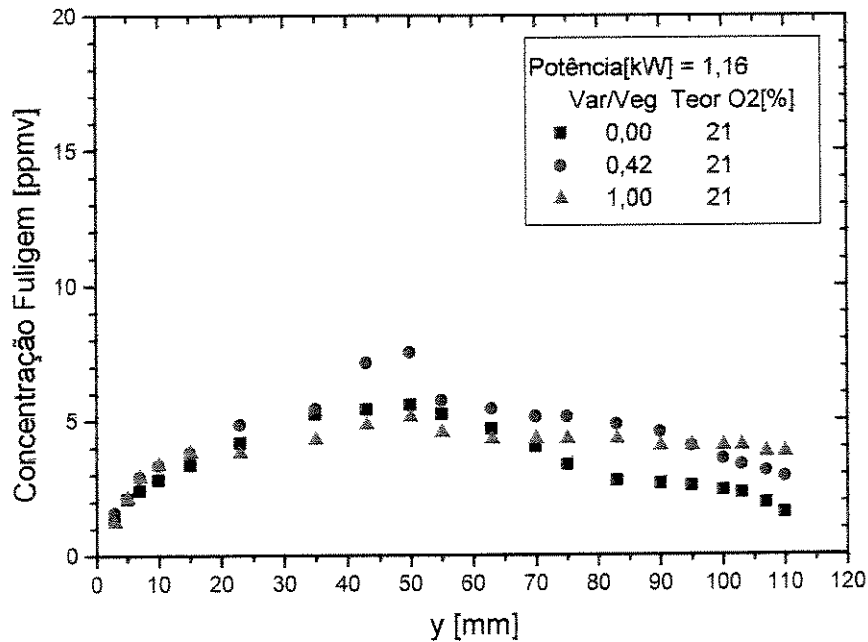


Figura 5.2. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16.

da potência, aumentam, em geral, os níveis de concentração da fuligem. O efeito da temperatura na formação de fuligem se torna predominante em relação ao efeito do arraste de oxidante, pois, com o aumento da temperatura, que vem com o aumento da potência do queimador, há um aumento das taxas de pirólise na zona de formação da fuligem, o que aumenta a taxa de formação de precursores, e, por consequência, a concentração da fuligem.

b. $V_{ar} \geq V_{eg}$

Quando a velocidade do jato de ar é maior do que a do jato de combustível, é o ar quem arrasta o gás.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam a variação axial da concentração da fuligem ao longo da chama para as potências de 0,72 kW e 1,16 kW, as mesmas do caso anterior, com V_{ar}/V_{eg} igual a 0; 1,00 e 3,86.

Com a velocidade do ar maior que a do gás, ocorre um aumento de temperatura na zona de formação da fuligem junto à base do queimador devido ao melhor encontro do O_2 do ar com o combustível, aumentando a taxa de pirólise deste; este aumento provoca uma forte formação de precursores e, em consequência, um aumento intenso da concentração da fuligem, no início da chama. A partir de certa altura, a uma curta distância da base, se observa uma redução da concentração da fuligem, que é marcante para a menor potência. O maior arraste causado pelo

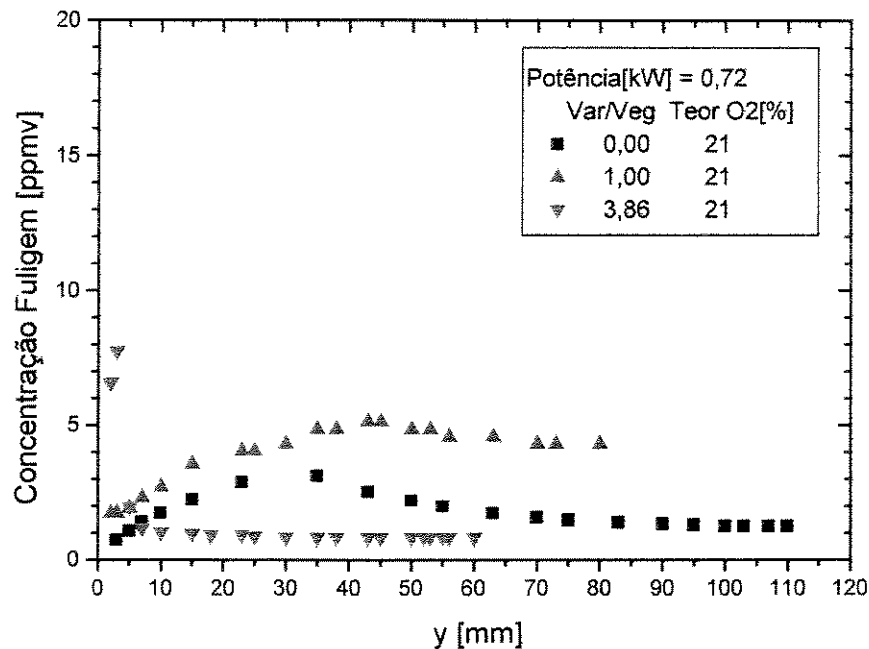


Figura 5.3. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72.

ar gera uma melhor mistura entre ar e gás, o que melhora o processo de oxidação da fuligem, reduzindo os níveis de concentração e, também, causando uma redução do comprimento da chama.

Uma outra possível explicação para a redução da concentração após o pico de fuligem é o efeito da aglomeração. No início da chama há um grande número de partículas e por isso elas conseguem absorver de maneira significativa o sinal de luz utilizado para medir a concentração da fuligem. Deslocando o sinal de luz para uma região mais acima na chama, essas partículas, que começam a se aglomerar, deixam espaços livres na chama através dos quais o sinal de luz pode passar sem ser absorvido. Portanto, a queda marcante da concentração de fuligem após o

valor pico verificada no caso em questão, talvez não seja só o efeito da redução por conta da oxidação, mas, pode ser que o sinal passou pela chama sem ser absorvido. Também podemos imaginar que os dois efeitos podem estar atuando simultaneamente.

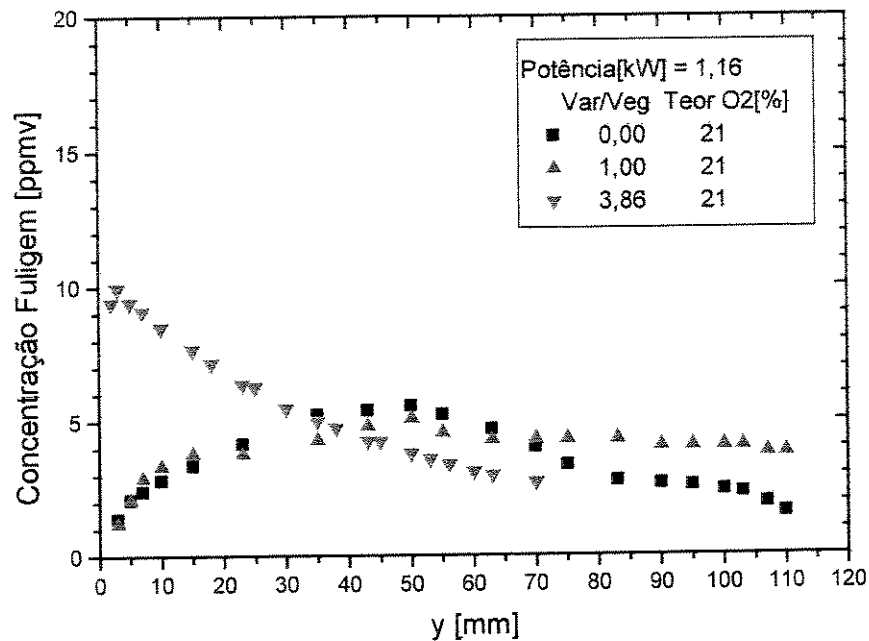


Figura 5.4. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16.

Novamente, o aumento da potência do queimador provoca um aumento da temperatura, que aumenta a pirólise do combustível, a formação da fuligem, e seus níveis de concentração.

As Figuras 5.5 e 5.6 consolidam os dados apresentados da variação axial da concentração da fuligem ao longo da chama para as várias relações de velocidades do jato de ar e de combustível, nas duas potências consideradas. Analisando as duas figuras se verifica que, trabalhando com os jatos de ar de menor velocidade, resulta, em geral, um aumento da concentração de fuligem ao longo da chama, em relação ao caso base, podendo as chamas serem mais curtas, dependendo da potência do queimador.

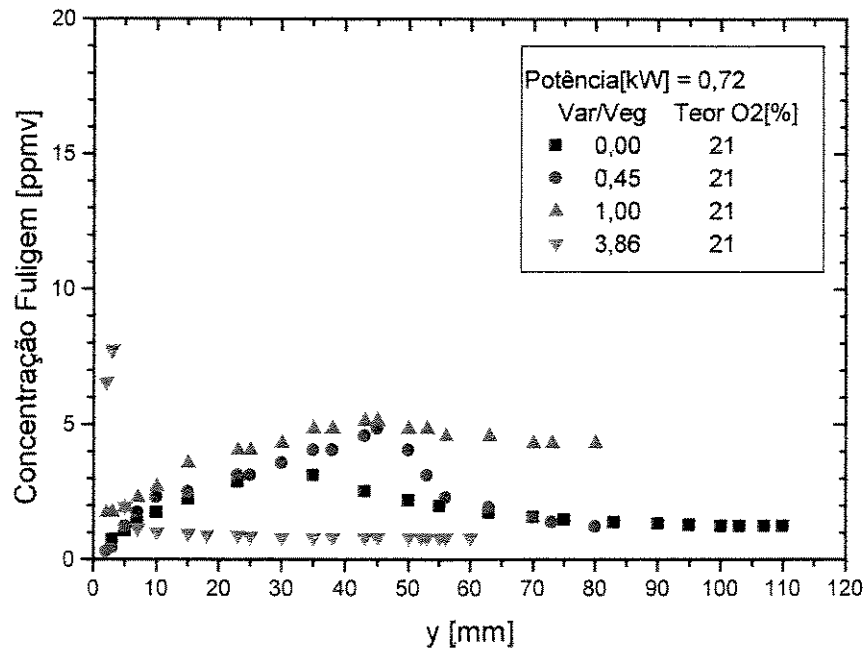


Figura 5.5. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72.

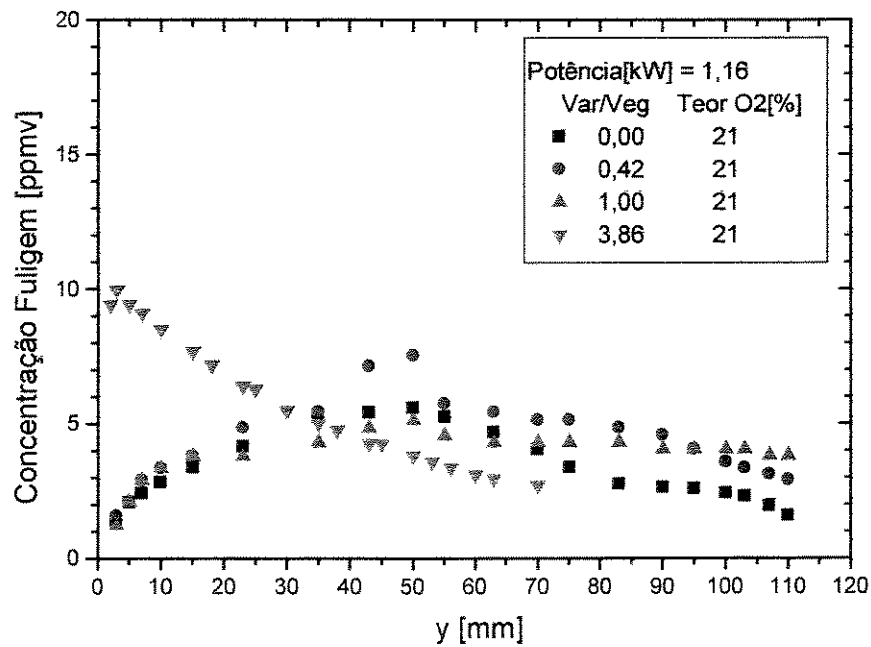


Figura 5.6. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16.

Em chamas com V_{ar}/V_{eg} maiores do que 1,00, há um intenso aumento de produção da fuligem no início da chama, caindo a concentração a valores menores do que no caso base no topo da chama.

Inerente ao aumento de temperatura verificado com o aumento da potência do queimador, em todas as condições analisadas há um aumento dos níveis de concentração da fuligem.

5.1.2. Teor de O_2 no Ar = 23%

b. $V_{ar} \leq V_{eg}$

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam a influência na concentração da fuligem ao longo da chama, do enriquecimento do jato coaxial anular de ar com oxigênio, para as mesmas potências e relações V_{ar} / V_{eg} do caso anterior, em que o ar não era enriquecido. Foi utilizado um nível de enriquecimento de dois por cento ($23\% - 21\% = 2\%$).

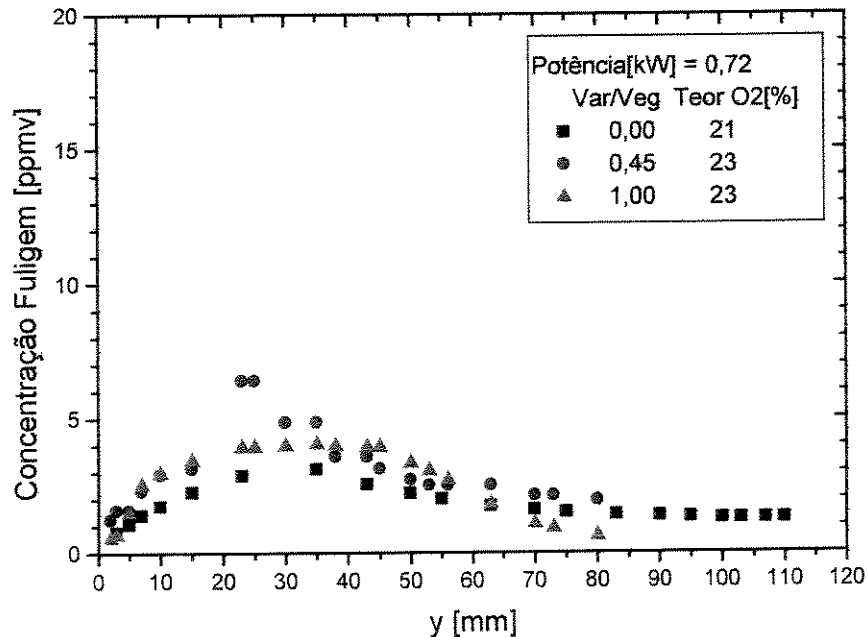


Figura 5.7. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72.

Com o aumento do teor de O_2 para 23% houve uma quantidade maior de O_2 induzido para a zona de formação da fuligem, o que torna o efeito da temperatura dominante, aumentando a pirólise e, conseqüentemente, a produção da fuligem em relação ao caso base.

Na Figura 5.7 podemos verificar que para $V_{ar}/V_{eg} = 0,45$ houve uma maior produção de fuligem do que para $V_{ar}/V_{eg} = 1,00$, o que se deve ao maior arraste de O_2 verificado, o qual, intensificou a produção de fuligem. Também podemos observar que no caso $V_{ar}/V_{eg} = 0,45$ a concentração da fuligem no final da chama é maior que no caso base, o que não ocorreu para $V_{ar}/V_{eg} = 1,00$. O efeito seria devido à maior produção da fuligem, cuja oxidação, mesmo favorecida pelo maior teor de O_2 no ar, não foi suficiente para diminuir a concentração da fuligem nesta zona, ao contrário do ocorrido com $V_{ar}/V_{eg} = 1,00$ no qual foi verificado uma redução em relação ao caso base.

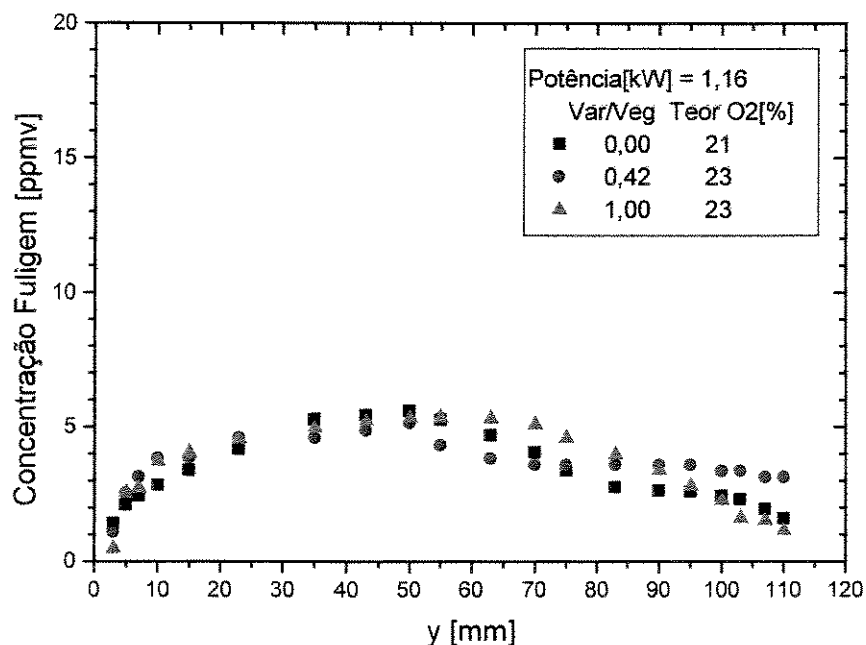


Figura 5.8. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16.

Com o aumento da potência há em geral um aumento da concentração de fuligem, pois os níveis de formação são maiores e sua redução mais difícil, como pode ser visto na Figura 5.8 acima.

A produção de fuligem é intensificada com o aumento do teor de O_2 em relação ao caso base, fato explicado pela mesma argumentação acima.

b. $V_{ar} \geq V_{eg}$

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam os resultados para velocidades do jato de ar maiores do que as do jato de combustível, para as potências de 0,72 e 1,16 kW. Com o aumento da

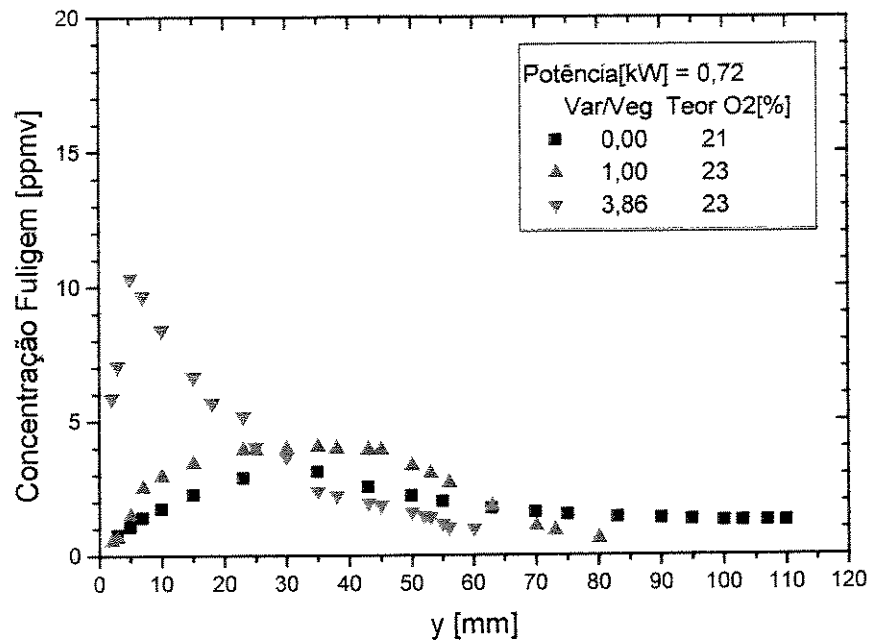


Figura 5.9. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72.

Velocidade do ar novamente se verifica um aumento significativo da concentração de fuligem no início da chama, seguida por uma redução a valores menores do que no caso de referência. O aumento da concentração da fuligem no início da chama se deve à intensa mistura do jato de

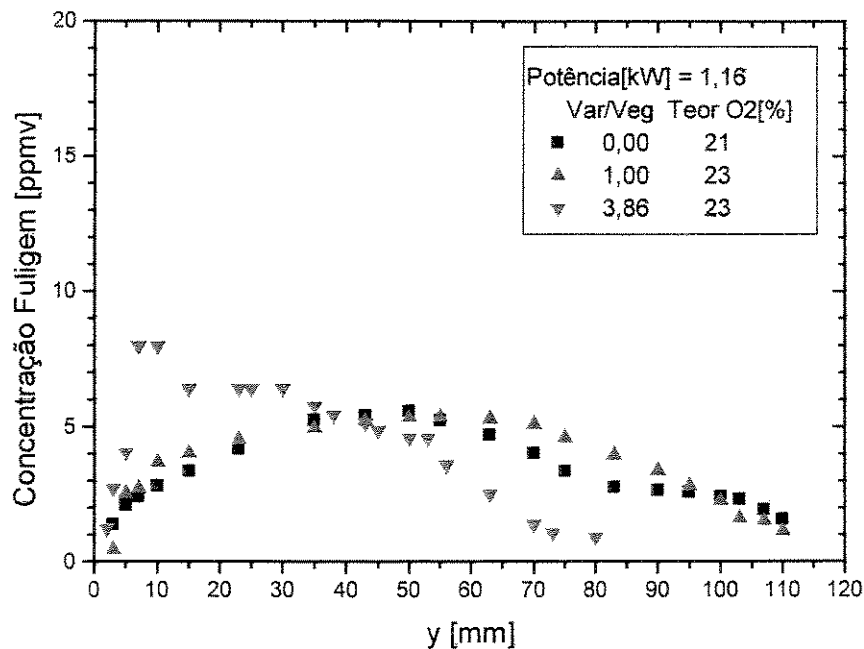


Figura 5.10. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16.

combustível com o O_2 disponível em maior quantidade na zona de formação da fuligem, promovida pelo arraste do gás pelo ar. A redução, por sua vez, se deve à intensa mistura do jato de ar e produtos da combustão, o que favorece a oxidação da fuligem. Esta redução também pode ser efeito da aglomeração das partículas de fuligem, como citado anteriormente em 5.1.1.b.

Com o aumento da potência os níveis de fuligem são maiores.

5.1.3. Teor de O_2 no Ar = 25%

b. $V_{ar} \leq V_{eg}$

As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam os resultados obtidos para o nível de enriquecimento do ar de quatro por cento (25% - 21% = 4%).

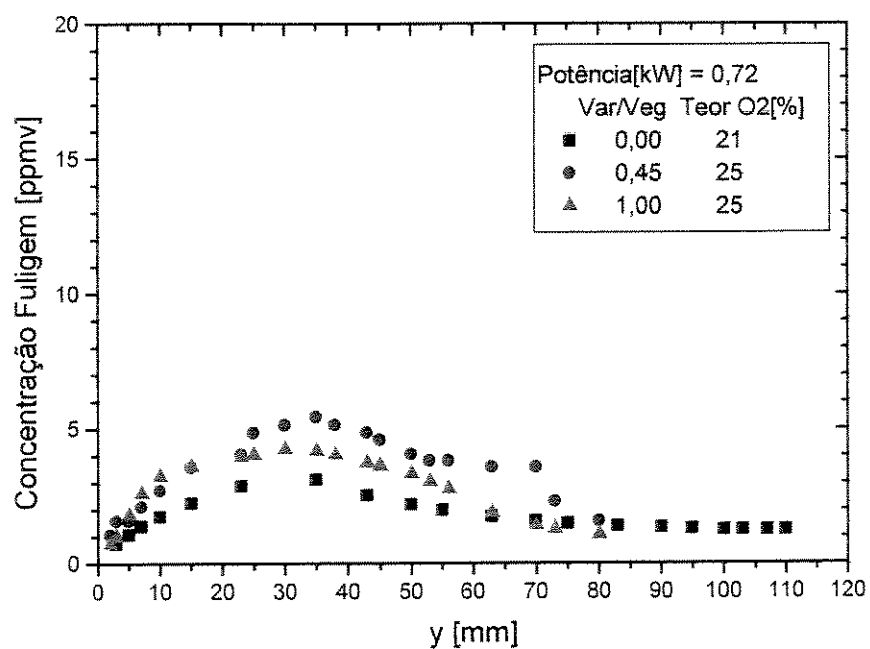


Figura 5.11. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72.

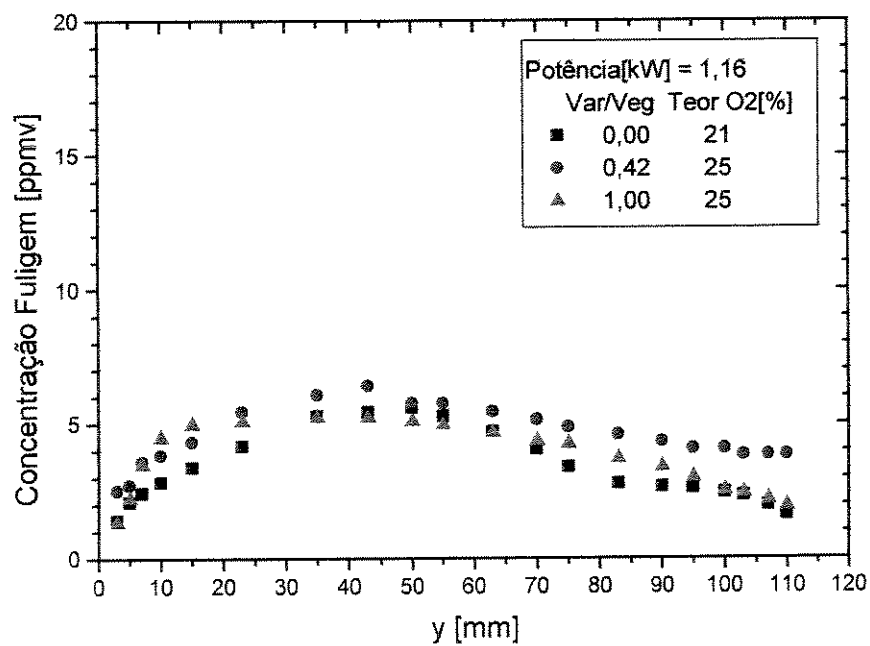


Figura 5.12. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16.

Em todos os casos o aumento do teor de O_2 para 25% intensificou um pouco a produção da fuligem em toda a chama, obtendo-se níveis maiores com a potência maior.

Comparando o enriquecimento de 23% com o de 25%, para os casos com $V_{ar} < V_{eg}$, observa-se que o maior teor de oxigênio intensificou a produção da fuligem, além de promover uma distribuição mais uniforme.

b. $V_{ar} \geq V_{eg}$

No caso dos níveis de velocidade do jato de ar maiores que os do jato de combustível, o maior teor de O_2 intensificou a fenomenologia já observada, com a formação intensa de fuligem no início da chama, redução posterior a níveis inferiores ao do caso base, e encurtamento da chama.

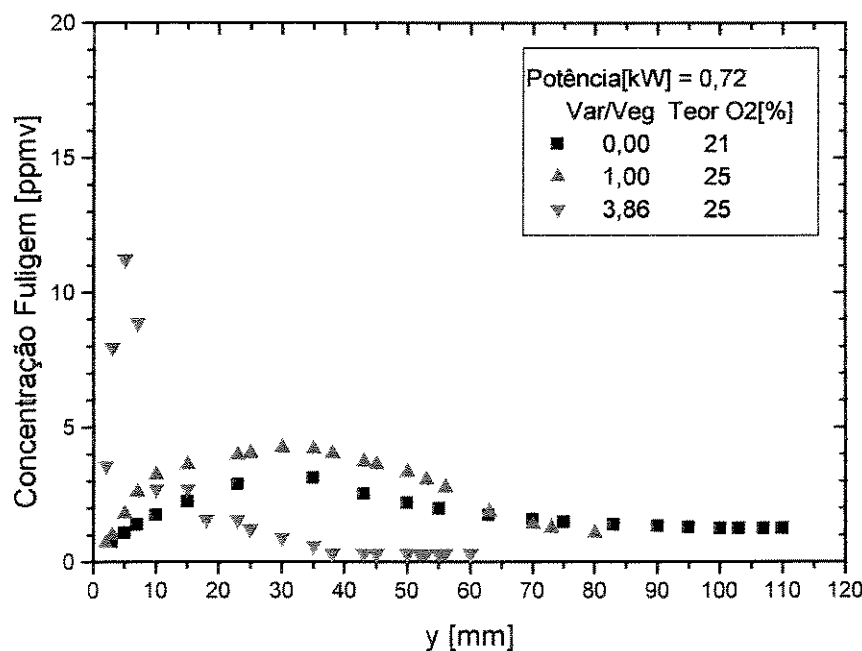


Figura 5.13. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 0,72.

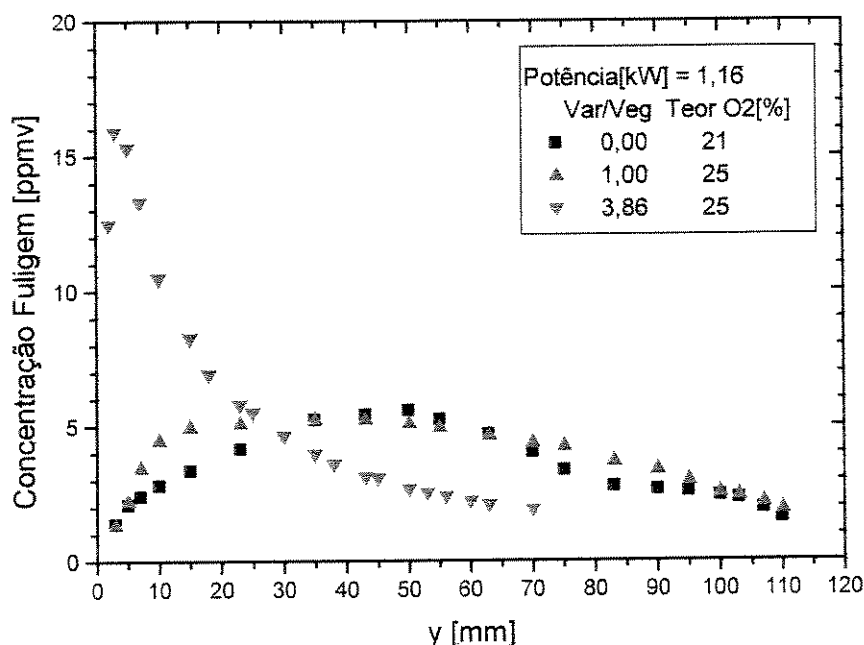


Figura 5.14. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16.

Novamente, a redução da fuligem se deveria a uma maior eficiência do processo de oxidação causada pela melhor mistura verificada nesses níveis de velocidade e pelo maior teor de O_2 no ar. A redução também poderia ser efeito da aglomeração das partículas de fuligem.

As Figuras 5.15 e 5.16, e 5.17 e 5.18, consolidam os dados já apresentados da variação axial da concentração da fuligem ao longo da chama para as várias relações de velocidades do jato de ar e de combustível, nas duas potências consideradas, para os dois conjuntos de testes com enriquecimento do ar, ou seja, com 23 e 25% de oxigênio, respectivamente. Analisando as figuras se verifica que, trabalhando com os jatos de ar de menor velocidade, resulta, em geral, um aumento da concentração de fuligem ao longo da chama, em relação ao caso base, podendo as chamas serem mais curtas, dependendo da potência do queimador.

Observa-se, também, que o aumento da potência não causa um crescimento significativo da concentração da fuligem para o caso de $V_{ar}/V_{eg} = 1$, pois, se por um lado, o um aumento da potência causa um aumento da temperatura que resulta numa maior produção da fuligem, por

outro lado, a maior velocidade do jato de combustível reduz o tempo de residência na chama da partícula de fuligem formada, impedindo o seu crescimento adicional facilitando sua oxidação.

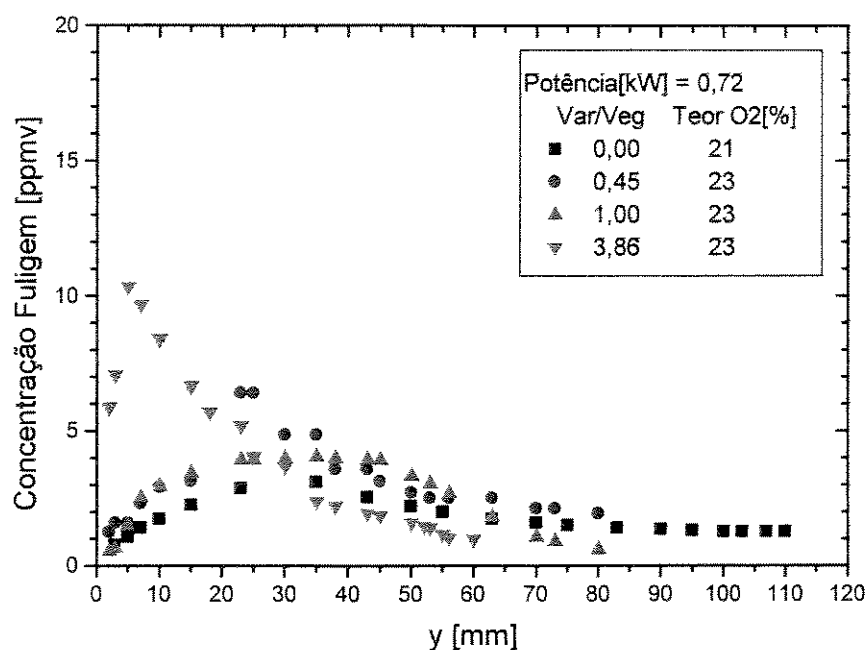


Figura 5.15. Variação Axial da Concentração da Fuligem
Teor O₂ = 23% e Potência = 0,72 kW.

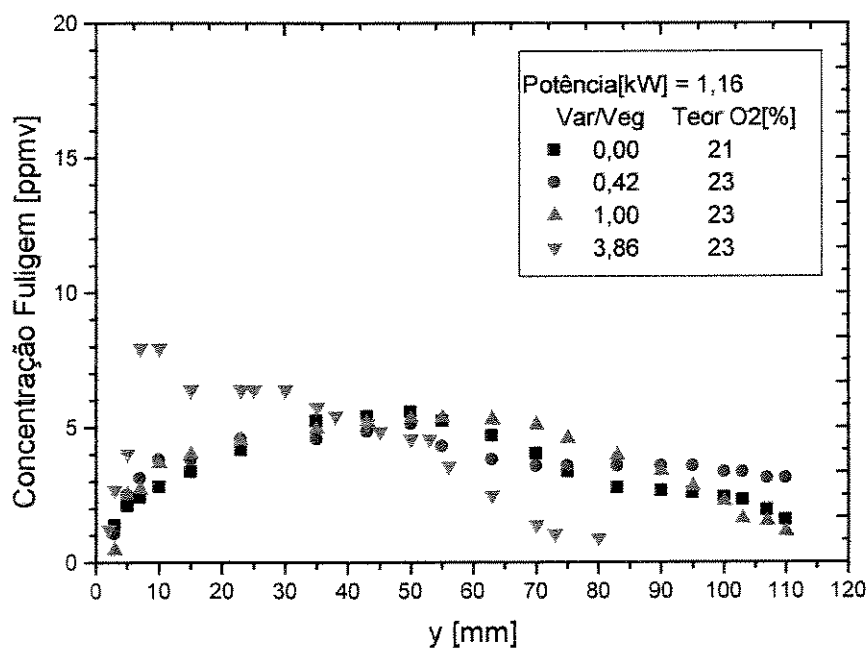


Figura 5.16. Variação Axial da Concentração da Fuligem

Teor O₂ = 23% e Potência = 1,16 kW.

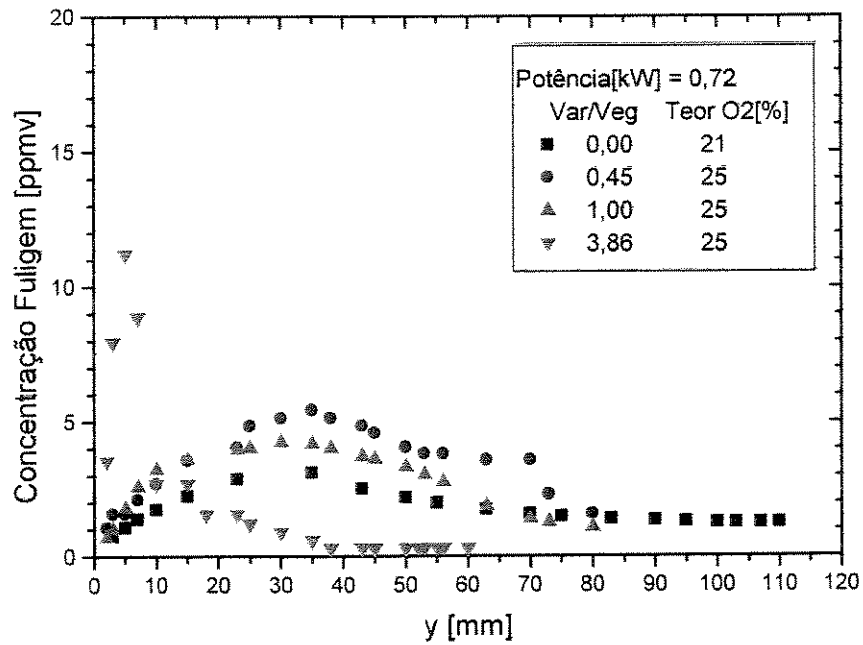


Figura 5.17. Variação Axial da Concentração da Fuligem

Teor O₂ = 25% e Potência = 0,72 kW.

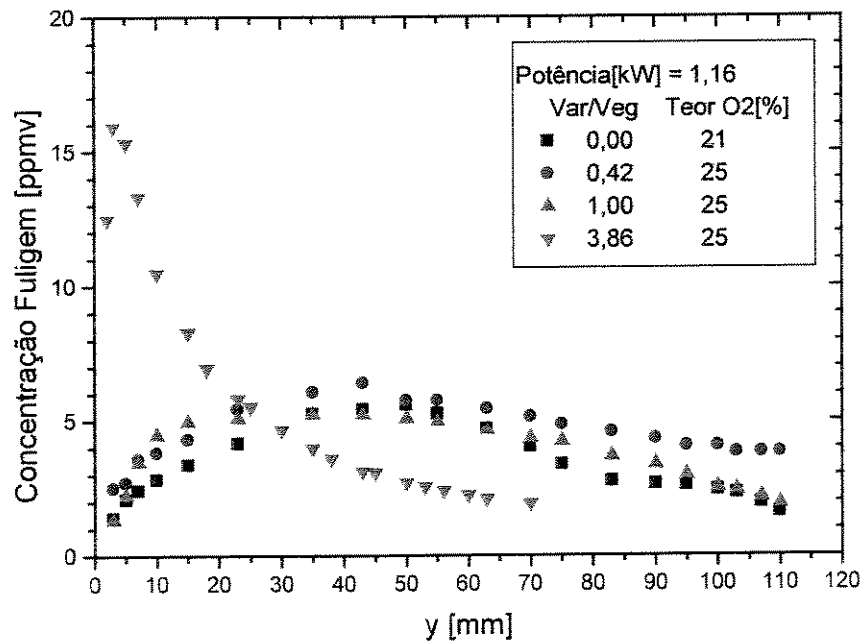


Figura 5.18. Variação Axial da Concentração da Fuligem

Teor $O_2 = 25\%$ e Potência = 1,16 kW.

Nas chamas com V_{ar}/V_{eg} maiores do que 1,00, há um aumento significativo da produção de fuligem no início da chama, o que pode ser interessante em termos de melhor transferência de calor por radiação da chama, sem aumentar a emissão de fuligem para o meio ambiente. A redução da concentração ao longo da chama é mais intensa nas chamas com teor de O_2 de 25%.

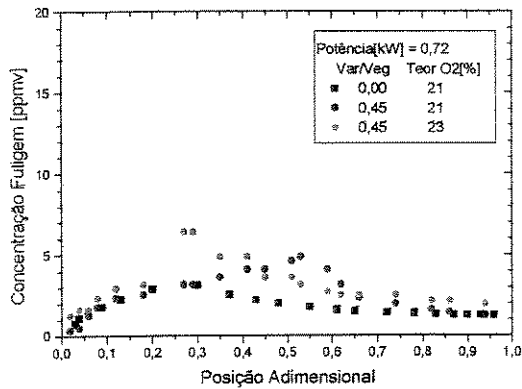
No Apêndice A são apresentados resultados obtidos para $V_{ar} = 2,36 V_{eg}$, que exibem características semelhantes a $V_{ar} = 3,86 V_{eg}$, e que complementam a informação disponível na faixa de velocidades em que $V_{ar} > V_{eg}$.

5.1.4. Efeito do Teor de O_2 no Ar Enriquecido

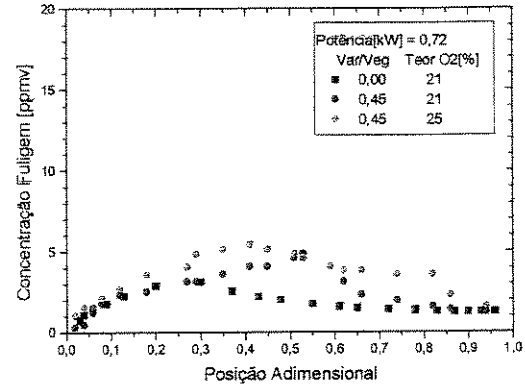
O efeito do teor de oxigênio no ar enriquecido pode ser mais facilmente apreciado nas duas figuras a seguir, Figuras 5.19 e 5.20, nas quais se compara diretamente testes com mesma velocidade e potência do queimador, com 23 ou 25% de oxigênio, em relação aos testes com ar não enriquecido, em repouso ou não. A ordenada que dá a posição ao longo da chama está adimensionalizada em termos do comprimento visível da chama, o que dá, em certa medida, uma correspondência entre as regiões da chama.

a. $V_{ar} < V_{eg}$

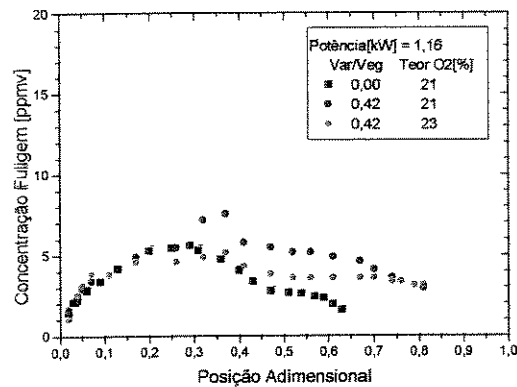
A Figura 5.19 apresenta os resultados para a condição de $V_{ar}/V_{eg} = 0,45$, com potência de 0,72kW nas figuras a. e b. e 1,16 kW nas figuras c. e d.



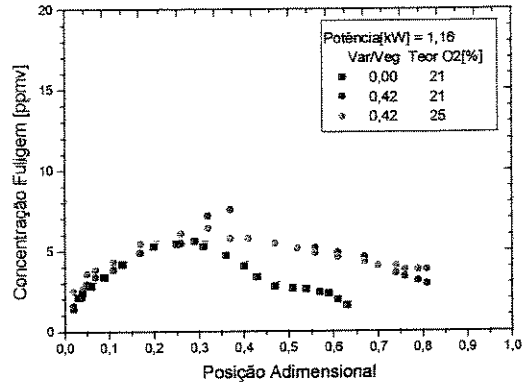
a. Potência = 0,72 kW e Teor O₂ = 21
e 23%.



b. Potência = 0,72 kW e Teor O₂ = 21
e 25%.



c. Potência = 1,16 kW e Teor O₂ = 21
e 23%.



d. Potência = 1,16 kW e Teor O₂ = 21
e 25%.

Figura 5.19 - Concentração da Fuligem versus Posição na Chama

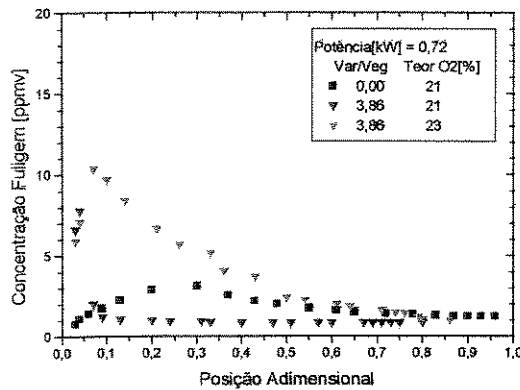
$$V_{ar}/V_{eg} = 0 \text{ e } 0,45.$$

Pode-se verificar que o enriquecimento com O₂ aumentou a concentração da fuligem ao longo da chama em comparação ao caso base, com ar não enriquecido e em repouso, bem como para o caso de ar não enriquecido e na mesma velocidade. O efeito foi melhor observado para a condição de 25%. Também se constatou que apenas a movimentação do ar já provoca um aumento da formação da fuligem em relação ao caso base; o que é explicado pelo menor arraste do ar causado pela chama nesta condição.

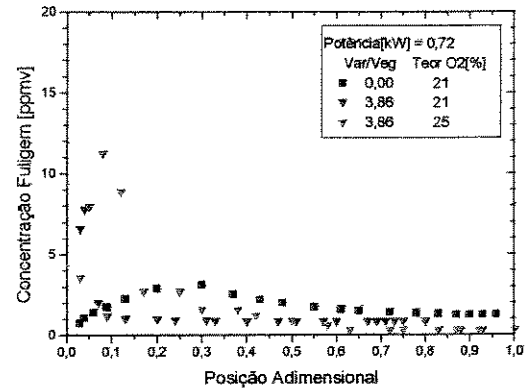
Com o aumento da potência para 1,16kW, quando enriquecemos a chama com O_2 , verificamos que para a condição de 23% houve um aumento em relação ao caso base, mas, este aumento verificado não foi maior do que para ar não enriquecido escoando na mesma velocidade. Possivelmente isto se deve as diferentes sensibilidades ao enriquecimento das zonas de formação e oxidação da fuligem, onde, a competição entre esses dois fenômenos estabeleceriam os níveis de concentração verificados.

b. $V_{ar} > V_{eg}$

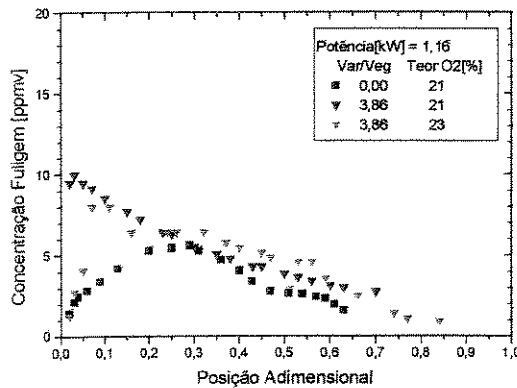
A Figura 5.20 apresenta os resultados para a condição de $Var/Veg = 3,86$, com potência de 0,72kW nas figuras a. e b. e 1,16 kW nas figuras c. e d.



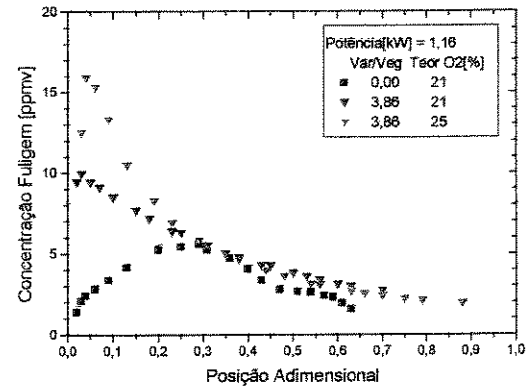
a. Potência = 0,72 kW e Teor $O_2 = 21$ e 23%.



b. Potência = 0,72 kW e Teor $O_2 = 21$ e 25%.



c. Potência = 1,16 kW e Teor $O_2 = 21$ e 23%.



d. Potência = 1,16 kW e Teor $O_2 = 21$ e 25%.

Figura 5.20 - Concentração da Fuligem versus Posição na Chama

$$V_{ar}/V_{eg} = 0 \text{ e } 3,86.$$

Observa-se neste nível de velocidade do ar que há um intenso aumento da concentração de fuligem no início da chama, para todas as condições de escoamento forçado de ar testadas, i. é., para ar não enriquecido e para o ar com 23 e 25% de O_2 . Os níveis de concentração da fuligem são maiores para as condições de ar enriquecido – aumentando com o teor de oxigênio –, o que seria devido à intensa mistura entre combustível e O_2 , a qual aumenta a taxa de pirólise e, em consequência, a formação da fuligem. Esta fuligem formada é, por sua vez, reduzida pelo processo de oxidação, que também é intensificado pelo enriquecimento.

Com o aumento da potência verifica-se um aumento da formação da fuligem; este fato poderia ser explicado pela maior temperatura decorrente da potência.

5.2. Conteúdo Integrado de Fuligem na Chama

O conteúdo integrado de fuligem na chama consolida o efeito global dos fenômenos que ocorrem nas regiões de formação e oxidação da fuligem. Ele foi estimado neste trabalho pela integração da concentração de fuligem ao longo do eixo da chama.

As Figuras 5.21 – 5.24 mostram gráficos da variação do conteúdo integrado de fuligem em função da potência do queimador para ar com 21% (ar não enriquecido), 23 e 25%, com $V_{ar} = 0,10; 0,15; 0,85 \text{ e } 1,39 \text{ m/s}$. Note-se que a cada potência corresponde um valor de V_{eg} .

Podemos observar que, em geral, o conteúdo de fuligem aumenta com a potência, para um dado teor de oxigênio do ar, em todos os casos examinados, e que a taxa de crescimento aumenta com a diminuição da velocidade do ar.

Observa-se, também, que os valores do conteúdo integrado de fuligem se reduzem para as condições em que $V_{ar}/V_{eg} > 1$ relativamente a $V_{ar}/V_{eg} < 1$. A melhor mistura verificada nas velocidades mais altas seria o fator determinante para que isto aconteça.

5.2.1. $V_{ar} < V_{eg}$

As Figuras 5.21 e 5.22 trazem a variação do conteúdo de fuligem da chama para $V_{ar} = 0,10$ e $0,15$ m/s.

Podemos verificar que os níveis de concentração são maiores na velocidade $V_{ar} = 0,15$ m/s do que em $0,10$ m/s, o que seria devido ao menor arraste de O_2 no caso de $V_{ar} = 0,15$ m/s.

Observa-se na Figura 5.21 que o enriquecimento do jato de ar com O_2 causou um aumento do conteúdo de fuligem na maioria das potências em relação ao caso do jato de ar não enriquecido, uma condição que é mais evidente para o teor de 25%. Os valores relativos das curvas dependem da sensibilidade aos efeitos de arraste de oxigênio e de temperatura nas regiões de formação e oxidação da fuligem.

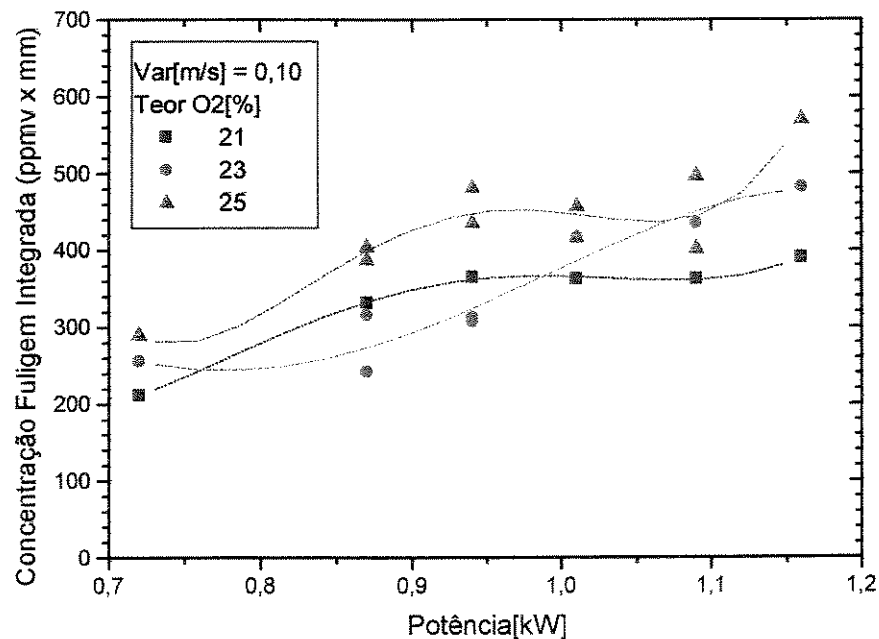


Figura 5.21. Conteúdo Integrado de Fuligem versus Potência

$V_{ar} = 0,10$ m/s

Na Figura 5.22 podemos observar que na condição de 23% a produção da fuligem chega a patamares que em algumas potências ultrapassam os níveis de fuligem da condição de 25%. Isto ocorreria devido a um processo de oxidação mais efetivo da fuligem em algumas potências na condição de 25%. Nas potências maiores onde este efeito não ocorre, a produção da fuligem no início da chama pode ter sido mais elevada, o que aumentaria os conteúdos integrais da fuligem.

Como no caso anterior, verifica-se que um queimador com menores níveis de fuligem é obtido com o uso do ar sem enriquecimento, enquanto, para um queimador operando com ar enriquecido os níveis de enriquecimento utilizados dependerão da potência de trabalho.

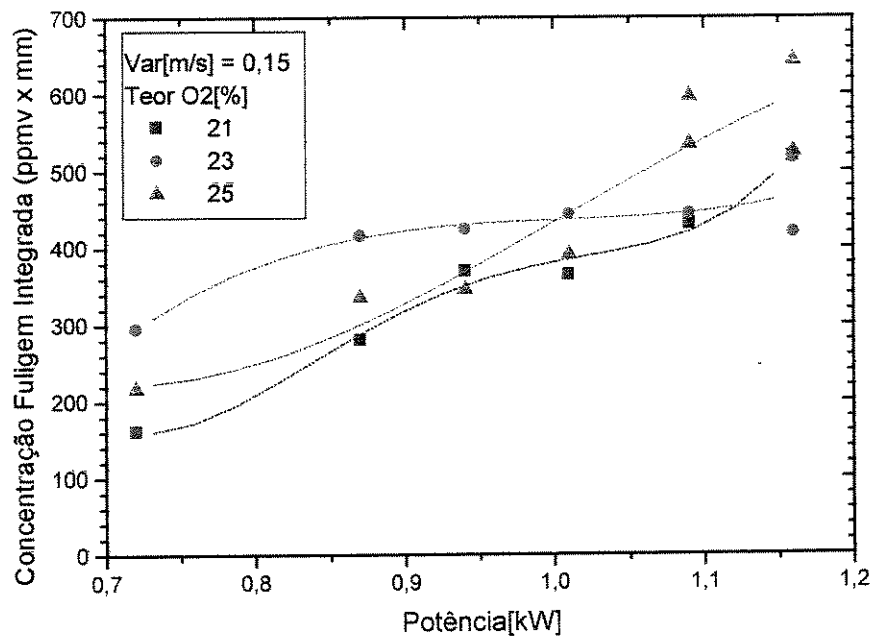


Figura 5.22. Conteúdo Integrado da Fuligem versus Potência
Var = 0,15 m/s

5.2.2. $V_{ar} > V_{eg}$

As Figuras 5.23 e 5.24 trazem a variação do conteúdo de fuligem da chama para $V_{ar} = 0,85$ e 1,39 m/s.

Na Figura 5.23 vemos que o aumento do teor de O_2 começa a ter papéis antagônicos a depender do nível utilizado. Para a condição de 23%, o nível de concentração integrada é maior do que na condição de jato de ar não enriquecido (21%). Já na condição de 25%, os níveis de concentração são menores do que para 21% nas potências mais elevadas. O fato ocorreria devido a melhor mistura entre os jatos de ar e de combustível provocada pelas velocidades mais elevadas que, na condição de 23% induziu uma produção maior de fuligem, enquanto a maior disponibilidade de oxigênio da condição de 25%, tornou dominante o efeito da oxidação, o que provocou a redução dos níveis.

Assim, a utilização do queimador num projeto em que se deseja níveis integrais reduzidos de fuligem deve ser feita com o enriquecimento a 25%, pois os níveis de conteúdo são menores nas potências mais elevadas, e próximos aos níveis produzidos na condição de 21%, que origina o mínimo de fuligem nas demais potências.

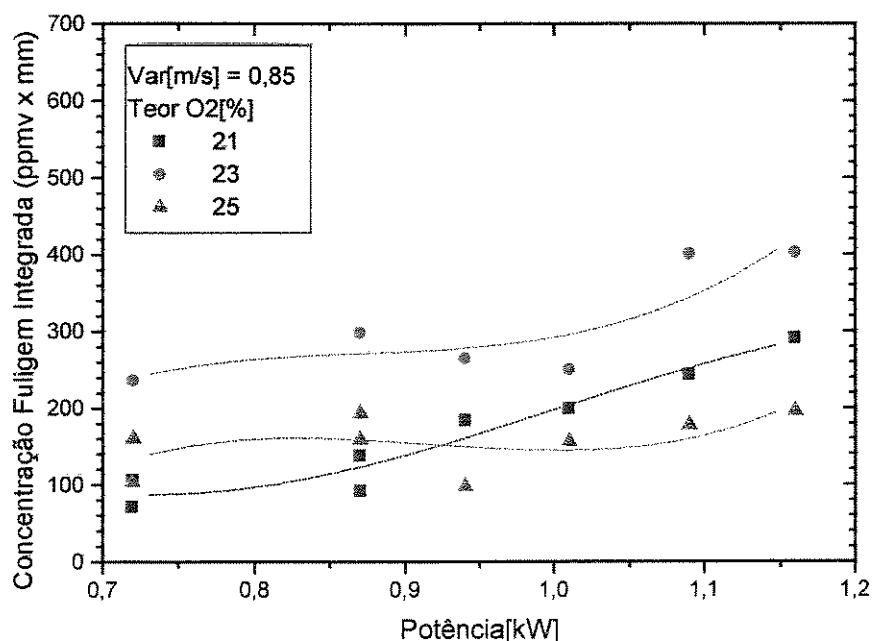


Figura 5.23. Conteúdo Integrado da Fuligem versus Potência

Var = 0,85 m/s

Na Figura 5.24 vemos que com V_{ar} mais elevados, o enriquecimento diminuiu os níveis do conteúdo integrado de fuligem em relação aos casos anteriores, pois houve uma melhor mistura dos jatos de ar e de combustível, sendo que nesta situação, a oxidação provocada predominou sobre a pirólise, ou seja, sobre a geração de fuligem. Os níveis de fuligem estabelecidos foram bastante próximos à condição de 21%, tendendo a uma superposição de todas as curvas. O efeito da velocidade do jato de ar é preponderante sobre o enriquecimento do ar, deixando de justificar a adição de oxigênio para efeito de controle da fuligem

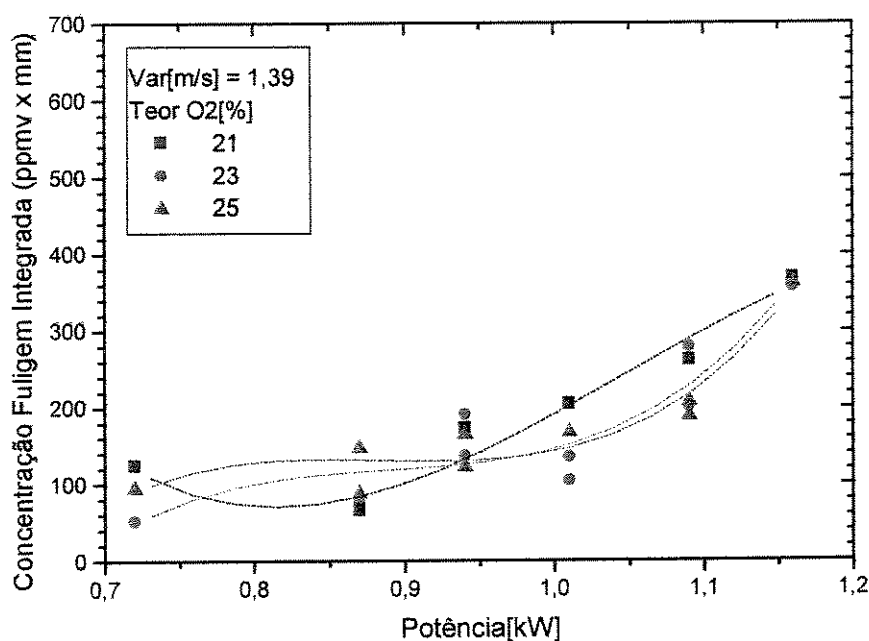


Figura 5.24. Conteúdo Integrado da Fuligem versus Potência
 $V_{ar} = 1,39 \text{ m/s}$

5.3. Distribuição de Temperatura nas Chamas

5.3.1 Distribuição de Temperatura ao Longo do Eixo das Chamas

As Figuras 5.25 – 5.28 apresentam os perfis de temperatura ao longo do eixo das chamas e os correspondentes perfis de concentração da fuligem, para as potências de 0,72 e 1,16 kW, jato de ar não enriquecido e com 23 e 25% de oxigênio, e com as velocidades $V_{ar} = 0,45 V_{eg}$ (e 0,42

V_{eg}) e $3,86 V_{eg}$. São mantidos para referência os perfis correspondentes a ar não enriquecido e em repouso.

Observe-se que os valores de temperatura apresentados são apenas indicativos das temperaturas reais das chamas, já que, as leituras efetuadas são influenciadas pelo acúmulo de fuligem no termopar. Podemos também mencionar a incerteza quanto ao valor da emissividade da fuligem como um outro fator que dificulta a execução das correções de temperatura necessárias devido as perdas de calor inerentes ao processo de leitura do termopar. Estas incertezas também foram comentadas por McEnally e Pfefferle, 1998 e Melton *et al.*, 2000. O Apêndice B da dissertação traz considerações sobre a leitura das temperaturas apresentadas.

a. $V_{ar} < V_{eg}$

As Figura 5.25 e 5.26 apresentam os resultados para as potências de 0,72 e 1,16 kW, respectivamente.

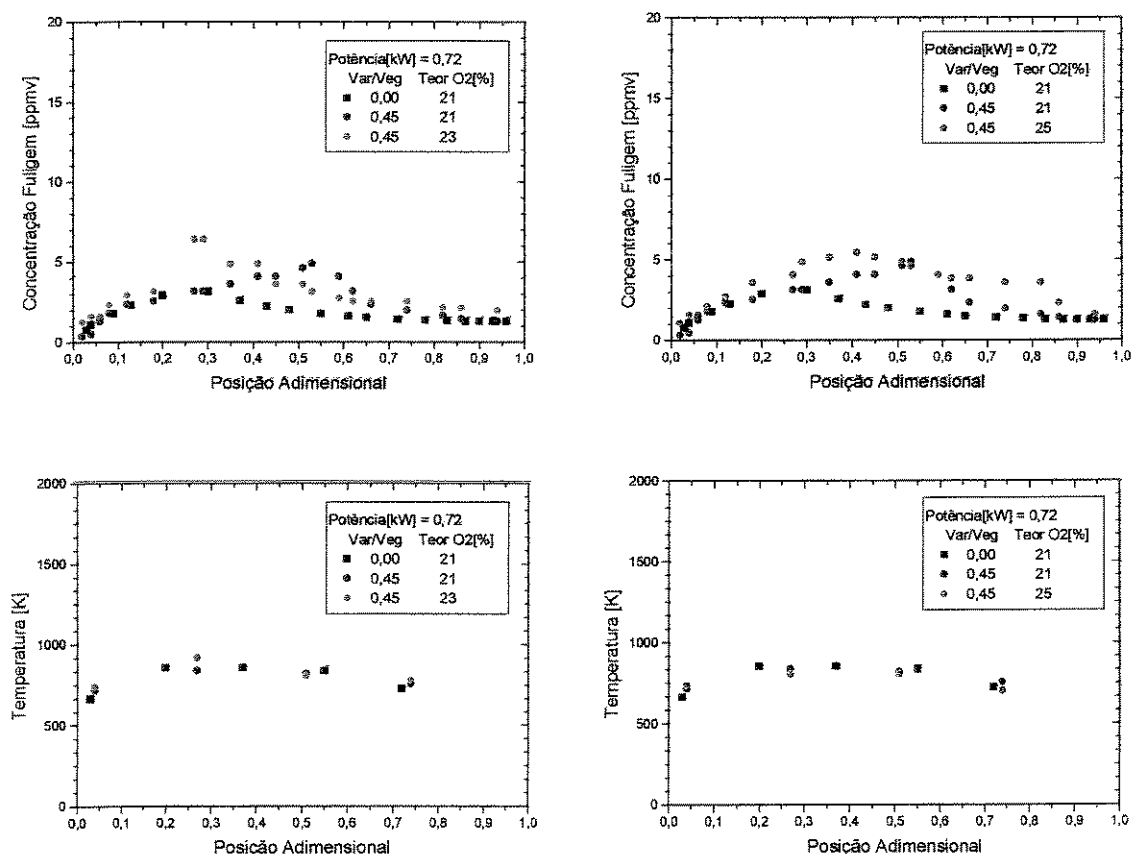


Figura 5.25. Concentração da Fuligem e Temperatura ao Longo da Chama
Potência = 0,72 kW; Ensaios com $V_{ar}/V_{eg} = 0,45$; Teor $O_2 = 21, 23$ e 25%.

Podemos observar nessas figuras que, para o nível de velocidades estudado, os perfis de temperatura são praticamente uniformes e com o mesmo valor. Também se observa que o aumento de temperatura no início da chama, nas chamas com ar enriquecido, ocasionou um aumento de concentração da fuligem em relação ao caso base nesta região. Ao longo da chama, o aumento da concentração, e consequente acúmulo de fuligem no termopar, interferiu na leitura da temperatura, por conta da resistência de condução gerada pelo acúmulo da fuligem. Com isso, as temperaturas das chamas enriquecidas com O_2 , que deveriam ter valores maiores, foram, em geral, menores ou iguais aos valores das chamas não enriquecidas.

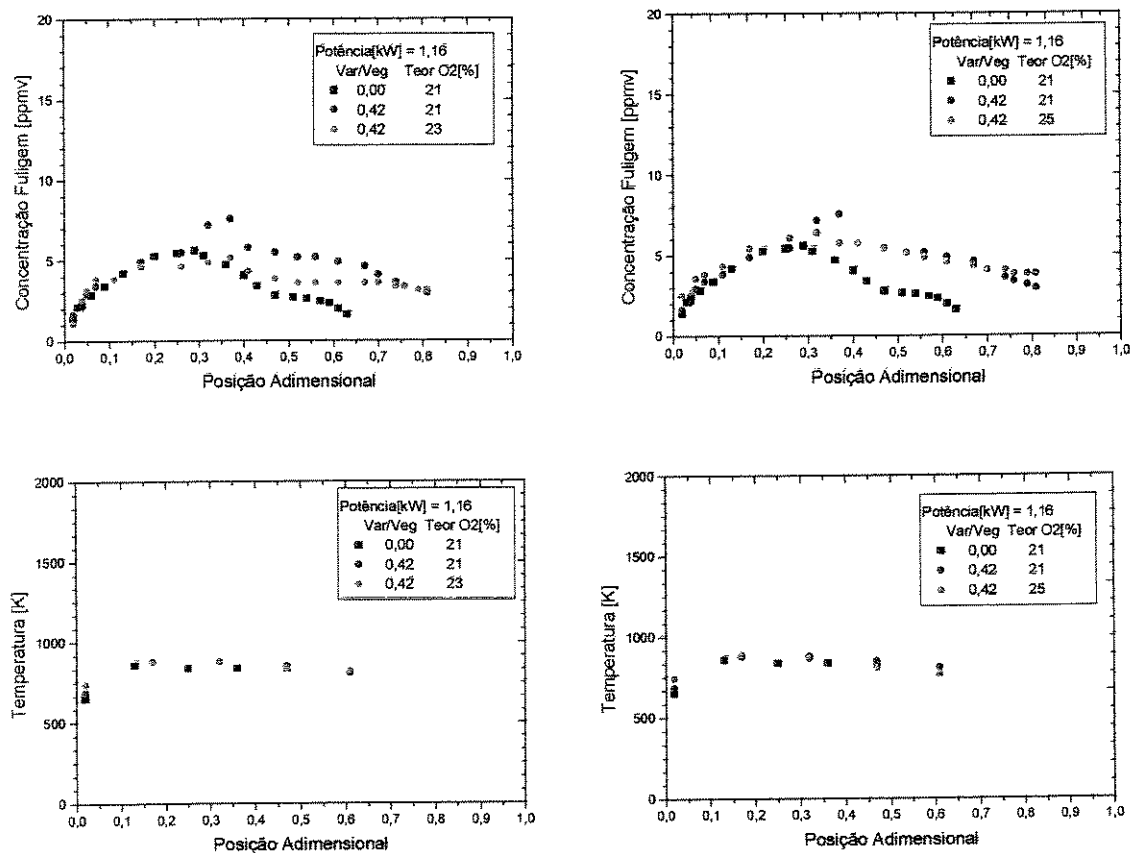


Figura 5.26. Concentração da Fuligem e Temperatura ao Longo da Chama
Potência = 1,16 kW; Ensaios com $V_{ar}/V_{eg} = 0,45$; Teor $O_2 = 21, 23$ e 25%.

b. $V_{ar} > V_{eg}$

As Figuras 5.27 e 5.28 apresentam os resultados para as potências 0,72 e 1,16 kW respectivamente.

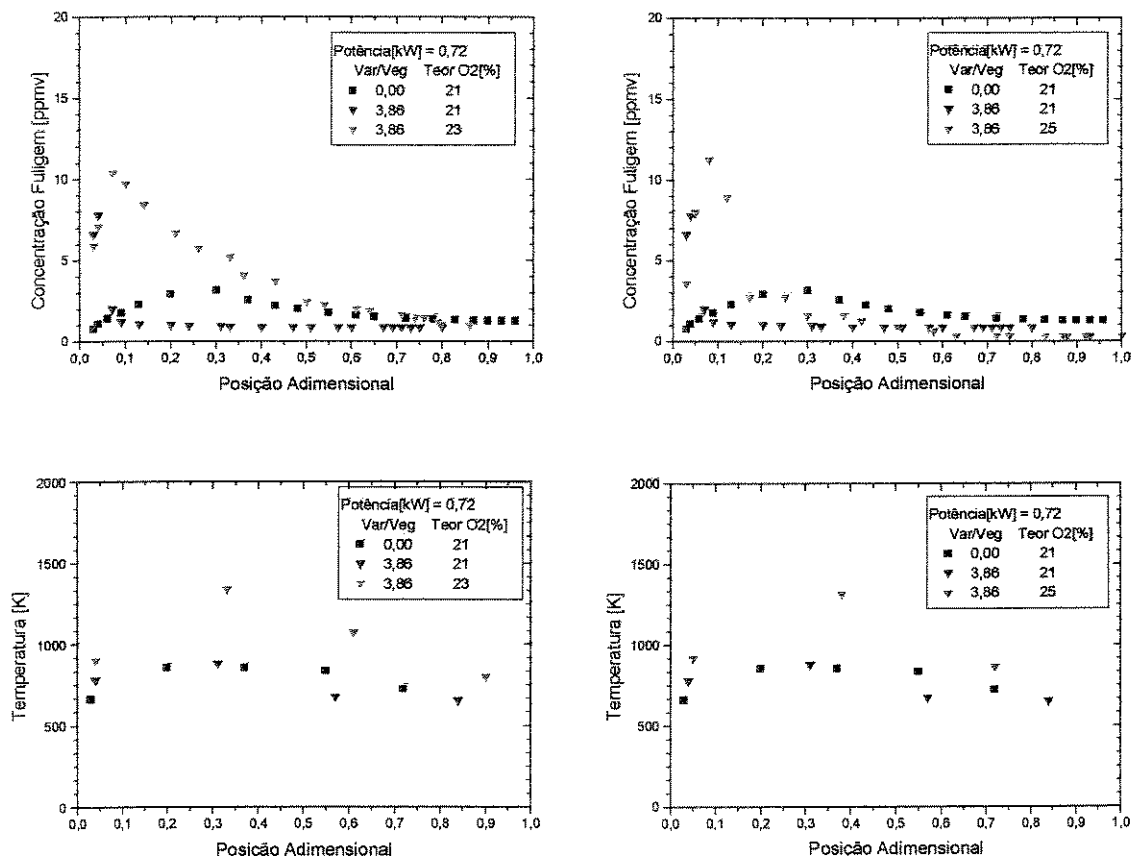


Figura 5.27. Concentração da Fuligem e Temperatura ao Longo da Chama

Potência = 0,72 kW; Ensaio com $V_{ar}/V_{eg} = 3,86$; $Teor O_2 = 21, 23$ e 25% .

Podemos observar nessas figuras que as chamas com ar enriquecido apresentam temperaturas maiores do que as demais. Na região inicial dessas chamas, onde ocorre uma intensa formação da fuligem os níveis de temperatura seriam, possivelmente, maiores do que no caso base e no caso do jato de ar não enriquecido – uma maior temperatura na zona de formação acarreta numa maior formação da fuligem – todavia, os patamares de temperatura são muito semelhantes. A redução da temperatura lida seria decorrente do acúmulo de fuligem no termopar.

Ao longo da chama, as diferenças entre as temperaturas lidas nas condições estudadas se expandem, pois as concentrações de fuligem caíram para níveis mais baixos.

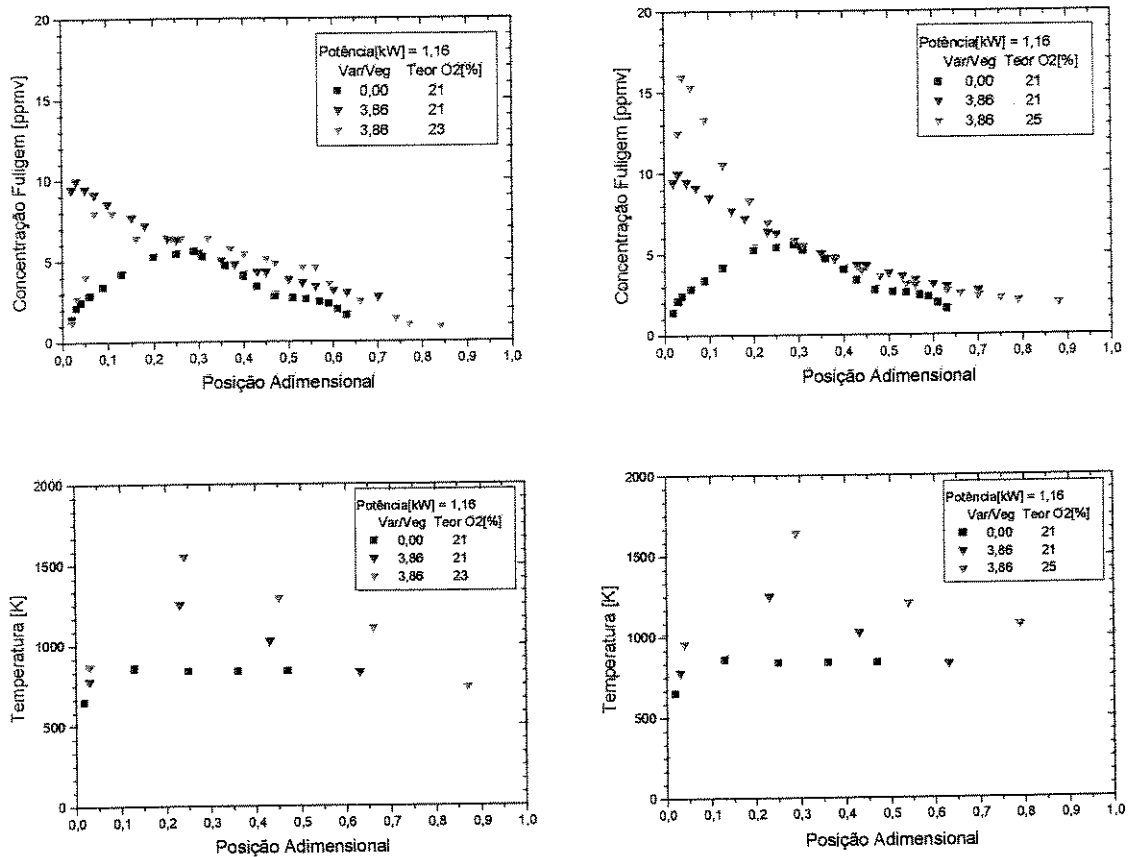


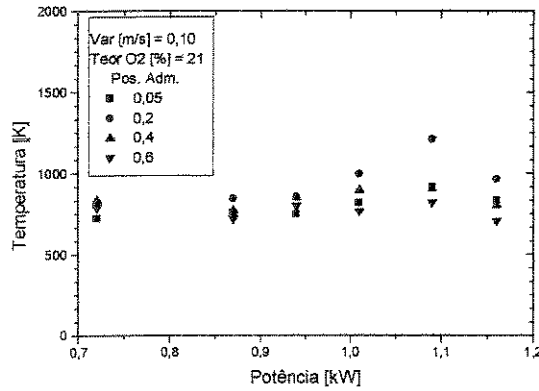
Figura 5.28. Concentração da Fuligem e Temperatura ao Longo da Chama
Potência = 1,16 kW; Ensaios com $V_{ar}/V_{eg} = 3,86$; Teor O₂ = 21, 23 e 25%.

5.3.2. Temperatura em Função da Potência do Queimador

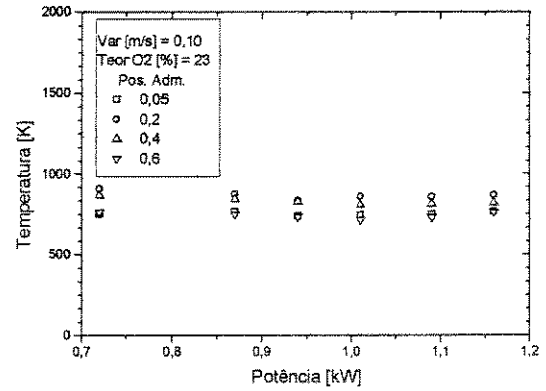
As Figuras 5.29 – 5.32 detalham o efeito da potência do queimador sobre a temperatura da chama, para jatos de ar não enriquecido e enriquecido – no caso com 23% de oxigênio, nas velocidades de 0,10; 0,15; 0,85 e 1,39 m/s.

a. $V_{ar} < V_{eg}$

Podemos observar que, nas condições avaliadas, as chamas são praticamente isotérmicas e que as temperaturas nas posições relativas praticamente não variam com o aumento da potência.

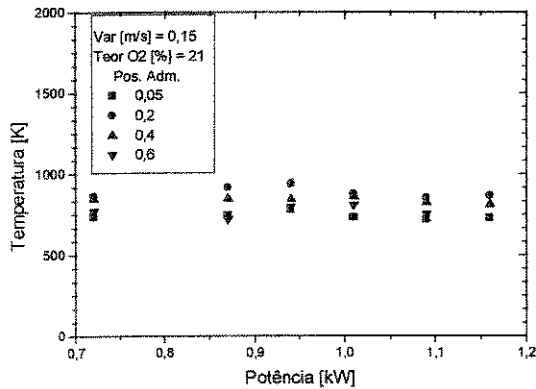


a. Teor de $O_2 = 21\%$.

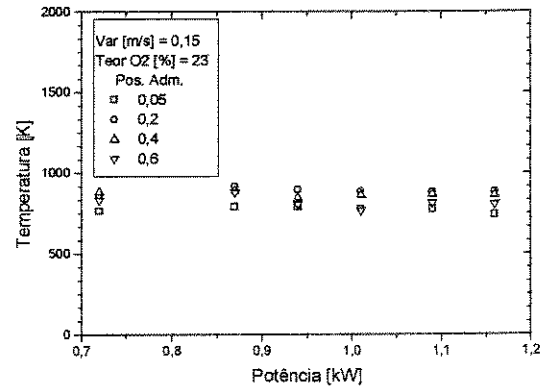


b. Teor de $O_2 = 23\%$.

Figura 5.29. Temperatura versus Potência para $Var = 0,10$ m/s.



a. Teor de $O_2 = 21\%$.



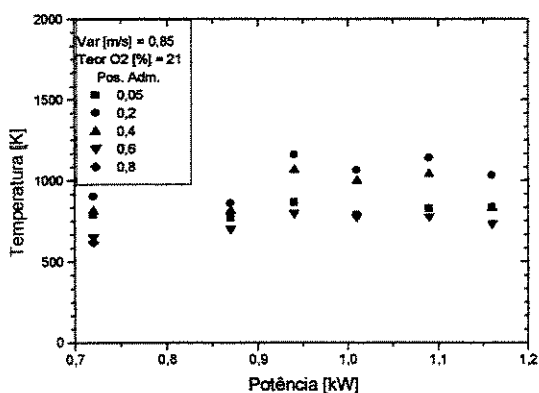
b. Teor de $O_2 = 23\%$.

Figura 5.30. Temperatura versus Potência para $Var = 0,15$ m/s.

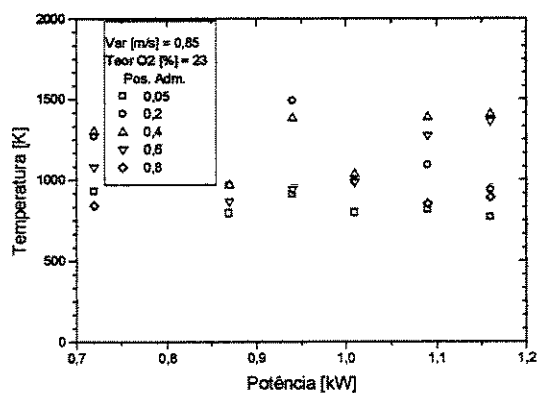
b. $V_{ar} > V_{eg}$

Avaliando as Figuras 5.31 e 5.32, podemos conferir que para as condições $V_{ar}/V_{eg} > 1$, as chamas não são isotérmicas. Com o aumento do teor de O_2 aumenta a não-isotermicidade das

chamas, e são atingidos valores mais elevados de temperatura. O aumento da potência também traz, em geral, efeitos semelhantes.

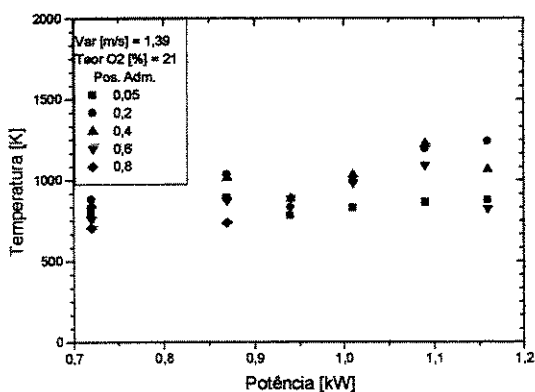


a. Teor de O₂ = 21%.

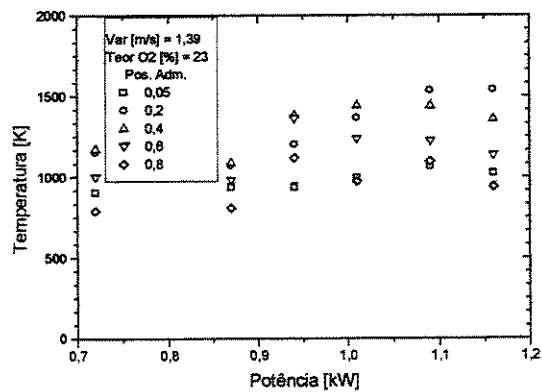


b. Teor de O₂ = 23%.

Figura 5.31. Temperatura versus Potência para Var = 0,85 m/s.



a. Teor de O₂ = 21%.



b. Teor de O₂ = 23%.

Figura 5.32. Temperatura versus Potência para Var = 1,39 m/s.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

A presença de fuligem numa chama aumenta a transferência de calor dos produtos da combustão por radiação térmica, o que geralmente é desejável, mas pode gerar um problema ambiental quando é emitida para a atmosfera, além de aumentar a necessidade de manutenção dos queimadores. Com base nesta constatação, avaliou-se neste trabalho a influência de dois mecanismos: a variação do teor de O_2 e da velocidade do ar, no controle da formação e distribuição de fuligem em chamas. Foram estudadas chamas difusas de acetileno em um queimador com injeção coaxial anular de ar.

O estudo foi realizado utilizando níveis baixos de enriquecimento, com jatos de ar com 21% (ar não enriquecido), 23 e 25 % de oxigênio, que não requerem adaptações significativas dos equipamentos térmicos.

Como conclusões mais importantes do trabalho, que constitui uma contribuição original ao conhecimento do tema, destacamos:

- O enriquecimento com O_2 do jato de ar nos níveis testados, provocou um aumento da produção da fuligem na maioria dos casos estudados, relativamente ao caso base e ao jato de ar não enriquecido.

- O aumento da potência do queimador elevou, em geral, os níveis de concentração da fuligem na chama.
- Para velocidades do ar, V_{ar} , menores que do combustível, V_{eg} , resulta, em geral, um aumento da concentração de fuligem ao longo da chama, em relação ao caso base, podendo as chamas serem mais curtas, dependendo da potência do queimador.
- Em chamas com V_{ar}/V_{eg} maiores do que 1,00, há um intenso aumento de produção da fuligem no início da chama, caindo a concentração no topo, a valores menores do que no caso base, o que pode ser interessante em termos de aumentar a transferência de calor por radiação da chama e conseguir, simultaneamente, uma concentração de fuligem reduzida na saída.

Os resultados sugerem que a utilização em conjunto da variação do teor de O_2 e da velocidade do ar pode representar uma ferramenta útil de controle da fuligem.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros podemos destacar:

- Estender o estudo para levantar o efeito dos níveis de enriquecimento e do campo de velocidades em chamas confinadas;
- Pesquisar a possibilidade de aplicação industrial dos resultados ao controle da fuligem.

Referências Bibliográficas

- Agrupamento de Engenharia Térmica (AET). Programa Acomb4 (versão demonstração). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Disponível na Internet. <http://www.ipt.br> 6 nov. 2000.
- Appleton, J.P. Soot Oxidation Kinetics at Combustion Temperatures. In: 41st Meeting on Atmospheric Pollution by Aircraft Engines, 1973, London. London: AGARD Propulsion and Energetics Panel, 1973. p. 20.1 – 20.11.
- Baukal Jr., C.E. Oxygen-Enhanced Combustion. 1^a ed. New York: CRC Press, 1998, 369p.
- Ciajolo, A., D'Anna, A., Barbella, R., Tregrossi, A. e Violi, A. The Effect of Temperature on Soot Inception in Premixed Ethylene Flames. In: Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, 1996, Pittsburgh. Pittsburgh : The Combustion Institute, 1996. p. 2327-2333.
- D'Alessio, A., D'Anna, A., D'Orsi, A., Minutolo, P., Barbella, R. e Ciajolo, A. Precursor Formation and Soot Inception in Premixed Ethylene Flames. In: Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, 1992, Pittsburgh. Pittsburgh : The Combustion Institute, 1992. p. 973-980.
- Delfau, J.L., Michaud, P. e Barassin, A. Formation of Small and Large Positive Ions in Rich and Soot Low-Pressure Ethylene and Acetylene Premixed Flames. Combustion Science and Technology, v.20, p. 165-177, 1979.

- Dhillon, S.S., Yang, G., Moody, M., Yam, C. e Kennedy, I.M. Soot Formation in a Steady, Nonpremixed, Recirculating Flame. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 9, p. 405-412, 1994.
- Du, D.X., Axelbaum, R.L. e Law, C.K. Soot Formation in Strained Diffusion Flames with Gaseous Additives. *Combustion and Flame*, v. 102, p. 11-20, 1995.
- Du, D.X., Axelbaum, R.L. e Law, C.K. The Influence of Carbon Dioxide and Oxygen as Additives on Soot Formation in Diffusion Flames. In: Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, 1990, Pittsburgh. Pittsburgh : The Combustion Institute, 1990. p. 1501-1507.
- Fassani, F.L., Santos, A.A.B., Goldstein Jr, L. e Ferrari, C.A. Diffusion Air Effects on the Soot Axial Distribution Concentration in a Premixed Acetylene/Air Flame. In: 8th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences, 2000, Porto Alegre. Porto Alegre : ABCM, 2000. CD-ROM.
- Fenimore, C.P. e Jones, G.W. Coagulation of Soot to Smoke in Hydrocarbon Flames. *Combustion and Flame*, v.13, p. 303-310, 1969.
- Frenklach, M., Clary, D.W. e Ramachandra, M.K. Shock Tube Study of the Fuel Structure Effects on the Chemical Kinetic Mechanisms Responsible for Soot Formation Part II. NASA Contract. Rep. No. 174880, May. 1985.
- Frenklach, M., Clary, D.W., Yuan, T., Gardiner Jr., W.C. e Stein, S.E. Mechanism of Soot Formation in Acetylene-Oxygen Mixtures. *Combustion Science and Technology*, v. 50, p. 79-115, 1986.
- Frenklach, M., Yuan, T. e Ramachandra, M.K. Soot Formation in Binary Hidrocarbon Mixtures. *Journal of Energy & Fuels*, v. 2, p. 462-480, 1988.

Frenklach, M. On the Driving Force of PAH Production. In: Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, 1988, Pittsburgh. Pittsburgh : The Combustion Institute, 1988. p.1075-1082.

Frenklach, M. e Wang, H. Detailed Modeling of Soot Particle Nucleation and Growth. In: Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, 1990, Pittsburgh. Pittsburgh : The Combustion Institute, 1990. p.1559-1566.

Frenklach, M. e Wang, H. Soot Formation Fundamentals – Detailed Mechanism and Modeling of Soot Formation. In : Someya, T.(Ed.). Advanced Combustion Science. Tokyo: Springer Verlag, 1993. p. 168-175.

Frenklach, M. On Surface Growth Mechanism of Soot Particles. In: Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion, 1996, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1996. p. 2285-2293.

Glassman, I. Combustion. 1^a ed. Orlando: Academic Press Inc., 1977.

Glassman, I. Combustion. 2^a ed. Orlando: Academic Press Inc., 1987, p. 360-385.

Glassman, I. e Yaccarino, P. The Effect of Oxygen Concentration on Sooting Diffusion Flames. Combustion Science and Technology, v. 24, p. 107-114, 1980.

Graham, S.C. The Collisional Growth of Soot Particles at High Temperatures. Sixteenth Symposium (International) on Combustion, 1976, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1976. p. 663-669.

Gülnder, O.L. e Snelling, D.R. Influence of Nitrogen Dilution and Flame Temperature on Soot Formation in Diffusion Flames. Combustion and Flame, v. 92, p. 115-124, 1993.

Gülnder, O.L. Influence of Sulfur Dioxide on Soot Formation in Diffusion Flames. Combustion and Flame, v. 92, p. 410-418, 1993.

- Gülder, O.L. Effects of Oxygen on Soot Formation in Methane, Propane and n-Butane Diffusion Flames. *Combustion and Flame*, v. 101, p. 302-310, 1995.
- Hall-Roberts, V.J., Hayhurst, A.N., Knight, D.E. e Taylor, S.G. The origin of Soot in Flames : Is the Nucleus an Ion ?. *Combustion and Flame*, v. 120, p. 578-584, 2000.
- Haynes, B.S. e Wagner, H. G. Soot Formation. *Progress in Energy and Combustion Science*, Great Britain, v. 7, p. 229-273, 1981.
- Haynes, B.S., Jander, H., Matzing, H. e Wagner, H.G. The Influence of Gaseous Additives on the Formation of Soot in Premixed Flames. In: Nineteenth Symposium (International) on Combustion, 1982, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1982. p. 1379-1385.
- Haynes, B.S. Soot and Hydrocarbons in Combustion. In: Bartok, W. e Sarofim, A.F. (Eds.). *Fossil Fuel Combustion - A Source Book*. New York : Wiley Interscience Publication, 1991. p. 261-326.
- Hwang, J.Y., Chung, S.H. e Lee, W. Effects of Oxygen and Propane Addition on Soot Formation in Counterflow Ethylene Flames and the Role of C₃ Chemistry. In: Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion, 1998, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1998. p. 1531-1538.
- Hennessey, R.J., Robinson, C. e Smith, D.B. A Comparative Study of Methane and Ethane Flame Chemistry by Experiment and Detailed Modelling. In: Twenty-First Symposium (International) on Combustion 1986, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1986. p. 761-772.
- Holman, J.P. *Experimental Methods for Engineers*. 6^a ed. Singapore: McGraw-Hill Int. Editions, 1994, 616p.

- Homann, K.H. e Wagner, H.G. Some New Aspects of the Mechanism of Carbon Formation in Premixed Flames. In: Eleventh Symposium (International) on Combustion, 1967, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1967. p. 371-379.
- Hulst, H.C. v. d. Light Scattering by Small Particles. New York: Dover Publications, Inc., 1981, 470p.
- Hura, H.S. e Glassman, I. Fuel Oxygen Effects on Soot Formation in Counterflow Diffusion Flames. Combustion Science and Technology, v. 53, p. 1-21, 1987.
- Hura, H.S. e Glassman, I. Soot Formation in Diffusion Flames of Fuel/Oxygen Mixtures. In: Twenty-Second Symposium (International) on Combustion, 1988, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1988. p. 371-378.
- Ismail, K.A.R., Gonçalves, M.M. e Benevenuto, F.J. Instrumentação Básica para Engenharia. Campinas: Ed. do autor, 1998, 475p.
- Iuliis, S., Barbini, M., Benecchi, S., Cignoli, F. e Zizak, G. Determination of the Soot Volume Fraction in an Ethylene Diffusion Flame by Multiwavelength Analysis of Soot Radiation. Combustion and Flame, v. 115, p. 253-261, 1998.
- Kasper, M., Sattler, K., Siegmann, K., Matter, U. e Siegmann, H.C. The Influence of Fuel Additives on the Formation of Carbon During Combustion. Journal of Aerosol Science, v. 30, p. 217-225, 1999.
- Kennedy, I.M. Models of Soot Formation and Oxidation. Progress in Energy and Combustion Science, Great Britain, v. 23, p. 95-132, 1997.
- Kent, J.H. e Bastin, S.J. Parametric Effects on Sooting in Turbulent Acetylene Diffusion Flames. Combustion and Flame, v. 56, p. 29-42, 1984.

- Kline, S.J. e McClintock, F.A. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. Mech. Eng., p. 3, 1953.
- Köylü, Ü.Ö. e Faeth, G.M. Optical Properties of Soot in Buoyant Laminar Diffusion Flames. Journal of Heat Transfer, v. 116, p. 971-979, 1994.
- Lee, S.C. e Tien, C.L. Optical Constants of Soot in Hydrocarbon Flames. In: Eighteenth Symposium (International) on Combustion, 1981, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1981. p. 1159-1166.
- Lee, K.O., Megaridis, C.M., Zelepouga, S., Saveliev, A.V., Kennedy, L.A., Charon, O. e Ammouri, F. Soot Formation Effects of Laminar Coannular Nonpremixed Methane/Air Flames. Combustion and Flame, v. 121, p. 323-333, 2000.
- Leung, K.M. e Lindstedt, R.P. A Simplified Reaction Mechanism for Soot Formation in Nonpremixed Flames. Combustion and Flame, v. 87, p. 289-305, 1991.
- McEnally, C.S. e Pfefferle, L.D. Soot Formation in Methane / Air Nonpremixed Flames Doped with Small Quantities of C3 Hydrocarbons. Combustion and Flame, v. 112, p. 545-558, 1998.
- McEnally, C.S. e Pfefferle, L.D. Species and Soot Concentration Measurements in a Methane / Air Nonpremixed Flames Doped with C4 Hydrocarbons. Combustion and Flame, v. 115, p. 81-92, 1998.
- Melton, T.R., Fikret, I. e Senkan, S.M. The effects of Equivalence Ratio on the Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Soot in Premixed Ethane Flames. Combustion and Flame, v. 121, p. 671-678, 2000.
- Millikan, R.C. e Foss, W.I. Non-equilibrium Effects in Soot Formation Deposition. Combustion and Flame, v. 6, p. 210-211, 1962.

- Millikan, R.C. Non-Equilibrium Soot Formation in Premixed Flames. *The Journal of Physical Chemistry*, v. 66, p. 794-799, 1962.
- Mitchell, J.B.A. e Miller, D.J.M. Studies of the Effects of Metallic and Gaseous Additives in the Control of Soot Formation in Diffusion Flames. *Combustion and Flame*, v. 75, p. 45-55, 1989.
- Nagle, J. e Strickland-Constable, R.F. Oxidation of Carbon Between 1000-2000 °C. In: Fifth Conference on Carbon, 1961, Pennsylvania. Pennsylvania: Pennsylvania University, 1961. p. 154-164.
- Olson, D.B. e Calcote, H.F. Ionic Mechanisms of Soot Nucleation in Premixed Flames. In: *Particulate Carbon - Formation During Combustion*. New York : Plenum Press, 1981. p. 177-205.
- Palmer, H.B. e Cullis, C.F. The Formation of Carbon from Gases. *Chemistry and Physics of Carbon*, v. 1, p. 265-325, 1965.
- Saito, K., Williams, F.A. e Gordon, A.S. Effects of Oxygen on Soot Formation in Methane Diffusion Flames. *Combustion Science and Technology*, v. 47, p. 117-138, 1986.
- Shaddix, C.R., Harrington, J.E. e Smyth, K.C. Quantitative Measurements of Enhanced Soot Production in a Flickering Methane / Air Diffusion Flame. *Combustion and Flame*, v. 99, p. 723-732, 1994.
- Smith, O.I. Fundamentals of Soot Formation in Flames with Application to Diesel Engine Particulate Emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, Great Britain, v. 7, p. 275-291, 1981.
- Smooke, M.D., McEnally, C.S., Pfefferle, L.D., Hall, R.J. e Colket, M.B. Computational and Experimental Study of Soot Formation in a Coflow, Laminar Diffusion Flame. *Combustion and Flame*, v. 117, p. 117-139, 1999.

- Takahashi, F., Bonini, J. e Glassman, I. Further Experiments and Analysis of the Sooting Tendency of Premixed Flames. *Chemical and Physical Processes in Combustion*, p. 98.1-98.4, 1984.
- Tabayashi, K. e Bauer, S.H. The Early Stages of Pyrolysis and Oxidation of Methane. *Combustion and Flame*, v. 34, p. 63-83, 1979.
- Turns, S.R. *An Introduction to Combustion - Concepts and Applications*. 1^a ed. Singapore: McGraw-Hill Int. Editions, 1996, p. 543.
- Wagner, H.G. Soot Formation in Combustion. In: *Seventeenth Symposium (International) on Combustion*, 1978, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1978. p. 3-19.
- Warnatz, J. Resolution of Gas Phase and Surface Combustion Chemistry into Elementary Reactions. In: *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*, 1992, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1992. p. 553-579.
- Wersborg, B.L., Howard, J.B. e Williams, G.C. Physical Mechanisms in Carbon Formation in Flames. In: *Fourteenth Symposium (International) on Combustion*, 1973, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1973. p. 929-940.
- Wey, C., Powell, E.A. e Jagoda, J.I. The Effect on Soot Formation of Oxygen in the Fuel of a Diffusion Flame. In: *Twentieth Symposium (International) on Combustion*, 1984, Pittsburgh. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1984. p. 1017-1024.
- Wey, C. Simultaneous Measurements of Soot Formation and Hydroxyl Concentration in Various Oxidizer Diffusion Flames. *The International Society for Optical Engineering*, v. 2122, p. 94-106, 1994.
- Xu, F., Lin, K.C. e Faeth, G.M. Soot Formation in Laminar Premixed Methane/Oxygen Flames at Atmospheric Pressure. *Combustion and Flame*, v. 115, p. 195-209, 1998.

- Yoshizawa, Y. Soot Formation Fundamentals – Soot Oxidation. In : Someya, T.(Ed.). Advanced Combustion Science. Tokyo: Springer Verlag, 1993. p. 193-197.
- You, J.H., Chiang, P.C., Chang, K.T. e Chang, S.C. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) and Mutagenicity of Soot Particulates in Air Emissions from Two-Stage Incineration of Polystyrene. Journal of Hazardous Materials, v. 36, p. 1-17, 1994.
- Zhang, J. e Megaridis, C.M. Soot Microstructure in Steady and Flickering Laminar Methane / Air Diffusion Flames. Combustion and Flame, v. 112, p. 473-484, 1998.
- Zhang, J. e Megaridis, C.M. Soot Suppression by Ferrocene in Laminar Ethylene / Air Nonpremixed Flames. Combustion and Flame, v. 105, p. 528-540, 1996.
- Zelepouga, S.A., Saveliev, A.V., Kennedy, L.A. e Fridman, A.A. Relative Effect of Acetylene and PAHs Addition on Soot Formation in Laminar Diffusion Flames of Methane with Oxygen and Oxygen-Enriched Air. Combustion and Flame, v. 122, p. 76-89, 2000.

Anexo I

Análise da Incerteza Experimental

Toda medida experimental tem atrelada a sua leitura uma possível incerteza experimental. Existem vários tipos de erros que podem gerar incertezas na medição experimental. Primeiro, podemos considerar os erros grosseiros que são aqueles cometidos devido à falta de atenção ou prática do operador. Deste tipo são os erros cometidos de operações matemáticas, enganos na leitura ou escritas de dados. Em segundo podemos citar os erros sistemáticos que são aqueles decorrentes de causas constantes e se caracterizam por ocorrerem sempre com o mesmo valor e sinal. São deste tipo os erros devido a aparelhos descalibrados, a métodos falhos, ao uso de equações incompletas e a condições ambientais inadequadas aos instrumentos de medida. Em terceiro podemos citar os erros aleatórios que resultam do somatório de pequenos erros independentes e incontrolláveis afetando o observador, o instrumento de medida, o objeto a ser medido e as condições ambientais. São causas desses erros, por exemplo, a variação do “milímetro” ao longo de uma reta milimetrada, a variação da tensão da rede elétrica que afeta o instrumento de medida nela ligada.

Para evitar que erros grosseiros e sistemáticos fossem cometidos, antes dos ensaios realizados nessa dissertação foram realizados testes preliminares com o intuito de conhecer melhor o dispositivo experimental, além de serem testados os instrumentos utilizados no experimento quanto à precisão de leitura.

Já para verificar a incerteza experimental máxima causada pelos erros aleatórios, foi utilizado o método de propagação de erros independentes proposto por Kline e McClintock apresentado por Holman (1994).

- **Concentração da Fuligem**

A verificação da incerteza experimental no cálculo da concentração da fuligem foi realizada através do método de Kline e McClintock.

A concentração da fuligem foi calculada segundo a equação abaixo:

$$\phi = \ln\left(\frac{I_o}{I_L}\right) \frac{\lambda}{36\pi F(\lambda)L} \quad (I.1)$$

onde ϕ é função das grandezas λ , $F(\lambda)$, L , I_o e I_L .

Os valores do comprimento de onda do laser λ e de $F(\lambda)$ - função obtida através das partes real e imaginária do índice complexo de refração da partícula da fuligem - são previamente estabelecidos na literatura e possuem valores constantes e, portanto, as derivadas em relação a esses fatores nos cálculos da incerteza são iguais a zero e não influenciam no valor da incerteza experimental.

As grandezas restantes L , I_o e I_L foram medidas no experimento. Suas incertezas foram obtidas a partir da verificação da menor unidade de escala dos instrumentos utilizados em suas leituras, sendo suas incertezas iguais a metade desta menor divisão.

Com isso, a estimativa do erro relativo máximo no cálculo de ϕ é obtida de:

$$\mu_\phi = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial L}\right) \cdot \mu_L\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial I_o}\right) \cdot \mu_{I_o}\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial I_L}\right) \cdot \mu_{I_L}\right]^2} \quad (I.2)$$

onde,

$$\frac{\partial \phi}{\partial L} = \frac{\lambda}{36\pi F(\lambda)L^2} \ln\left(\frac{I_L}{I_o}\right) \quad (I.3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial I_o} = \frac{\lambda}{36\pi F(\lambda)L} \left(\frac{1}{I_o}\right) \quad (I.4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial I_L} = -\frac{\lambda}{36\pi F(\lambda)L} \left(\frac{1}{I_L}\right) \quad (I.5)$$

sendo que as incertezas das variáveis que influenciam no erro relativo de ϕ são dadas por:

$$\mu_L = \pm 0,5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

para a incerteza de L que foi lido através de uma régua milimetrada,

e

$$\mu I_o = \mu I_L = \pm 0,01 \text{ } \mu\text{A}$$

para as incertezas das leituras dos valores de I_o e I_L , que foram registrados em papel milimetrado no eletrômetro. Os valores de I_o e I_L lidos no papel milimetrado foram transformados em μA e a metade da menor divisão do papel milimetrado em μA foi em média nos experimentos em torno de $0,01\mu\text{A}$. O valor pico I_o foi quem serviu de fundo de escala no papel para a verificação do valor da menor divisão da escala.

Já para os valores de I_o e I_L lidos diretamente no amperímetro do eletrômetro, a incerteza dessas leituras foram de $\mu I_o = \mu I_L = \pm 0,05\mu\text{A}$.

Nos experimentos executados a incerteza experimental no cálculo da concentração da fuligem teve um valor médio em torno de 8,5%.

- **Potência**

Analogamente ao que foi feito no cálculo da concentração da fuligem, foi utilizado o método de Kline e McClintock para estimar a incerteza experimental no cálculo da potência do queimador.

A potência do queimador foi calculada a partir de:

$$\text{Potência[kW]} = \frac{Q_c \text{PCI}_c \rho_c}{3600 \times 1000} \quad (\text{I.6})$$

Os valores de PCI_c e ρ_c foram obtidos na literatura e possuem valores constantes e, portanto, não influenciam no valor da incerteza experimental.

A grandeza Q_c foi a medida lida no experimento para o cálculo da potência.

A estimativa do erro máximo é dada por:

$$\begin{aligned} \mu_P &= \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial P}{\partial Q_c} \right) \mu_{Q_c} \right]^2} \\ &= \pm \left(\frac{\partial P}{\partial Q_c} \right) \mu_{Q_c} \end{aligned} \quad (\text{I.7})$$

onde,

$$\frac{\partial P}{\partial Q_c} = \frac{\text{PCI}_c \rho_c}{3600 \times 1000} \quad (\text{I.8})$$

Os dispositivos utilizados na leitura de vazão foram rotâmetros que possuem, em geral, precisão em torno de 2% do fluxo indicado (Ismail *et al.*, 1998). Portanto, $\mu Q_c = \pm 0,02 Q_c$.

Com isso, nos experimentos realizados a incerteza experimental máxima no cálculo da potência teve um valor médio em torno de 2%.

- **Velocidades**

Também a verificação da incerteza experimental no cálculo da velocidade foi feita através do método de Kline e McClintock.

A velocidade de escoamento do gás queimado e do oxidante foram calculadas a partir de:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (I.9)$$

sendo, V a velocidade de saída do queimador, Q a vazão e A representa a área de saída do queimador. As vazões foram medidas em experimento, e as áreas de saída foram calculadas a partir dos diâmetros medidos no queimador do dispositivo experimental.

A incerteza experimental é dada por:

$$\mu V = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial V}{\partial Q} \right) \mu Q \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial V}{\partial A} \right) \mu A \right]^2} \quad (I.10)$$

sendo,

$$\frac{\partial V}{\partial Q} = \frac{1}{A} \quad (I.11)$$

$$\frac{\partial V}{\partial A} = -\frac{Q}{A^2} \quad (\text{I.12})$$

onde,

$$\mu Q = \pm 0,02Q \quad (\text{I.13})$$

$$\begin{aligned} \mu A_c &= \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial A}{\partial d_q} \right) \cdot \mu d_q \right]^2} \\ &= \pm \frac{\pi}{2} d_q \mu d_q \\ &= \pm 7,854 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (\text{I.14})$$

e

$$\begin{aligned} \mu A_{ox} &= \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial A}{\partial d_{ox}} \right) \cdot \mu d_{ox} \right]^2} \\ &= \pm \sqrt{(\mu d_{ox})^2 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 (d_2^2 + d_1^2)} \\ &= \pm 1,5708 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (\text{I.15})$$

μA_c e μA_{ox} são as incertezas experimentais referentes as áreas de saída do gás queimado e do oxidante, respectivamente; d_q é o diâmetro de saída do gás com valor de $0,5 \times 10^{-3}$ m e $\mu d_q = \pm 0,01 \times 10^{-3}$ m, já que sua leitura foi feita por um paquímetro. A fresta na qual o oxidante escoava - d_{ox} - é a diferença entre os diâmetros d_1 e d_2 que medem 25 e 26×10^{-3} m, respectivamente. Estes foram medidos através de paquímetro e, com isso, a fresta na qual escoava o oxidante possui incerteza experimental $\mu d_{ox} = \pm 0,01 \times 10^{-3}$ m. Então no cálculo da incerteza da velocidade, quando foi calculada a incerteza para a velocidade do gás queimado, utilizou-se o valor de μA_c para a incerteza da área calculada (μA) enquanto para a velocidade do oxidante foi utilizado o valor de μA_{ox} .

A partir disto, o valor médio da incerteza experimental máxima nos cálculos das velocidades do gás e do oxidante foram em torno de 2,8%.

- **Temperatura**

A incerteza na leitura do termopar tipo “S” através da medição por aparelhos que fazem a leitura da força eletromotriz térmica é em torno de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Holman, 1994).¹

¹ A platina opera como catalisador e pode causar uma imprecisão adicional na medida da temperatura.

Anexo II

Resultados Experimentais

A seguir apresentaremos os resultados experimentais para os 96 (noventa e seis) ensaios realizados e réplicas de alguns ensaios.

Concentração da Fuligem

Ensaio: 1
 Var [m/s]: -
 Qc [l/h] 50,00 Lf[mm] = 115

Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,7429
5,00	0,04	1,0547
7,00	0,06	1,3810
10,00	0,09	1,7234
15,00	0,13	2,2437
23,00	0,20	2,8648
35,00	0,30	3,1051
43,00	0,37	2,5191
50,00	0,43	2,1899
55,00	0,48	1,9787
63,00	0,55	1,7234
70,00	0,61	1,5746
75,00	0,65	1,4771
83,00	0,72	1,3810
90,00	0,78	1,3334
95,00	0,83	1,2862
100,00	0,87	1,2393
103,00	0,90	1,2393
107,00	0,93	1,2393
110,00	0,96	1,2393

Ensaio: 2
 Var [m/s]: -
 Qc [l/h] 60,00 Lf[mm] =130

Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,50397
5,00	0,04	0,86141
7,00	0,05	1,43449
10,00	0,08	1,73973
15,00	0,12	2,45087
23,00	0,18	2,98948
35,00	0,27	3,50591
43,00	0,33	3,77922
50,00	0,38	3,92000
55,00	0,42	3,92000
63,00	0,48	3,92000
70,00	0,54	3,64122
75,00	0,58	3,24291
83,00	0,64	2,74495
90,00	0,69	1,63649
95,00	0,73	1,63649
100,00	0,77	1,33565
103,00	0,79	1,04725
107,00	0,82	0,81572
110,00	0,85	0,68040

Ensaio: 3
 Var [m/s]: -
 Qc [l/h] 65,00 Lf[mm] =
 Teor O2[%]: 21 140

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,04725
5,00	0,04	1,43449
7,00	0,05	1,68792
10,00	0,07	2,16870
15,00	0,11	2,74495
23,00	0,16	3,64122
35,00	0,25	3,92000
43,00	0,31	3,92000
50,00	0,36	3,84926
55,00	0,39	3,70988
63,00	0,45	3,50591
70,00	0,50	3,24291
75,00	0,54	3,05198
83,00	0,59	2,68513
90,00	0,64	2,16870
95,00	0,68	1,84453
100,00	0,71	1,58544
103,00	0,74	1,48445
107,00	0,76	1,33565
110,00	0,79	1,33565

Ensaio: 4
 Var [m/s]: -
 Qc [l/h] 70,00 Lf[mm] =
 Teor O2[%]: 21 150

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,61398
5,00	0,03	1,08822
7,00	0,05	1,44049
10,00	0,07	1,97680
15,00	0,10	2,55785
23,00	0,15	3,25848
35,00	0,23	4,11284
43,00	0,29	4,34386
50,00	0,33	4,11284
55,00	0,37	3,96297
63,00	0,42	3,67257
70,00	0,47	3,39379
75,00	0,50	3,25848
83,00	0,55	2,99548
90,00	0,60	2,55785
95,00	0,63	2,26127
100,00	0,67	2,03277
103,00	0,69	1,75730
107,00	0,71	1,49230
110,00	0,73	1,08822

Ensaio: 5
 Var [m/s]: -
 Qc [l/h] 75,00 Lf[mm] =
 Teor O2[%]: 21 160

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02143	0,50
5,00	0,03571	0,95
7,00	0,05000	1,29
10,00	0,07143	2,39
15,00	0,10714	2,39
23,00	0,16429	3,12
35,00	0,25000	4,06
43,00	0,30714	4,67
50,00	0,35714	4,75
55,00	0,39286	4,75
63,00	0,45000	4,21
70,00	0,50000	3,78
75,00	0,53571	3,44
83,00	0,59286	2,93
90,00	0,64286	2,51
95,00	0,67857	2,06
100,00	0,71429	1,74
103,00	0,73571	1,43
107,00	0,76429	0,96
110,00	0,78571	0,77

Ensaio: 6
 Var [m/s]: - Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 175

Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,38
5,00	0,03	2,08
7,00	0,04	2,41
10,00	0,06	2,81
15,00	0,09	3,35
23,00	0,13	4,16
35,00	0,20	5,23
43,00	0,25	5,40
50,00	0,29	5,57
55,00	0,31	5,23
63,00	0,36	4,68
70,00	0,40	4,02
75,00	0,43	3,35
83,00	0,47	2,75
90,00	0,51	2,63
95,00	0,54	2,58
100,00	0,57	2,41
103,00	0,59	2,30
107,00	0,61	1,93
110,00	0,63	1,57

Ensaio: 7
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85

Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	0,28447
3,00	0,04	0,43118
5,00	0,06	1,21499
7,00	0,08	1,73142
10,00	0,12	2,28920
15,00	0,18	2,48551
23,00	0,27	3,10998
25,00	0,29	3,10998
30,00	0,35	3,55972
35,00	0,41	4,04050
38,00	0,45	4,04050
43,00	0,51	4,55693
45,00	0,53	4,83024
50,00	0,59	4,04050
53,00	0,62	3,10998
56,00	0,66	2,28920
63,00	0,74	1,91243
70,00	0,82	1,55499
73,00	0,86	1,38292
80,00	0,94	1,21499

Ensaio: 8
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115

Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,43118
5,00	0,04	1,21499
7,00	0,06	2,28920
10,00	0,09	2,89554
15,00	0,13	3,33122
23,00	0,20	4,29393
35,00	0,30	4,83024
43,00	0,37	5,41129
50,00	0,43	4,83024
55,00	0,48	3,55972
63,00	0,55	3,55972
70,00	0,61	3,55972
75,00	0,65	2,48551
83,00	0,72	1,55499
90,00	0,78	1,55499
95,00	0,83	1,38292
100,00	0,87	1,21499
103,00	0,90	1,21499
107,00	0,93	1,05102
110,00	0,96	1,05102

Ensaio: 9
 Var [m/s]: Lf[mm]
 =
 Qc [l/h] 115
 65,00
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,89081
5,00	0,04	1,73142
7,00	0,06	2,28920
10,00	0,09	3,10998
15,00	0,13	3,55972
23,00	0,20	4,83024
35,00	0,30	4,83024
43,00	0,37	6,38523
50,00	0,43	4,83024
55,00	0,48	4,55693
63,00	0,55	4,29393
70,00	0,61	3,55972
75,00	0,65	2,48551
83,00	0,72	2,09827
90,00	0,78	1,91243
95,00	0,83	1,21499
100,00	0,87	1,21499
103,00	0,90	0,89081
107,00	0,93	0,89081
110,00	0,96	0,89081

Ensaio: 10
 Var [m/s]: Lf[mm]=
 0,10
 Qc [l/h] 125
 70,00
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,89081
5,00	0,04	2,09827
7,00	0,06	2,89554
10,00	0,08	3,33122
15,00	0,12	3,79596
23,00	0,18	4,83024
35,00	0,28	4,83024
43,00	0,34	4,83024
50,00	0,40	4,04050
55,00	0,44	3,79596
63,00	0,50	3,10998
70,00	0,56	3,10998
75,00	0,60	2,89554
83,00	0,66	2,68751
90,00	0,72	2,28920
95,00	0,76	2,09827
100,00	0,80	2,09827
103,00	0,82	2,09827
107,00	0,86	1,91243
110,00	0,88	1,91243

Ensaio: 11
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 =
 Qc [l/h] 125
 75,00
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,89081
5,00	0,04	2,09827
7,00	0,06	3,10998
10,00	0,08	3,55972
15,00	0,12	3,79596
23,00	0,18	4,55693
35,00	0,28	4,55693
43,00	0,34	6,38523
50,00	0,40	5,41129
55,00	0,44	3,10998
63,00	0,50	2,89554
70,00	0,56	2,48551
75,00	0,60	2,48551
83,00	0,66	2,28920
90,00	0,72	2,28920
95,00	0,76	2,09827
100,00	0,80	2,09827
103,00	0,82	2,09827
107,00	0,86	1,91243
110,00	0,88	1,91243

Ensaio: 12
 Var [m/s]: Lf[mm]=
 0,10
 Qc [l/h] 135
 80,00
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,55499
5,00	0,04	2,28920
7,00	0,05	2,89554
10,00	0,07	3,55972
15,00	0,11	3,55972
23,00	0,17	4,83024
35,00	0,26	4,83024
43,00	0,32	5,11471
50,00	0,37	4,83024
55,00	0,41	4,55693
63,00	0,47	4,04050
70,00	0,52	3,55972
75,00	0,56	3,55972
83,00	0,61	2,48551
90,00	0,67	2,48551
95,00	0,70	2,28920
100,00	0,74	2,09827
103,00	0,76	2,09827
107,00	0,79	1,91243
110,00	0,81	1,91243

Ensaio: 13
 Var [m/s]: Lf[mm]=
 0,10
 Qc [l/h] 85
 50,00
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	1,21499
3,00	0,04	1,55499
5,00	0,06	1,55499
7,00	0,08	2,28920
10,00	0,12	2,89554
15,00	0,18	3,10998
23,00	0,27	6,38523
25,00	0,29	6,38523
30,00	0,35	4,83024
35,00	0,41	4,83024
38,00	0,45	3,55972
43,00	0,51	3,55972
45,00	0,53	3,10998
50,00	0,59	2,68751
53,00	0,62	2,48551
56,00	0,66	2,48551
63,00	0,74	2,48551
70,00	0,82	2,09827
73,00	0,86	2,09827
80,00	0,94	1,91243

Ensaio: 14
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]
 =
 Qc [l/h] 115
 60,00
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,89081
5,00	0,04	1,38292
7,00	0,06	2,28920
10,00	0,09	2,89554
15,00	0,13	3,55972
23,00	0,20	3,79596
35,00	0,30	4,83024
43,00	0,37	4,83024
50,00	0,43	3,55972
55,00	0,48	3,55972
63,00	0,55	2,89554
70,00	0,61	2,89554
75,00	0,65	2,68751
83,00	0,72	2,48551
90,00	0,78	2,48551
95,00	0,83	1,55499
100,00	0,87	0,58105
103,00	0,90	0,58105
107,00	0,93	0,58105
110,00	0,96	0,58105

Ensaio: 14 repetição1
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 60,00
 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,63394
5,00	0,04	1,11472
7,00	0,06	1,86475
10,00	0,09	2,44236
15,00	0,13	3,36060
23,00	0,20	3,66145
35,00	0,30	3,36060
43,00	0,37	2,97867
50,00	0,43	2,70536
55,00	0,48	2,48551
63,00	0,55	2,06559
70,00	0,61	1,86475
75,00	0,65	1,70815
83,00	0,72	1,55499
90,00	0,78	1,40512
95,00	0,83	1,25841
100,00	0,87	1,15037
103,00	0,90	1,11472
107,00	0,93	1,07926
110,00	0,96	1,04398

Ensaio: 15
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 65,00
 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,73421
5,00	0,04	1,55499
7,00	0,06	2,09827
10,00	0,09	2,68751
15,00	0,13	3,10998
23,00	0,20	4,29393
35,00	0,30	4,55693
43,00	0,37	5,11471
50,00	0,43	3,55972
55,00	0,48	3,33122
63,00	0,55	2,89554
70,00	0,61	2,48551
75,00	0,65	2,28920
83,00	0,72	1,55499
90,00	0,78	1,55499
95,00	0,83	1,55499
100,00	0,87	1,55499
103,00	0,90	1,21499
107,00	0,93	1,21499
110,00	0,96	1,21499

Ensaio: 15 repetição1
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 65,00
 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,97394
5,00	0,04	1,63115
7,00	0,06	2,18893
10,00	0,09	2,88637
15,00	0,13	3,40985
23,00	0,20	3,71288
35,00	0,30	3,81689
43,00	0,37	3,81689
50,00	0,43	3,81689
55,00	0,48	3,76469
63,00	0,55	3,55972
70,00	0,61	3,02528
75,00	0,65	2,44236
83,00	0,72	2,10646
90,00	0,78	1,86475
95,00	0,83	1,78601
100,00	0,87	1,70815
103,00	0,90	1,70815
107,00	0,93	1,70815
110,00	0,96	1,70815

Ensaio: 16
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 70,00
 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,21499
5,00	0,04	1,73142
7,00	0,06	2,68751
10,00	0,08	3,33122
15,00	0,12	3,79596
23,00	0,18	4,83024
35,00	0,28	6,38523
43,00	0,34	7,11944
50,00	0,40	4,83024
55,00	0,44	3,79596
63,00	0,50	3,55972
70,00	0,56	3,55972
75,00	0,60	3,55972
83,00	0,66	2,89554
90,00	0,72	2,48551
95,00	0,76	2,48551
100,00	0,80	2,48551
103,00	0,82	2,28920
107,00	0,86	2,09827
110,00	0,88	1,91243

Ensaio: 17
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 75,00
 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,21499
5,00	0,04	1,38292
7,00	0,06	2,28920
10,00	0,08	2,89554
15,00	0,12	3,33122
23,00	0,18	4,83024
35,00	0,28	5,41129
43,00	0,34	7,51775
50,00	0,40	8,38996
55,00	0,44	4,83024
63,00	0,50	4,83024
70,00	0,56	3,79596
75,00	0,60	3,55972
83,00	0,66	2,89554
90,00	0,72	2,48551
95,00	0,76	2,09827
100,00	0,80	2,09827
103,00	0,82	1,73142
107,00	0,86	1,73142
110,00	0,88	1,73142

Ensaio: 18
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 135
 Teor O2[%]: 80,00
 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,55499
5,00	0,04	1,91243
7,00	0,05	2,89554
10,00	0,07	2,89554
15,00	0,11	4,04050
23,00	0,17	4,83024
35,00	0,26	7,11944
43,00	0,32	6,38523
50,00	0,37	5,41129
55,00	0,41	5,41129
63,00	0,47	4,83024
70,00	0,52	4,55693
75,00	0,56	4,55693
83,00	0,61	4,04050
90,00	0,67	3,55972
95,00	0,70	3,33122
100,00	0,74	3,10998
103,00	0,76	2,89554
107,00	0,79	2,68751
110,00	0,81	2,48551

Ensaio: 19
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 85
 Teor O2[%]: 50,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	1,05102
3,00	0,04	1,55499
5,00	0,06	1,55499
7,00	0,08	2,09827
10,00	0,12	2,68751
15,00	0,18	3,55972
23,00	0,27	4,04050
25,00	0,29	4,83024
30,00	0,35	5,11471
35,00	0,41	5,41129
38,00	0,45	5,11471
43,00	0,51	4,83024
45,00	0,53	4,55693
50,00	0,59	4,04050
53,00	0,62	3,79596
56,00	0,66	3,79596
63,00	0,74	3,55972
70,00	0,82	3,55972
73,00	0,86	2,28920
80,00	0,94	1,55499

Ensaio: 20
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 60,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,21499
5,00	0,04	1,91243
7,00	0,06	2,48551
10,00	0,09	3,33122
15,00	0,13	4,04050
23,00	0,20	4,83024
35,00	0,30	4,83024
43,00	0,37	4,55693
50,00	0,43	4,29393
55,00	0,48	4,04050
63,00	0,55	3,55972
70,00	0,61	3,55972
75,00	0,65	3,33122
83,00	0,72	3,10998
90,00	0,78	2,89554
95,00	0,83	2,68751
100,00	0,87	2,48551
103,00	0,90	2,48551
107,00	0,93	2,28920
110,00	0,96	2,09827

Ensaio: 20 repetição 01
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 60,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,22965
5,00	0,04	1,86941
7,00	0,06	2,33108
10,00	0,09	2,72378
15,00	0,13	3,46922
23,00	0,20	4,30406
35,00	0,30	4,96823
43,00	0,37	5,10902
50,00	0,43	5,10902
55,00	0,48	5,03827
63,00	0,55	4,83024
70,00	0,61	4,43193
75,00	0,65	4,05516
83,00	0,72	3,46922
90,00	0,78	2,72378
95,00	0,83	2,33108
100,00	0,87	1,95933
103,00	0,90	1,78064
107,00	0,93	1,64957
110,00	0,96	1,56353

Ensaio: 21
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 65,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,05102
5,00	0,04	1,73142
7,00	0,06	2,28920
10,00	0,09	2,89554
15,00	0,13	3,79596
23,00	0,20	8,38996
35,00	0,30	6,38523
43,00	0,37	6,38523
50,00	0,43	5,72105
55,00	0,48	5,11471
63,00	0,55	4,83024
70,00	0,61	4,55693
75,00	0,65	3,55972
83,00	0,72	3,33122
90,00	0,78	3,10998
95,00	0,83	2,68751
100,00	0,87	2,28920
103,00	0,90	2,28920
107,00	0,93	2,09827
110,00	0,96	2,09827

Ensaio: 21 repetição 01
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 65,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,27052
5,00	0,04	2,14273
7,00	0,06	2,62351
10,00	0,09	3,13993
15,00	0,13	3,46922
23,00	0,20	4,17850
35,00	0,30	5,10902
43,00	0,37	5,39942
50,00	0,43	5,54928
55,00	0,48	5,39942
63,00	0,55	5,18049
70,00	0,61	4,83024
75,00	0,65	4,30406
83,00	0,72	3,81484
90,00	0,78	3,24797
95,00	0,83	2,82551
100,00	0,87	2,47576
103,00	0,90	2,33108
107,00	0,93	2,18934
110,00	0,96	2,00473

Ensaio: 22
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 70,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,21499
5,00	0,04	1,91243
7,00	0,06	2,48551
10,00	0,08	3,33122
15,00	0,12	4,83024
23,00	0,18	6,38523
35,00	0,28	6,38523
43,00	0,34	7,11944
50,00	0,40	4,29393
55,00	0,44	3,55972
63,00	0,50	3,10998
70,00	0,56	2,89554
75,00	0,60	2,68751
83,00	0,66	2,48551
90,00	0,72	2,48551
95,00	0,76	2,28920
100,00	0,80	2,28920
103,00	0,82	2,09827
107,00	0,86	2,09827
110,00	0,88	2,09827

Ensaio: 22 repetição 1
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 70,00 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,27052
5,00	0,04	2,23626
7,00	0,06	2,92875
10,00	0,08	3,24797
15,00	0,12	3,75603
23,00	0,18	4,30406
35,00	0,28	5,18049
43,00	0,34	5,39942
50,00	0,40	5,39942
55,00	0,44	5,39942
63,00	0,50	5,39942
70,00	0,56	5,25270
75,00	0,60	5,10902
83,00	0,66	4,43193
90,00	0,72	3,69771
95,00	0,76	3,13993
100,00	0,80	2,62351
103,00	0,82	2,23626
107,00	0,86	1,86941
110,00	0,88	1,78064

Ensaio: 23
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 75,00 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,73142
5,00	0,04	2,09827
7,00	0,06	2,89554
10,00	0,08	3,55972
15,00	0,12	4,83024
23,00	0,18	6,38523
35,00	0,28	6,38523
43,00	0,34	4,83024
50,00	0,40	4,29393
55,00	0,44	3,55972
63,00	0,50	3,10998
70,00	0,56	2,89554
75,00	0,60	2,68751
83,00	0,66	2,48551
90,00	0,72	2,48551
95,00	0,76	2,28920
100,00	0,80	2,28920
103,00	0,82	2,09827
107,00	0,86	2,09827
110,00	0,88	2,09827

Ensaio: 23 repetição 1
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 75,00 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,69299
5,00	0,04	2,23626
7,00	0,06	3,93396
10,00	0,08	3,30263
15,00	0,12	3,81484
23,00	0,18	4,56218
35,00	0,28	5,39942
43,00	0,34	5,70244
50,00	0,40	6,01925
55,00	0,44	6,18323
63,00	0,50	6,18323
70,00	0,56	5,93869
75,00	0,60	5,54928
83,00	0,66	4,69492
90,00	0,72	4,05516
95,00	0,76	3,46922
100,00	0,80	2,92875
103,00	0,82	2,72378
107,00	0,86	2,33108
110,00	0,88	1,82489

Ensaio: 24
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 135
 Teor O2[%]: 80,00 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,38292
5,00	0,04	2,09827
7,00	0,05	2,89554
10,00	0,07	3,55972
15,00	0,11	4,29393
23,00	0,17	6,38523
35,00	0,26	7,94022
43,00	0,32	7,94022
50,00	0,37	8,38996
55,00	0,41	7,11944
63,00	0,47	6,38523
70,00	0,52	5,41129
75,00	0,56	4,83024
83,00	0,61	4,29393
90,00	0,67	3,55972
95,00	0,70	3,10998
100,00	0,74	2,89554
103,00	0,76	2,89554
107,00	0,79	2,68751
110,00	0,81	2,48551

Ensaio: 25
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 85
 Teor O2[%]: 50,00 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	0,28447
3,00	0,04	0,28447
5,00	0,06	1,21499
7,00	0,08	1,91243
10,00	0,12	2,28920
15,00	0,18	2,48551
23,00	0,27	2,68751
25,00	0,29	3,10998
30,00	0,35	3,33122
35,00	0,41	3,33122
38,00	0,45	3,33122
43,00	0,51	2,48551
45,00	0,53	2,48551
50,00	0,59	2,09827
53,00	0,62	1,55499
56,00	0,66	1,55499
63,00	0,74	1,21499
70,00	0,82	1,05102
73,00	0,86	1,05102
80,00	0,94	0,89081

Ensaio: 26
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 60,00 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,21499
5,00	0,04	1,91243
7,00	0,06	1,91243
10,00	0,09	3,55972
15,00	0,13	3,55972
23,00	0,20	4,55693
35,00	0,30	4,83024
43,00	0,37	3,10998
50,00	0,43	2,68751
55,00	0,48	2,28920
63,00	0,55	2,09827
70,00	0,61	1,55499
75,00	0,65	1,55499
83,00	0,72	1,55499
90,00	0,78	1,55499
95,00	0,83	1,55499
100,00	0,87	1,55499
103,00	0,90	1,55499
107,00	0,93	1,55499
110,00	0,96	1,55499

Ensaio: 27
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,55499
5,00	0,04	2,09827
7,00	0,06	3,55972
10,00	0,09	2,89554
15,00	0,13	3,55972
23,00	0,20	4,83024
35,00	0,30	5,41129
43,00	0,37	4,83024
50,00	0,43	3,55972
55,00	0,48	3,55972
63,00	0,55	3,55972
70,00	0,61	2,89554
75,00	0,65	2,89554
83,00	0,72	2,68751
90,00	0,78	2,48551
95,00	0,83	2,48551
100,00	0,87	2,48551
103,00	0,90	2,28920
107,00	0,93	2,28920
110,00	0,96	2,28920

Ensaio: 28
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,55499
5,00	0,04	2,09827
7,00	0,06	2,68751
10,00	0,08	3,10998
15,00	0,12	3,55972
23,00	0,18	4,83024
35,00	0,28	5,41129
43,00	0,34	4,04050
50,00	0,40	3,79596
55,00	0,44	3,79596
63,00	0,50	3,33122
70,00	0,56	3,10998
75,00	0,60	2,48551
83,00	0,66	2,48551
90,00	0,72	2,48551
95,00	0,76	2,48551
100,00	0,80	2,48551
103,00	0,82	2,48551
107,00	0,86	2,48551
110,00	0,88	2,48551

Ensaio: 29
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 125
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,89081
5,00	0,04	1,73142
7,00	0,06	2,09827
10,00	0,08	2,89554
15,00	0,12	3,79596
23,00	0,18	4,83024
35,00	0,28	5,41129
43,00	0,34	5,72105
50,00	0,40	4,83024
55,00	0,44	4,83024
63,00	0,50	4,29393
70,00	0,56	3,79596
75,00	0,60	3,79596
83,00	0,66	3,55972
90,00	0,72	3,33122
95,00	0,76	3,10998
100,00	0,80	2,89554
103,00	0,82	2,89554
107,00	0,86	2,89554
110,00	0,88	2,89554

Ensaio: 30
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 135
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,55499
5,00	0,04	2,09827
7,00	0,05	2,89554
10,00	0,07	3,33122
15,00	0,11	3,79596
23,00	0,17	4,83024
35,00	0,26	5,41129
43,00	0,32	7,11944
50,00	0,37	7,51775
55,00	0,41	5,72105
63,00	0,47	5,41129
70,00	0,52	5,11471
75,00	0,56	5,11471
83,00	0,61	4,83024
90,00	0,67	4,55693
95,00	0,70	4,04050
100,00	0,74	3,55972
103,00	0,76	3,33122
107,00	0,79	3,10998
110,00	0,81	2,89554

Ensaio: 31
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	1,55499
3,00	0,04	1,73142
5,00	0,06	2,28920
7,00	0,08	3,10998
10,00	0,12	3,33122
15,00	0,18	3,55972
23,00	0,27	3,79596
25,00	0,29	4,04050
30,00	0,35	4,29393
35,00	0,41	4,83024
38,00	0,45	4,83024
43,00	0,51	4,55693
45,00	0,53	4,29393
50,00	0,59	3,79596
53,00	0,62	3,79596
56,00	0,66	3,79596
63,00	0,74	3,79596
70,00	0,82	3,55972
73,00	0,86	3,55972
80,00	0,94	2,89554

Ensaio: 32
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,91243
5,00	0,04	2,48551
7,00	0,06	2,89554
10,00	0,09	3,55972
15,00	0,13	3,79596
23,00	0,20	4,29393
35,00	0,30	4,55693
43,00	0,37	4,83024
50,00	0,43	5,41129
55,00	0,48	4,29393
63,00	0,55	4,29393
70,00	0,61	4,04050
75,00	0,65	3,79596
83,00	0,72	3,33122
90,00	0,78	3,33122
95,00	0,83	3,10998
100,00	0,87	3,10998
103,00	0,90	2,89554
107,00	0,93	2,68751
110,00	0,96	2,68751

Ensaio: 33
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 65,00 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,91243
5,00	0,04	2,48551
7,00	0,06	3,10998
10,00	0,09	3,55972
15,00	0,13	3,79596
23,00	0,20	4,29393
35,00	0,30	4,55693
43,00	0,37	4,83024
50,00	0,43	5,41129
55,00	0,48	6,38523
63,00	0,55	4,29393
70,00	0,61	3,79596
75,00	0,65	3,79596
83,00	0,72	3,55972
90,00	0,78	3,10998
95,00	0,83	2,89554
100,00	0,87	2,68751
103,00	0,90	2,68751
107,00	0,93	2,48551
110,00	0,96	2,48551

Ensaio: 34
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 70,00 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,91243
5,00	0,04	2,48551
7,00	0,06	3,33122
10,00	0,08	3,55972
15,00	0,12	4,04050
23,00	0,18	4,29393
35,00	0,28	4,83024
43,00	0,34	5,11471
50,00	0,40	5,72105
55,00	0,44	4,83024
63,00	0,50	4,83024
70,00	0,56	4,29393
75,00	0,60	4,04050
83,00	0,66	3,79596
90,00	0,72	3,55972
95,00	0,76	3,33122
100,00	0,80	3,10998
103,00	0,82	3,10998
107,00	0,86	3,10998
110,00	0,88	3,10998

Ensaio: 35
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 75,00 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	2,28920
5,00	0,04	2,89554
7,00	0,06	3,33122
10,00	0,08	3,79596
15,00	0,12	4,29393
23,00	0,18	4,83024
35,00	0,28	4,83024
43,00	0,34	5,11471
50,00	0,40	6,38523
55,00	0,44	4,83024
63,00	0,50	4,55693
70,00	0,56	4,04050
75,00	0,60	3,79596
83,00	0,66	3,33122
90,00	0,72	3,10998
95,00	0,76	3,10998
100,00	0,80	2,89554
103,00	0,82	2,89554
107,00	0,86	3,10998
110,00	0,88	3,10998

Ensaio: 35 repetição 1
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 75,00 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,93052
5,00	0,04	1,41130
7,00	0,06	2,40304
10,00	0,08	3,27525
15,00	0,12	4,43515
23,00	0,18	6,31301
35,00	0,28	6,24154
43,00	0,34	5,96276
50,00	0,40	5,56445
55,00	0,44	5,43658
63,00	0,50	5,00667
70,00	0,56	4,27246
75,00	0,60	3,75603
83,00	0,66	3,00194
90,00	0,72	2,00473
95,00	0,76	1,96612
100,00	0,80	1,92773
103,00	0,82	1,77623
107,00	0,86	1,59138
110,00	0,88	1,34056

Ensaio: 36
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 135
 Teor O2[%]: 80,00 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,05102
5,00	0,04	2,48551
7,00	0,05	3,10998
10,00	0,07	3,79596
15,00	0,11	3,79596
23,00	0,17	4,55693
35,00	0,26	4,55693
43,00	0,32	4,83024
50,00	0,37	5,11471
55,00	0,41	4,29393
63,00	0,47	3,79596
70,00	0,52	3,55972
75,00	0,56	3,55972
83,00	0,61	3,55972
90,00	0,67	3,55972
95,00	0,70	3,55972
100,00	0,74	3,33122
103,00	0,76	3,33122
107,00	0,79	3,10998
110,00	0,81	3,10998

Ensaio: 36 repetição 1
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 135
 Teor O2[%]: 80,00 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,86447
5,00	0,04	2,40304
7,00	0,05	2,91316
10,00	0,07	3,46360
15,00	0,11	4,16606
23,00	0,17	5,50022
35,00	0,26	6,83497
43,00	0,32	7,56918
50,00	0,37	6,83497
55,00	0,41	6,60647
63,00	0,47	5,82744
70,00	0,52	4,83024
75,00	0,56	3,85630
83,00	0,61	3,55972
90,00	0,67	3,46360
95,00	0,70	3,27525
100,00	0,74	3,09185
103,00	0,76	2,95741
107,00	0,79	2,82551
110,00	0,81	2,61107

Ensaio: 37
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 85
 Teor O2[%]: 50,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	0,73421
3,00	0,04	1,05102
5,00	0,06	1,38292
7,00	0,08	1,91243
10,00	0,12	2,48551
15,00	0,18	3,10998
23,00	0,27	3,33122
25,00	0,29	3,33122
30,00	0,35	3,55972
35,00	0,41	3,55972
38,00	0,45	3,55972
43,00	0,51	3,10998
45,00	0,53	2,89554
50,00	0,59	2,89554
53,00	0,62	2,68751
56,00	0,66	2,68751
63,00	0,74	2,48551
70,00	0,82	2,28920
73,00	0,86	2,28920
80,00	0,94	2,28920

Ensaio: 38
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 60,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,55499
5,00	0,04	1,91243
7,00	0,06	2,48551
10,00	0,09	2,89554
15,00	0,13	3,55972
23,00	0,20	3,55972
35,00	0,30	4,04050
43,00	0,37	4,04050
50,00	0,43	3,55972
55,00	0,48	3,33122
63,00	0,55	3,33122
70,00	0,61	3,10998
75,00	0,65	2,89554
83,00	0,72	2,89554
90,00	0,78	2,68751
95,00	0,83	2,48551
100,00	0,87	2,48551
103,00	0,90	2,28920
107,00	0,93	2,09827
110,00	0,96	2,09827

Ensaio: 39
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 Teor O2[%]: 65,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,21499
5,00	0,04	2,28920
7,00	0,06	3,10998
10,00	0,09	3,10998
15,00	0,13	3,33122
23,00	0,20	4,04050
35,00	0,30	4,29393
43,00	0,37	3,79596
50,00	0,43	3,55972
55,00	0,48	3,33122
63,00	0,55	3,33122
70,00	0,61	3,10998
75,00	0,65	3,10998
83,00	0,72	2,89554
90,00	0,78	2,68751
95,00	0,83	2,48551
100,00	0,87	2,48551
103,00	0,90	2,48551
107,00	0,93	2,48551
110,00	0,96	2,48551

Ensaio: 40
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 70,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,91243
5,00	0,04	2,68751
7,00	0,06	3,10998
10,00	0,08	3,55972
15,00	0,12	3,79596
23,00	0,18	4,29393
35,00	0,28	4,83024
43,00	0,34	5,11471
50,00	0,40	3,79596
55,00	0,44	3,79596
63,00	0,50	3,55972
70,00	0,56	3,55972
75,00	0,60	3,55972
83,00	0,66	3,10998
90,00	0,72	2,89554
95,00	0,76	2,89554
100,00	0,80	2,89554
103,00	0,82	2,68751
107,00	0,86	2,68751
110,00	0,88	2,68751

Ensaio: 41
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 75,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	2,09827
5,00	0,04	2,68751
7,00	0,06	3,55972
10,00	0,08	4,55693
15,00	0,12	4,83024
23,00	0,18	5,41129
35,00	0,28	5,72105
43,00	0,34	6,04523
50,00	0,40	5,41129
55,00	0,44	5,41129
63,00	0,50	5,41129
70,00	0,56	5,11471
75,00	0,60	5,11471
83,00	0,66	5,11471
90,00	0,72	4,83024
95,00	0,76	4,83024
100,00	0,80	4,29393
103,00	0,82	4,04050
107,00	0,86	3,55972
110,00	0,88	3,55972

Ensaio: 41 repetição1
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 Teor O2[%]: 75,00
 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	2,28114
5,00	0,04	2,82551
7,00	0,06	3,27525
10,00	0,08	3,85630
15,00	0,12	4,49024
23,00	0,18	5,31102
35,00	0,28	6,38523
43,00	0,34	7,15177
50,00	0,40	7,48367
55,00	0,44	7,83217
63,00	0,50	7,74340
70,00	0,56	7,15177
75,00	0,60	6,53194
83,00	0,66	5,69471
90,00	0,72	4,27246
95,00	0,76	3,65718
100,00	0,80	3,41603
103,00	0,82	3,22895
107,00	0,86	3,00194
110,00	0,88	2,73894

Ensaio: 42

Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=

Qc [l/h] 80,00 135

Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	2,48551
5,00	0,04	2,68751
7,00	0,05	3,55972
10,00	0,07	3,79596
15,00	0,11	4,29393
23,00	0,17	5,41129
35,00	0,26	6,04523
43,00	0,32	6,38523
50,00	0,37	5,72105
55,00	0,41	5,72105
63,00	0,47	5,41129
70,00	0,52	5,11471
75,00	0,56	4,83024
83,00	0,61	4,55693
90,00	0,67	4,29393
95,00	0,70	4,04050
100,00	0,74	4,04050
103,00	0,76	3,79596
107,00	0,79	3,79596
110,00	0,81	3,79596

Ensaio: 42 repetiçã
o1

Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=

Qc [l/h] 80,00 135

Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	2,82551
5,00	0,04	3,55972
7,00	0,05	4,38050
10,00	0,07	4,49024
15,00	0,11	4,71505
23,00	0,17	6,38523
35,00	0,26	6,83497
43,00	0,32	7,48367
50,00	0,37	8,01319
55,00	0,41	8,38996
63,00	0,47	8,29384
70,00	0,52	7,83217
75,00	0,56	6,83497
83,00	0,61	5,82744
90,00	0,67	5,06648
95,00	0,70	3,85630
100,00	0,74	3,51149
103,00	0,76	3,00194
107,00	0,79	2,56897
110,00	0,81	2,24097

Ensaio: 43

Var [m/s]: v3 Lf[mm]=

Qc [l/h] 50,00 90

Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	1,73142
3,00	0,03	1,73142
5,00	0,06	1,91243
7,00	0,08	2,28920
10,00	0,11	2,68751
15,00	0,17	3,55972
23,00	0,26	4,04050
25,00	0,28	4,04050
30,00	0,33	4,29393
35,00	0,39	4,83024
38,00	0,42	4,83024
43,00	0,48	5,11471
45,00	0,50	5,11471
50,00	0,56	4,83024
53,00	0,59	4,83024
56,00	0,62	4,55693
63,00	0,70	4,55693
70,00	0,78	4,29393
73,00	0,81	4,29393
80,00	0,89	4,29393

Ensaio: 44

Var [m/s]: v3 Lf[mm]=

Qc [l/h] 60,00 115

Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,28447
5,00	0,04	1,55499
7,00	0,06	2,09827
10,00	0,09	2,28920
15,00	0,13	2,89554
23,00	0,20	3,79596
35,00	0,30	4,29393
43,00	0,37	4,29393
50,00	0,43	4,29393
55,00	0,48	3,55972
63,00	0,55	3,10998
70,00	0,61	3,10998
75,00	0,65	2,89554
83,00	0,72	2,89554
90,00	0,78	2,89554
95,00	0,83	2,68751
100,00	0,87	2,68751
103,00	0,90	2,68751
107,00	0,93	2,48551
110,00	0,96	2,48551

Ensaio: 45

Var [m/s]: v3 Lf[mm]=

Qc [l/h] 65,00 125

Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,21499
5,00	0,04	1,91243
7,00	0,06	2,28920
10,00	0,08	2,68751
15,00	0,12	3,10998
23,00	0,18	3,55972
35,00	0,28	4,04050
43,00	0,34	4,29393
50,00	0,40	4,29393
55,00	0,44	4,04050
63,00	0,50	3,79596
70,00	0,56	3,55972
75,00	0,60	3,33122
83,00	0,66	3,10998
90,00	0,72	2,89554
95,00	0,76	2,89554
100,00	0,80	2,68751
103,00	0,82	2,68751
107,00	0,86	2,48551
110,00	0,88	2,48551

Ensaio: 46

Var [m/s]: v3 Lf[mm]=

Qc [l/h] 70,00 130

Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,21499
5,00	0,04	1,91243
7,00	0,05	2,68751
10,00	0,08	2,89554
15,00	0,12	3,33122
23,00	0,18	3,79596
35,00	0,27	3,79596
43,00	0,33	4,04050
50,00	0,38	4,29393
55,00	0,42	4,04050
63,00	0,48	3,79596
70,00	0,54	3,55972
75,00	0,58	3,10998
83,00	0,64	2,89554
90,00	0,69	2,89554
95,00	0,73	2,89554
100,00	0,77	2,89554
103,00	0,79	2,89554
107,00	0,82	2,89554
110,00	0,85	2,89554

Ensaio: 47
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 140
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,21499
5,00	0,04	1,91243
7,00	0,05	2,48551
10,00	0,07	3,10998
15,00	0,11	3,55972
23,00	0,16	4,04050
35,00	0,25	4,04050
43,00	0,31	4,55693
50,00	0,36	4,83024
55,00	0,39	4,29393
63,00	0,45	4,29393
70,00	0,50	4,04050
75,00	0,54	4,04050
83,00	0,59	3,79596
90,00	0,64	3,55972
95,00	0,68	3,33122
100,00	0,71	3,33122
103,00	0,74	3,33122
107,00	0,76	3,33122
110,00	0,79	3,33122

Ensaio: 48
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 145
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,21499
5,00	0,03	2,09827
7,00	0,05	2,89554
10,00	0,07	3,33122
15,00	0,10	3,79596
23,00	0,16	3,79596
35,00	0,24	4,29393
43,00	0,30	4,83024
50,00	0,34	5,11471
55,00	0,38	4,55693
63,00	0,43	4,29393
70,00	0,48	4,29393
75,00	0,52	4,29393
83,00	0,57	4,29393
90,00	0,62	4,04050
95,00	0,66	4,04050
100,00	0,69	4,04050
103,00	0,71	4,04050
107,00	0,74	3,79596
110,00	0,76	3,79596

Ensaio: 49
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	0,52327
3,00	0,04	0,65232
5,00	0,06	1,48125
7,00	0,08	2,50672
10,00	0,12	2,94514
15,00	0,18	3,41301
23,00	0,27	3,91456
25,00	0,29	3,91456
30,00	0,35	3,96676
35,00	0,41	4,01935
38,00	0,45	3,96676
43,00	0,51	3,91456
45,00	0,53	3,91456
50,00	0,59	3,31689
53,00	0,62	3,03624
56,00	0,66	2,67880
63,00	0,74	1,78102
70,00	0,82	1,05447
73,00	0,86	0,88408
80,00	0,94	0,58750

Ensaio: 50
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	1,19384
5,00	0,04	1,78102
7,00	0,06	2,54935
10,00	0,09	3,41301
15,00	0,13	4,62570
23,00	0,20	4,62570
35,00	0,30	4,39906
43,00	0,37	4,23379
50,00	0,43	4,07234
55,00	0,48	3,91456
63,00	0,55	3,70959
70,00	0,61	3,51047
75,00	0,65	3,03624
83,00	0,72	2,42226
90,00	0,78	1,93588
95,00	0,83	1,70486
100,00	0,87	1,48125
103,00	0,90	1,33606
107,00	0,93	1,19384
110,00	0,96	1,05447

Ensaio: 51
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,71369
5,00	0,04	2,32010
7,00	0,06	2,76411
10,00	0,09	3,43746
15,00	0,13	3,38715
23,00	0,20	3,96166
35,00	0,30	4,12693
43,00	0,37	4,18290
50,00	0,43	4,18290
55,00	0,48	4,18290
63,00	0,55	4,07140
70,00	0,61	3,96166
75,00	0,65	3,85362
83,00	0,72	3,04476
90,00	0,78	2,40667
95,00	0,83	2,06667
100,00	0,87	1,74250
103,00	0,90	1,54728
107,00	0,93	1,32003
110,00	0,96	1,13615

Ensaio: 52
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,25115
5,00	0,04	1,50889
7,00	0,06	2,58310
10,00	0,08	3,43746
15,00	0,12	4,76884
23,00	0,18	5,27587
35,00	0,28	5,01774
43,00	0,34	4,89218
50,00	0,40	4,64764
55,00	0,44	4,52852
63,00	0,50	4,12693
70,00	0,56	3,80022
75,00	0,60	3,59062
83,00	0,66	2,76411
90,00	0,72	2,06667
95,00	0,76	1,66375
100,00	0,80	1,28286
103,00	0,82	1,13615
107,00	0,86	0,99246
110,00	0,88	0,78234

Ensaio: 53
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 135
 75,00
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,75003
5,00	0,04	1,77165
7,00	0,05	2,46522
10,00	0,07	3,37263
15,00	0,11	3,89972
23,00	0,17	4,25716
35,00	0,26	4,68945
43,00	0,32	4,68945
50,00	0,37	4,74543
55,00	0,41	4,63393
63,00	0,47	4,52418
70,00	0,52	4,30975
75,00	0,56	3,99999
83,00	0,61	3,51247
90,00	0,67	2,88263
95,00	0,70	2,34473
100,00	0,74	1,55499
103,00	0,76	1,55499
107,00	0,79	1,41421
110,00	0,81	1,34487

Ensaio: 54
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 145
 80,00
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	0,44974
5,00	0,03	2,52116
7,00	0,05	2,70217
10,00	0,07	3,68528
15,00	0,10	4,00946
23,00	0,16	4,52589
35,00	0,24	4,95580
43,00	0,30	5,21393
50,00	0,34	5,34666
55,00	0,38	5,34666
63,00	0,43	5,27998
70,00	0,48	5,08367
75,00	0,52	4,58570
83,00	0,57	3,95437
90,00	0,62	3,37552
95,00	0,66	2,79447
100,00	0,69	2,25816
103,00	0,71	1,60181
107,00	0,74	1,52395
110,00	0,76	1,14718

Ensaio: 55
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 85
 50,00
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	0,71776
3,00	0,04	0,98581
5,00	0,06	1,78102
7,00	0,08	2,59223
10,00	0,12	3,22208
15,00	0,18	3,60932
23,00	0,27	3,96676
25,00	0,29	4,01935
30,00	0,35	4,23379
35,00	0,41	4,17955
38,00	0,45	4,01935
43,00	0,51	3,70959
45,00	0,53	3,60932
50,00	0,59	3,31689
53,00	0,62	3,03624
56,00	0,66	2,76645
63,00	0,74	1,85802
70,00	0,82	1,40828
73,00	0,86	1,26459
80,00	0,94	1,05447

Ensaio: 56
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 60,00
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,61227
5,00	0,04	1,60401
7,00	0,06	2,66456
10,00	0,09	3,36703
15,00	0,13	3,69121
23,00	0,20	3,97337
35,00	0,30	4,14832
43,00	0,37	4,14832
50,00	0,43	4,03120
55,00	0,48	3,91602
63,00	0,55	3,69121
70,00	0,61	3,36703
75,00	0,65	3,15900
83,00	0,72	2,76068
90,00	0,78	2,47621
95,00	0,83	2,11413
100,00	0,87	1,85440
103,00	0,90	2,11413
107,00	0,93	1,36230
110,00	0,96	1,12869

Ensaio: 57
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 115
 65,00
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,03	0,55286
5,00	0,04	1,51084
7,00	0,06	2,36839
10,00	0,09	3,06583
15,00	0,13	3,54006
23,00	0,20	3,73918
35,00	0,30	4,48462
43,00	0,37	4,48462
50,00	0,43	4,42865
55,00	0,48	4,37312
63,00	0,55	3,63891
70,00	0,61	3,39437
75,00	0,65	3,20474
83,00	0,72	2,79604
90,00	0,78	2,49395
95,00	0,83	2,28592
100,00	0,87	1,88761
103,00	0,90	1,81061
107,00	0,93	1,43787
110,00	0,96	1,22343

Ensaio: 58
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 125
 70,00
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,65911
5,00	0,04	2,53631
7,00	0,06	3,29891
10,00	0,08	4,10193
15,00	0,12	4,31803
23,00	0,18	4,54104
35,00	0,28	4,71312
43,00	0,34	4,71312
50,00	0,40	4,59793
55,00	0,44	4,54104
63,00	0,50	4,37312
70,00	0,56	4,04894
75,00	0,60	3,94415
83,00	0,66	3,54006
90,00	0,72	3,25167
95,00	0,76	2,88482
100,00	0,80	2,66497
103,00	0,82	2,45185
107,00	0,86	2,20442
110,00	0,88	1,81061

Ensaio: 59
Var [m/s]: v3 Lf[mm]=

Qc [l/h] 135
75,00
Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,24522
5,00	0,04	2,62260
7,00	0,05	3,61271
10,00	0,07	4,52047
15,00	0,11	4,70467
23,00	0,17	4,95810
35,00	0,26	5,08836
43,00	0,32	5,02293
50,00	0,37	4,89388
55,00	0,41	4,83024
63,00	0,47	4,58133
70,00	0,52	4,22389
75,00	0,56	4,05182
83,00	0,61	3,61271
90,00	0,67	3,35169
95,00	0,70	2,95338
100,00	0,74	2,57660
103,00	0,76	2,30682
107,00	0,79	2,04709
110,00	0,81	1,87917

Ensaio: 60
Var [m/s]: v3 Lf[mm]=

Qc [l/h] 145
80,00
Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
3,00	0,02	1,32138
5,00	0,03	2,21916
7,00	0,05	3,45493
10,00	0,07	4,46014
15,00	0,10	4,95810
23,00	0,16	5,08836
35,00	0,24	5,22110
43,00	0,30	5,22110
50,00	0,34	5,08836
55,00	0,38	4,95810
63,00	0,43	4,64273
70,00	0,48	4,34102
75,00	0,52	4,22389
83,00	0,57	3,66611
90,00	0,62	3,35169
95,00	0,66	2,95338
100,00	0,69	2,48551
103,00	0,71	2,39559
107,00	0,74	2,13260
110,00	0,76	1,87917

Ensaio: 61
Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=

Qc [l/h] 75
50,00
Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	6,55730
3,00	0,04	7,74125
5,00	0,07	1,94830
7,00	0,09	1,15255
10,00	0,13	1,00375
15,00	0,20	0,95484
18,00	0,24	0,90628
23,00	0,31	0,90628
25,00	0,33	0,85806
30,00	0,40	0,81016
35,00	0,47	0,81016
38,00	0,51	0,81016
43,00	0,57	0,81016
45,00	0,60	0,81016
50,00	0,67	0,81016
52,00	0,69	0,81016
53,00	0,71	0,81016
55,00	0,73	0,81016
56,00	0,75	0,81016
60,00	0,80	0,81016

Ensaio: 61 Rept.1
Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=

Qc [l/h] 50,00 75
Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	2,63458
3,00	0,04	2,92297
5,00	0,07	3,43185
7,00	0,09	3,75603
10,00	0,13	3,12209
15,00	0,20	2,54104
18,00	0,24	2,31254
23,00	0,31	2,00473
25,00	0,33	1,83476
30,00	0,40	1,54693
35,00	0,47	1,34838
38,00	0,51	1,27052
43,00	0,57	1,15533
45,00	0,60	1,11736
50,00	0,67	1,04202
52,00	0,69	1,04202
53,00	0,71	1,00466
55,00	0,73	1,00466
56,00	0,75	0,96749
60,00	0,80	0,96749

Ensaio: 62
Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=

Qc [l/h] 60,00 80
Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	2,26127
3,00	0,04	5,44422
5,00	0,06	3,96297
7,00	0,09	3,25848
10,00	0,13	2,61871
15,00	0,19	2,03277
18,00	0,23	1,75730
23,00	0,29	1,44049
25,00	0,31	1,33801
30,00	0,38	1,13746
35,00	0,44	0,99075
38,00	0,48	0,94253
43,00	0,54	0,89463
45,00	0,56	0,89463
50,00	0,63	0,84706
52,00	0,65	0,84706
53,00	0,66	0,84706
55,00	0,69	0,84706
56,00	0,70	0,84706
60,00	0,75	0,84706

Ensaio: 62 Rept.1
Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=

Qc [l/h] 60,00 80
Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	4,21315
3,00	0,04	4,70237
5,00	0,06	6,41756
7,00	0,09	4,70237
10,00	0,13	3,64629
15,00	0,19	2,63458
18,00	0,23	2,31254
23,00	0,29	2,09130
25,00	0,31	2,04788
30,00	0,38	1,91922
35,00	0,44	1,83476
38,00	0,48	1,83476
43,00	0,54	1,83476
45,00	0,56	1,79290
50,00	0,63	1,79290
52,00	0,65	1,75130
53,00	0,66	1,75130
55,00	0,69	1,66883
56,00	0,70	1,66883
60,00	0,75	1,66883

Ensaio: 63
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 85
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	5,22855
3,00	0,04	6,00846
5,00	0,06	5,31102
7,00	0,08	4,90810
10,00	0,12	4,67708
15,00	0,18	3,95803
18,00	0,21	3,43185
23,00	0,27	3,18295
25,00	0,29	2,94263
30,00	0,35	2,54104
35,00	0,41	2,21433
38,00	0,45	2,10874
43,00	0,51	1,95330
45,00	0,53	1,90225
50,00	0,59	1,80125
53,00	0,62	1,75130
56,00	0,66	1,65245
60,00	0,71	1,55499
63,00	0,74	1,45887
70,00	0,82	1,41130

Ensaio: 64
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 90
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	3,43185
3,00	0,03	4,09603
5,00	0,06	4,83024
7,00	0,08	5,65102
10,00	0,11	5,06648
15,00	0,17	4,38050
18,00	0,20	4,09603
23,00	0,26	3,55972
25,00	0,28	3,43185
30,00	0,33	3,06175
35,00	0,39	2,59701
38,00	0,42	2,37577
43,00	0,48	2,16133
45,00	0,50	2,05654
50,00	0,56	1,90225
53,00	0,59	1,85157
56,00	0,62	1,80125
60,00	0,67	1,65245
63,00	0,70	1,55499
70,00	0,78	1,55499

Ensaio: 65
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 95
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	2,98948
3,00	0,03	3,50591
5,00	0,05	4,67003
7,00	0,07	5,51064
10,00	0,11	6,16588
15,00	0,16	5,42186
18,00	0,19	4,99421
23,00	0,24	4,51343
25,00	0,26	4,43643
30,00	0,32	4,06369
35,00	0,37	3,50591
38,00	0,40	3,30774
43,00	0,45	2,86614
45,00	0,47	2,74495
50,00	0,53	2,45087
53,00	0,56	2,28020
56,00	0,59	2,16870
60,00	0,63	2,11362
63,00	0,66	1,95092
70,00	0,74	1,95092

Ensaio: 66
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 105
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	3,24291
3,00	0,03	4,36027
5,00	0,05	7,33894
7,00	0,07	8,60946
10,00	0,10	7,81972
15,00	0,14	6,67476
18,00	0,17	5,87749
23,00	0,22	5,16214
25,00	0,24	4,83024
30,00	0,29	4,36027
35,00	0,33	3,77922
38,00	0,36	3,57324
43,00	0,41	3,24291
45,00	0,43	3,11504
50,00	0,48	2,86614
53,00	0,50	2,74495
56,00	0,53	2,62582
60,00	0,57	2,50870
63,00	0,60	2,39352
70,00	0,67	2,39352

Ensaio: 67
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 70
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	5,85185
3,00	0,04	7,04940
5,00	0,07	10,3246
7,00	0,10	9,66048
10,00	0,14	8,36361
15,00	0,21	6,62694
18,00	0,26	5,67084
23,00	0,33	5,15442
25,00	0,36	4,00946
30,00	0,43	3,66611
35,00	0,50	2,38443
38,00	0,54	2,21916
43,00	0,61	1,95214
45,00	0,64	1,84813
50,00	0,71	1,59470
52,00	0,74	1,44695
53,00	0,76	1,39639
55,00	0,79	1,16053
56,00	0,80	1,02162
60,00	0,86	0,97592

Ensaio: 68
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 85
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	4,91271
3,00	0,04	5,98692
5,00	0,06	8,52795
7,00	0,08	11,21546
10,00	0,12	13,08488
15,00	0,18	8,66874
18,00	0,21	7,61487
23,00	0,27	5,79598
25,00	0,29	5,42913
30,00	0,35	3,98219
35,00	0,41	3,35772
38,00	0,45	3,16141
43,00	0,51	2,66344
45,00	0,53	2,54432
50,00	0,59	2,08720
52,00	0,61	1,86941
53,00	0,62	1,76302
55,00	0,65	1,55499
56,00	0,66	1,35299
60,00	0,71	0,77991

Ensaio: 69
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 90
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	4,27876
3,00	0,03	5,61014
5,00	0,06	14,24900
7,00	0,08	12,08767
10,00	0,11	9,41877
15,00	0,17	7,02894
18,00	0,20	6,38523
23,00	0,26	4,99616
25,00	0,28	4,50979
30,00	0,33	3,83850
35,00	0,39	3,22623
38,00	0,42	3,03354
43,00	0,48	2,66344
45,00	0,50	2,54432
50,00	0,56	1,97746
52,00	0,58	1,76302
53,00	0,59	1,65823
55,00	0,61	1,35299
56,00	0,62	1,25414
60,00	0,67	0,68881

Ensaio: 72
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 95
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	3,22382
3,00	0,03	4,09603
5,00	0,05	5,27425
7,00	0,07	6,69304
10,00	0,11	8,47652
15,00	0,16	11,75177
23,00	0,24	8,47652
25,00	0,26	7,91874
30,00	0,32	6,69304
35,00	0,37	5,84733
38,00	0,40	5,09323
43,00	0,45	4,41283
45,00	0,47	4,25263
50,00	0,53	3,64629
53,00	0,56	3,29248
56,00	0,59	3,08850
63,00	0,66	2,38788
70,00	0,74	1,86280
73,00	0,77	1,64156
80,00	0,84	1,21909

Ensaio: 70
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 90
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	4,49834
3,00	0,03	5,73652
5,00	0,06	7,24328
7,00	0,08	6,77854
10,00	0,11	6,34286
15,00	0,17	5,64040
18,00	0,20	5,26866
23,00	0,26	4,74577
25,00	0,28	4,66231
30,00	0,33	4,18153
35,00	0,39	3,73179
38,00	0,42	3,65958
43,00	0,48	3,30932
45,00	0,50	3,17401
50,00	0,56	2,91101
52,00	0,58	2,78315
53,00	0,59	2,72008
55,00	0,61	2,65758
56,00	0,62	2,59564
60,00	0,67	2,53424

Ensaio: 73
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 60
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	3,55972
3,00	0,05	7,94022
5,00	0,08	11,2154
7,00	0,12	8,87074
10,00	0,17	2,68751
15,00	0,25	2,68751
18,00	0,30	1,55499
23,00	0,38	1,55499
25,00	0,42	1,21499
30,00	0,50	0,89081
35,00	0,58	0,58105
38,00	0,63	0,28447
43,00	0,72	0,28447
45,00	0,75	0,28447
50,00	0,83	0,28447
52,00	0,87	0,28447
53,00	0,88	0,28447
55,00	0,92	0,28447
56,00	0,93	0,28447
60,00	1,00	0,28447

Ensaio: 71
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 95
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	2,78154
3,00	0,03	3,47206
5,00	0,05	5,00893
7,00	0,07	6,08314
10,00	0,11	8,01783
15,00	0,16	11,57755
23,00	0,24	9,06885
25,00	0,26	8,30230
30,00	0,32	6,98356
35,00	0,37	5,87510
38,00	0,40	5,28586
43,00	0,45	4,57051
45,00	0,47	4,40258
50,00	0,53	3,69331
53,00	0,56	3,47206
56,00	0,59	2,91428
63,00	0,66	2,33591
70,00	0,74	1,74500
73,00	0,77	1,52199
80,00	0,84	0,99381

Ensaio: 73 Repet.1
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 60
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	5,79773
3,00	0,05	5,94760
5,00	0,08	6,41756
7,00	0,12	4,96050
10,00	0,17	4,33227
15,00	0,25	3,43185
18,00	0,30	3,12209
23,00	0,38	2,63458
25,00	0,42	2,54104
30,00	0,50	2,17895
35,00	0,58	2,09130
38,00	0,63	2,00473
43,00	0,72	1,91922
45,00	0,75	1,91922
50,00	0,83	1,87686
52,00	0,87	1,87686
53,00	0,88	1,87686
55,00	0,92	1,83476
56,00	0,93	1,83476
60,00	1,00	1,83476

Ensaio: 74
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 65
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	3,38329
3,00	0,05	5,99436
5,00	0,08	9,14405
7,00	0,11	15,04850
10,00	0,15	6,65854
15,00	0,23	2,96082
18,00	0,28	2,56251
23,00	0,35	2,56251
25,00	0,38	1,82830
30,00	0,46	1,48830
35,00	0,54	1,16413
38,00	0,58	1,00752
43,00	0,66	0,70449
45,00	0,69	0,55778
50,00	0,77	0,41410
52,00	0,80	0,41410
53,00	0,82	0,41410
55,00	0,85	0,41410
56,00	0,86	0,41410
60,00	0,92	0,41410

Ensaio: 74 Repet. 1
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 65
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	4,83024
3,00	0,05	5,65102
5,00	0,08	5,87226
7,00	0,11	5,43658
10,00	0,15	5,09323
15,00	0,23	4,39261
18,00	0,28	4,09603
23,00	0,35	3,48485
25,00	0,38	3,32706
30,00	0,46	2,92297
35,00	0,54	2,72939
38,00	0,58	2,63458
43,00	0,66	2,40304
45,00	0,69	2,35764
50,00	0,77	2,22320
52,00	0,80	2,22320
53,00	0,82	2,17895
55,00	0,85	2,17895
56,00	0,86	2,09130
60,00	0,92	2,09130

Ensaio: 75
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 70
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	2,68751
3,00	0,04	6,38523
5,00	0,07	11,21546
7,00	0,10	8,87074
10,00	0,14	4,55693
15,00	0,21	1,55499
18,00	0,26	1,21499
23,00	0,33	0,89081
25,00	0,36	0,73421
30,00	0,43	0,58105
35,00	0,50	0,58105
38,00	0,54	0,58105
43,00	0,61	0,43118
45,00	0,64	0,43118
50,00	0,71	0,43118
52,00	0,74	0,28447
53,00	0,76	0,28447
55,00	0,79	0,28447
56,00	0,80	0,28447
60,00	0,86	0,28447

Ensaio: 76
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 75
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	4,55693
3,00	0,04	6,65854
5,00	0,07	8,21353
7,00	0,09	11,48878
10,00	0,13	5,38802
15,00	0,20	3,83303
18,00	0,24	3,83303
23,00	0,31	1,82830
25,00	0,33	1,48830
30,00	0,40	1,32433
35,00	0,47	1,00752
38,00	0,51	0,85436
43,00	0,57	0,85436
45,00	0,60	0,70449
50,00	0,67	0,70449
53,00	0,71	0,70449
56,00	0,75	0,55778
60,00	0,80	0,55778
63,00	0,84	0,55778
70,00	0,93	0,55778

Ensaio: 77
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 85
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	2,68751
3,00	0,04	4,04050
5,00	0,06	5,11471
7,00	0,08	7,11944
10,00	0,12	7,94022
15,00	0,18	4,55693
23,00	0,27	3,55972
25,00	0,29	3,55972
30,00	0,35	2,28920
35,00	0,41	1,55499
38,00	0,45	1,55499
43,00	0,51	1,21499
45,00	0,53	0,89081
50,00	0,59	0,73421
53,00	0,62	0,73421
56,00	0,66	0,58105
63,00	0,74	0,58105
70,00	0,82	0,58105
73,00	0,86	0,43118
80,00	0,94	0,43118

Ensaio: 78
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 95
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	3,10996
3,00	0,03	4,55693
5,00	0,05	6,38523
7,00	0,07	8,38996
10,00	0,11	9,94495
15,00	0,16	4,83024
23,00	0,24	3,55972
25,00	0,26	3,55972
30,00	0,32	3,33122
35,00	0,37	1,55499
38,00	0,40	1,55499
43,00	0,45	1,05102
45,00	0,47	0,89081
50,00	0,53	0,73421
53,00	0,56	0,73421
56,00	0,59	0,73421
63,00	0,66	0,43118
70,00	0,74	0,43118
73,00	0,77	0,28447
80,00	0,84	0,28447

Ensaio: 79
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 70
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	4,83024
3,00	0,04	4,99421
5,00	0,07	4,51343
7,00	0,10	4,21040
10,00	0,14	3,64122
15,00	0,21	2,74495
18,00	0,26	2,50870
23,00	0,33	2,11362
25,00	0,36	1,95092
30,00	0,43	1,63649
35,00	0,50	1,53476
38,00	0,54	1,43449
43,00	0,61	1,33565
45,00	0,64	1,28674
50,00	0,71	1,23818
52,00	0,74	1,23818
53,00	0,76	1,23818
55,00	0,79	1,23818
56,00	0,80	1,23818
60,00	0,86	1,23818

Ensaio: 80
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 75
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	5,65102
3,00	0,04	6,06511
5,00	0,07	4,09603
7,00	0,09	3,28717
10,00	0,13	2,47701
15,00	0,20	1,67514
18,00	0,24	1,37856
23,00	0,31	0,95609
25,00	0,33	0,88811
30,00	0,40	0,75409
35,00	0,47	0,55778
38,00	0,51	0,49356
43,00	0,57	0,36685
45,00	0,60	0,30435
50,00	0,67	0,18101
52,00	0,69	0,12015
53,00	0,71	0,12015
55,00	0,73	0,05982
56,00	0,75	0,05982
60,00	0,80	0,05982

Ensaio: 80 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 75
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	5,94496
3,00	0,04	7,10263
5,00	0,07	4,36159
7,00	0,09	2,97867
10,00	0,13	2,27239
15,00	0,20	1,47965
18,00	0,24	1,11472
23,00	0,31	0,70063
25,00	0,33	0,56789
30,00	0,40	0,40544
35,00	0,47	0,30976
38,00	0,51	0,30976
43,00	0,57	0,30976
45,00	0,60	0,30976
50,00	0,67	0,30976
52,00	0,69	0,30976
53,00	0,71	0,30976
55,00	0,73	0,30976
56,00	0,75	0,30976
60,00	0,80	0,30976

Ensaio: 81
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 85
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	7,11044
3,00	0,04	6,67476
5,00	0,06	5,87749
7,00	0,08	5,51064
10,00	0,12	4,99421
15,00	0,18	4,13666
18,00	0,21	3,50591
23,00	0,27	2,98948
25,00	0,29	2,68513
30,00	0,35	2,16870
35,00	0,41	1,63649
38,00	0,45	1,63649
43,00	0,51	1,53476
45,00	0,53	1,48445
50,00	0,59	1,38489
53,00	0,62	1,33565
56,00	0,66	1,28674
60,00	0,71	1,23818
63,00	0,74	1,18996
70,00	0,82	1,09450

Ensaio: 82
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 90
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	8,60946
3,00	0,03	8,60946
5,00	0,06	7,69638
7,00	0,08	7,33894
10,00	0,11	5,69165
15,00	0,17	3,92000
18,00	0,20	2,98948
23,00	0,26	2,28020
25,00	0,28	2,28020
30,00	0,33	2,22423
35,00	0,39	2,16870
38,00	0,42	2,11362
43,00	0,48	2,05896
45,00	0,50	2,05896
50,00	0,56	2,00473
53,00	0,59	2,00473
56,00	0,62	1,95092
60,00	0,67	1,95092
63,00	0,70	1,95092
70,00	0,78	1,89752

Ensaio: 83
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 95
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	7,57518
3,00	0,03	9,04064
5,00	0,05	8,89393
7,00	0,07	8,07315
10,00	0,11	7,22375
15,00	0,16	6,06842
18,00	0,19	5,51064
23,00	0,24	4,67003
25,00	0,26	4,36027
30,00	0,32	3,77922
35,00	0,37	3,11504
38,00	0,40	2,86614
43,00	0,45	2,39352
45,00	0,47	2,16870
50,00	0,53	1,95092
53,00	0,56	1,84453
56,00	0,59	1,84453
60,00	0,63	1,79199
63,00	0,66	1,73973
70,00	0,74	1,73973

Ensaio: 84
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 100
 Teor O2[%]: 21

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	9,40705
3,00	0,03	9,92347
5,00	0,05	9,40705
7,00	0,07	9,08287
10,00	0,10	8,47652
15,00	0,15	7,65575
18,00	0,18	7,15778
23,00	0,23	6,36375
25,00	0,25	6,25736
30,00	0,30	5,46008
35,00	0,35	5,00446
38,00	0,38	4,74473
43,00	0,43	4,25263
45,00	0,45	4,25263
50,00	0,50	3,79300
53,00	0,53	3,57407
56,00	0,56	3,36182
60,00	0,60	3,08850
63,00	0,63	2,95577
70,00	0,70	2,69764

Ensaio: 87
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 65
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	13,04377
3,00	0,05	11,48878
5,00	0,08	4,83024
7,00	0,11	3,38329
10,00	0,15	2,96082
15,00	0,23	2,75882
18,00	0,28	2,56251
23,00	0,35	2,37158
25,00	0,38	2,18574
30,00	0,46	1,82830
35,00	0,54	1,48830
38,00	0,58	1,32433
43,00	0,66	1,16413
45,00	0,69	1,16413
50,00	0,77	1,16413
52,00	0,80	1,00752
53,00	0,82	1,00752
55,00	0,85	0,85436
56,00	0,86	0,85436
60,00	0,92	0,70449

Ensaio: 85
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 65
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	11,2154
3,00	0,05	8,87074
5,00	0,08	2,68751
7,00	0,11	0,58105
10,00	0,15	0,58105
15,00	0,23	0,58105
18,00	0,28	0,58105
23,00	0,35	0,58105
25,00	0,38	0,58105
30,00	0,46	0,58105
35,00	0,54	0,28447
38,00	0,58	0,28447
43,00	0,66	0,28447
45,00	0,69	0,28447
50,00	0,77	0,28447
52,00	0,80	0,28447
53,00	0,82	0,28447
55,00	0,85	0,28447
56,00	0,86	0,28447
60,00	0,92	0,28447

Ensaio: 87 Repet.1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 65
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	11,7517 7
3,00	0,05	12,4859 8
5,00	0,08	9,40705
7,00	0,11	7,85206
10,00	0,15	6,10076
15,00	0,23	3,98084
18,00	0,28	3,12209
23,00	0,35	2,09130
25,00	0,38	1,96185
30,00	0,46	1,91922
35,00	0,54	1,87686
38,00	0,58	1,83476
43,00	0,66	1,83476
45,00	0,69	1,79290
50,00	0,77	1,79290
52,00	0,80	1,75130
53,00	0,82	1,75130
55,00	0,85	1,75130
56,00	0,86	1,70994
60,00	0,92	1,70994

Ensaio: 86
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 65
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	13,04377
3,00	0,05	6,65854
5,00	0,08	1,82830
7,00	0,11	1,65623
10,00	0,15	1,48830
15,00	0,23	1,32433
18,00	0,28	1,32433
23,00	0,35	1,32433
25,00	0,38	1,16413
30,00	0,46	1,16413
35,00	0,54	1,00752
38,00	0,58	1,00752
43,00	0,66	0,85436
45,00	0,69	0,85436
50,00	0,77	0,70449
52,00	0,80	0,70449
53,00	0,82	0,55778
55,00	0,85	0,55778
56,00	0,86	0,55778
60,00	0,92	0,55778

Ensaio: 88
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 75
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	4,83024
3,00	0,04	6,65854
5,00	0,07	10,21826
7,00	0,09	2,96082
10,00	0,13	1,82830
15,00	0,20	1,32433
18,00	0,24	1,16413
23,00	0,31	1,00752
25,00	0,33	1,00752
30,00	0,40	1,16413
35,00	0,47	1,16413
38,00	0,51	1,32433
43,00	0,57	1,48830
45,00	0,60	1,48830
50,00	0,67	1,16413
53,00	0,71	1,16413
56,00	0,75	1,16413
60,00	0,80	1,00752
63,00	0,84	1,00752
70,00	0,93	1,00752

Ensaio: 88 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 75
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	15,31149
3,00	0,04	14,31428
5,00	0,07	12,30955
7,00	0,09	7,47932
10,00	0,13	3,88484
15,00	0,20	1,75130
18,00	0,24	1,45153
23,00	0,31	1,23487
25,00	0,33	1,16413
30,00	0,40	1,02475
35,00	0,47	0,88811
38,00	0,51	0,82078
43,00	0,57	0,68804
45,00	0,60	0,65525
50,00	0,67	0,62261
53,00	0,71	0,55778
56,00	0,75	0,55778
60,00	0,80	0,49356
63,00	0,84	0,49356
70,00	0,93	0,49356

Ensaio: 89 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 85
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	3,10998
3,00	0,04	8,38996
5,00	0,06	13,7009
7,00	0,08	6,38523
10,00	0,12	4,04050
15,00	0,18	3,79596
23,00	0,27	3,79596
25,00	0,29	3,55972
30,00	0,35	3,10998
35,00	0,41	3,10998
38,00	0,45	2,89554
43,00	0,51	2,68751
45,00	0,53	2,28920
50,00	0,59	1,91243
53,00	0,62	0,89081
56,00	0,66	0,73421
63,00	0,74	0,73421
70,00	0,82	0,58105
73,00	0,86	0,58105
80,00	0,94	0,43118

Ensaio: 89 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 85
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	11,33562
3,00	0,04	17,87400
5,00	0,06	6,65854
7,00	0,08	5,78633
10,00	0,12	4,89005
15,00	0,18	4,65381
23,00	0,27	3,98963
25,00	0,29	3,88484
30,00	0,35	3,57960
35,00	0,41	3,28717
38,00	0,45	3,09882
43,00	0,51	2,91543
45,00	0,53	2,64908
50,00	0,59	2,30908
53,00	0,62	2,06455
56,00	0,66	1,90616
63,00	0,74	1,90616
70,00	0,82	1,82830
73,00	0,86	1,75130
80,00	0,94	1,37856

Ensaio: 90 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 95
 Teor O2[%]: 23

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,02	1,21499
3,00	0,03	2,68751
5,00	0,05	4,04050
7,00	0,07	7,94022
10,00	0,11	7,94022
15,00	0,16	6,38523
23,00	0,24	6,38523
25,00	0,26	6,38523
30,00	0,32	6,38523
35,00	0,37	5,72105
38,00	0,40	5,41129
43,00	0,45	5,11471
45,00	0,47	4,83024
50,00	0,53	4,55693
53,00	0,56	4,55693
56,00	0,59	3,55972
63,00	0,66	2,48551
70,00	0,74	1,38292
73,00	0,77	1,05102
80,00	0,84	0,89081

Ensaio: 91 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 60
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	17,7910
3,00	0,05	7,13336
5,00	0,08	4,30785
7,00	0,12	2,59970
10,00	0,17	1,69194
15,00	0,25	1,69194
18,00	0,30	1,48235
23,00	0,38	1,32918
25,00	0,42	1,27887
30,00	0,50	1,17932
35,00	0,58	1,08117
38,00	0,63	1,03260
43,00	0,72	0,93649
45,00	0,75	0,93649
50,00	0,83	0,84167
52,00	0,87	0,79475
53,00	0,88	0,79475
55,00	0,92	0,74813
56,00	0,93	0,65583
60,00	1,00	0,61014

Ensaio: 92 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 65
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	10,50215
3,00	0,05	9,95887
5,00	0,08	1,85338
7,00	0,11	1,27887
10,00	0,15	1,22892
15,00	0,23	1,17932
18,00	0,28	1,13007
23,00	0,35	1,08117
25,00	0,38	1,08117
30,00	0,46	1,08117
35,00	0,54	1,03260
38,00	0,58	1,03260
43,00	0,66	0,98438
45,00	0,69	0,98438
50,00	0,77	0,93649
52,00	0,80	0,93649
53,00	0,82	0,93649
55,00	0,85	0,88892
56,00	0,86	0,88892
60,00	0,92	0,88892

Ensaio: 92 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 65
 Teor O2[%]: 25

Y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	13,09233
3,00	0,05	12,48598
5,00	0,08	9,40705
7,00	0,11	7,85206
10,00	0,15	6,66499
15,00	0,23	4,70237
18,00	0,28	3,86753
23,00	0,35	3,02182
25,00	0,38	2,77728
30,00	0,46	2,35764
35,00	0,54	2,04788
38,00	0,58	1,91922
43,00	0,66	1,66883
45,00	0,69	1,66883
50,00	0,77	1,66883
52,00	0,80	1,66883
53,00	0,82	1,62796
55,00	0,85	1,62796
56,00	0,86	1,58733
60,00	0,92	1,58733

Ensaio: 93 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 65
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	10,48125
3,00	0,05	4,09603
5,00	0,08	4,09603
7,00	0,11	3,64629
10,00	0,15	3,43185
15,00	0,23	3,22382
18,00	0,28	3,02182
23,00	0,35	2,82551
25,00	0,38	2,63458
30,00	0,46	2,44874
35,00	0,54	2,09130
38,00	0,58	1,11736
43,00	0,66	0,82078
45,00	0,69	0,53631
50,00	0,77	0,53631
52,00	0,80	0,53631
53,00	0,82	0,53631
55,00	0,85	0,53631
56,00	0,86	0,53631
60,00	0,92	0,53631

Ensaio: 93 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 65
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	12,36886
3,00	0,05	12,19679
5,00	0,08	10,27757
7,00	0,11	7,89606
10,00	0,15	5,84564
15,00	0,23	3,73918
18,00	0,28	2,88482
23,00	0,35	2,12385
25,00	0,38	2,04421
30,00	0,46	1,65911
35,00	0,54	1,43787
38,00	0,58	1,32983
43,00	0,66	1,08406
45,00	0,69	1,01540
50,00	0,77	0,81340
52,00	0,80	0,78030
53,00	0,82	0,74735
55,00	0,85	0,74735
56,00	0,86	0,74735
60,00	0,92	0,74735

Ensaio: 94 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 65
 Teor O2[%]: 25

Y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	7,94022
3,00	0,05	12,77045
5,00	0,08	6,38523
7,00	0,11	5,11471
10,00	0,15	5,11471
15,00	0,23	4,55693
18,00	0,28	4,04050
23,00	0,35	4,04050
25,00	0,38	4,04050
30,00	0,46	3,55972
35,00	0,54	0,58105
38,00	0,58	0,58105
43,00	0,66	0,58105
45,00	0,69	0,58105
50,00	0,77	0,28447
52,00	0,80	0,28447
53,00	0,82	0,28447
55,00	0,85	0,28447
56,00	0,86	0,28447
60,00	0,92	0,28447

Ensaio: 94 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 65
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	10,09811
3,00	0,05	4,89110
5,00	0,08	3,16702
7,00	0,11	2,35686
10,00	0,15	1,33138
15,00	0,23	0,56789
18,00	0,28	0,43763
23,00	0,35	0,30976
25,00	0,38	0,24670
30,00	0,46	0,18420
35,00	0,54	0,18420
38,00	0,58	0,18420
43,00	0,66	0,18420
45,00	0,69	0,18420
50,00	0,77	0,18420
52,00	0,80	0,18420
53,00	0,82	0,18420
55,00	0,85	0,18420
56,00	0,86	0,18420
60,00	0,92	0,18420

Ensaio: 95 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 75
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	11,21546
3,00	0,04	14,77518
5,00	0,07	17,60069
7,00	0,09	8,87074
10,00	0,13	6,38523
15,00	0,20	5,11471
18,00	0,24	4,55693
23,00	0,31	4,04050
25,00	0,33	3,55972
30,00	0,40	1,55499
35,00	0,47	0,89081
38,00	0,51	0,58105
43,00	0,57	0,58105
45,00	0,60	0,58105
50,00	0,67	0,28447
53,00	0,71	0,28447
56,00	0,75	0,28447
60,00	0,80	0,28447
63,00	0,84	0,28447
70,00	0,93	0,28447

Ensaio: 95 Repet. 1
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 75
 Teor O2[%]: 25

Y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	9,54335
3,00	0,04	14,37359
5,00	0,07	12,36886
7,00	0,09	8,46915
10,00	0,13	6,71785
15,00	0,20	5,07056
18,00	0,24	4,15533
23,00	0,31	3,15813
25,00	0,33	2,53631
30,00	0,40	1,96547
35,00	0,47	1,58458
38,00	0,51	1,43787
43,00	0,57	1,36565
45,00	0,60	1,29418
50,00	0,67	1,22343
53,00	0,71	1,08406
56,00	0,75	1,01540
60,00	0,80	0,88009
63,00	0,84	0,88009
70,00	0,93	0,88009

Ensaio: 96
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 80
 Teor O2[%]: 25

y[mm]	pos.adm.	C[ppmv]
2,00	0,03	12,48598
3,00	0,04	15,91784
5,00	0,06	15,31149
7,00	0,09	13,30676
10,00	0,13	10,48125
15,00	0,19	8,26209
18,00	0,23	6,92153
23,00	0,29	5,79773
25,00	0,31	5,50733
30,00	0,38	4,63931
35,00	0,44	3,98084
38,00	0,48	3,59206
43,00	0,54	3,12209
45,00	0,56	3,07177
50,00	0,63	2,68182
53,00	0,66	2,54104
56,00	0,70	2,40304
60,00	0,75	2,22320
63,00	0,79	2,09130
70,00	0,88	1,91922

Temperatura

Ensaio: 1
 Var [m/s]: - Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 115
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	660,15
23,00	0,20	854,15
43,00	0,37	854,15
63,00	0,55	834,15
83,00	0,72	722,15

Ensaio: 2
 Var [m/s]: - Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 130
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	649,15
23,00	0,18	834,15
43,00	0,33	834,15
63,00	0,48	814,15
83,00	0,64	774,15

Ensaio: 3
 Var [m/s]: - Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 140
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	649,15
23,00	0,16	854,15
43,00	0,31	854,15
63,00	0,45	854,15
83,00	0,59	722,15

Ensaio: 4
 Var [m/s]: - Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 150
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	649,15
23,00	0,15	854,15
43,00	0,29	834,15
63,00	0,42	834,15
83,00	0,55	794,15

Ensaio: 5
 Var [m/s]: - Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 160
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	628,15
23,00	0,14	854,15
43,00	0,27	854,15
63,00	0,39	824,15
83,00	0,52	794,15

Ensaio: 6
 Var [m/s]: - Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 175
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	649,15
23,00	0,13	854,15
43,00	0,25	834,15
63,00	0,36	834,15
83,00	0,47	834,15

Ensaio: 7
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	711,28
23,00	0,27	834,04
43,00	0,51	813,78
63,00	0,74	752,52

Ensaio: 8
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	711,28
23,00	0,20	844,14
43,00	0,37	783,24
63,00	0,55	731,94
83,00	0,72	648,84

Ensaio: 9
 Var [m/s]: - Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	711,28
23,00	0,20	854,22
43,00	0,37	854,22
63,00	0,55	823,92
83,00	0,72	659,29

Ensaio: 10
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	731,94
23,00	0,18	993,30
43,00	0,34	934,17
63,00	0,50	834,04
83,00	0,66	690,55

Ensaio: 11
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 125
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	711,28
23,00	0,18	1.222,74
43,00	0,34	973,67
63,00	0,50	864,29
83,00	0,66	669,73

Ensaio: 12
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 135
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	731,94
23,00	0,17	973,67
43,00	0,32	864,29
63,00	0,47	773,02
83,00	0,61	690,55

Ensaio: 13
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	731,94
23,00	0,27	914,30
43,00	0,51	803,62
63,00	0,74	773,02

Ensaio: 14
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	731,94
23,00	0,20	874,33
43,00	0,37	854,22
63,00	0,55	773,02
83,00	0,72	711,28

Ensaio: 15
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	711,28
23,00	0,20	834,04
43,00	0,37	834,04
63,00	0,55	762,78
83,00	0,72	659,29

Ensaio: 16
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	700,92
23,00	0,18	854,22
43,00	0,34	834,04
63,00	0,50	752,52
83,00	0,66	700,92

Ensaio: 17
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 125
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	700,92
23,00	0,18	854,22
43,00	0,34	834,04
63,00	0,50	773,02
83,00	0,66	690,55

Ensaio: 18
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 135
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	711,28
23,00	0,17	864,29
43,00	0,32	844,14
63,00	0,47	803,62
83,00	0,61	752,52

Ensaio: 19
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	731,94
23,00	0,27	803,62
43,00	0,51	803,62
63,00	0,74	700,92

Ensaio: 20
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	731,94
23,00	0,20	864,29
43,00	0,37	834,04
63,00	0,55	731,94
83,00	0,72	752,52

Ensaio: 21
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	711,28
23,00	0,20	874,33
43,00	0,37	854,22
63,00	0,55	731,94
83,00	0,72	690,55

Ensaio: 22
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	731,94
23,00	0,18	874,33
43,00	0,34	844,14
63,00	0,50	834,04
83,00	0,66	669,73

Ensaio: 23
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 125
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	731,94
23,00	0,18	874,33
43,00	0,34	864,29
63,00	0,50	834,04
83,00	0,66	752,52

Ensaio: 24
 Var [m/s]: 0,10 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 135
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	700,92
23,00	0,17	874,33
43,00	0,32	844,14
63,00	0,47	803,62
83,00	0,61	773,02

Ensaio: 25
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	711,28
23,00	0,27	874,33
43,00	0,51	803,62
63,00	0,74	762,78

Ensaio: 26
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	690,55
23,00	0,20	914,30
43,00	0,37	854,22
63,00	0,55	752,52
83,00	0,72	711,28

Ensaio: 27
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	700,92
23,00	0,20	934,17
43,00	0,37	854,22
63,00	0,55	803,62
83,00	0,72	711,28

Ensaio: 28
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	669,73
23,00	0,18	874,33
43,00	0,34	864,29
63,00	0,50	834,04
83,00	0,66	813,78

Ensaio: 29
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 125
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	669,73
23,00	0,18	844,14
43,00	0,34	844,14
63,00	0,50	783,24
83,00	0,66	731,94

Ensaio: 30
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 135
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	680,15
23,00	0,17	874,33
43,00	0,32	874,33
63,00	0,47	844,14
83,00	0,61	803,62

Ensaio: 31
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	752,52
23,00	0,27	874,33
43,00	0,51	864,29
63,00	0,74	752,52

Ensaio: 32
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	742,24
23,00	0,20	914,30
43,00	0,37	894,36
63,00	0,55	874,33
83,00	0,72	874,33

Ensaio: 33
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	742,24
23,00	0,20	894,36
43,00	0,37	854,22
63,00	0,55	813,78
83,00	0,72	762,78

Ensaio: 34
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	731,94
23,00	0,18	894,36
43,00	0,34	854,22
63,00	0,50	834,04
83,00	0,66	731,94

Ensaio: 35
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 125
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	731,94
23,00	0,18	874,33
43,00	0,34	874,33
63,00	0,50	844,14
83,00	0,66	773,02

Ensaio: 36
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 135
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	731,94
23,00	0,17	874,33
43,00	0,32	874,33
63,00	0,47	834,04
83,00	0,61	813,78

Ensaio: 37
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	762,78
23,00	0,27	844,14
43,00	0,51	773,02
63,00	0,74	731,94

Ensaio: 38
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	752,52
23,00	0,20	894,36
43,00	0,37	844,14
63,00	0,55	752,52
83,00	0,72	731,94

Ensaio: 39
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	793,44
23,00	0,20	914,30
43,00	0,37	864,29
63,00	0,55	823,92
83,00	0,72	742,24

Ensaio: 40
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	731,94
23,00	0,18	914,30
43,00	0,34	874,33
63,00	0,50	834,04
83,00	0,66	773,02

Ensaio: 41
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 125
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	731,94
23,00	0,18	894,36
43,00	0,34	894,36
63,00	0,50	834,04
83,00	0,66	793,44

Ensaio: 42
 Var [m/s]: 0,15 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 135
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	742,24
23,00	0,17	884,35
43,00	0,32	864,29
63,00	0,47	803,62
83,00	0,61	762,78

Ensaio: 46
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 130
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	680,15
23,00	0,18	864,29
43,00	0,33	874,33
63,00	0,48	834,04
83,00	0,64	793,44

Ensaio: 47
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 140
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	669,73
23,00	0,16	874,33
43,00	0,31	904,34
63,00	0,45	864,29
83,00	0,59	834,04

Ensaio: 48
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 145
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	669,73
23,00	0,16	864,29
43,00	0,30	914,30
63,00	0,43	844,14
83,00	0,57	813,78

Ensaio: 49
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	783,24
23,00	0,27	854,22
43,00	0,51	793,44
63,00	0,74	690,55

Ensaio: 50
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	752,52
23,00	0,20	874,33
43,00	0,37	854,22
63,00	0,55	762,78
83,00	0,72	659,29

Ensaio: 51
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	773,02
23,00	0,20	934,17
43,00	0,37	904,34
63,00	0,55	864,29
83,00	0,72	803,62

Ensaio: 52
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	752,52
23,00	0,18	914,30
43,00	0,34	894,36
63,00	0,50	864,29
83,00	0,66	834,04

Ensaio: 53
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 135
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	762,78
23,00	0,17	963,83
43,00	0,32	934,17
63,00	0,47	874,33
83,00	0,61	773,02

Ensaio: 54
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 145
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	773,02
23,00	0,16	963,83
43,00	0,30	934,17
63,00	0,43	894,36
83,00	0,57	783,24

Ensaio: 55
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 85
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	773,02
23,00	0,27	934,17
43,00	0,51	924,25
63,00	0,74	834,04

Ensaio: 56
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 115
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	793,44
23,00	0,20	993,30
43,00	0,37	993,30
63,00	0,55	963,83
83,00	0,72	834,04

Ensaio: 57
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 115
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	773,02
23,00	0,20	904,34
43,00	0,37	874,33
63,00	0,55	834,04
83,00	0,72	773,02

Ensaio: 58
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 125
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	803,62
23,00	0,18	1.071,04
43,00	0,34	1.032,33
63,00	0,50	914,30
83,00	0,66	823,92

Ensaio: 59
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 135
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	793,44
23,00	0,17	944,08
43,00	0,32	914,30
63,00	0,47	874,33
83,00	0,61	834,04

Ensaio: 60
 Var [m/s]: v3 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 145
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,02	773,02
23,00	0,16	1.061,40
43,00	0,30	1.032,33
63,00	0,43	934,17
83,00	0,57	874,33

Ensaio: 61
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 75
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	774,15
23,00	0,31	874,15
43,00	0,57	670,15
63,00	0,84	649,15

Ensaio: 62
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 80
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	754,15
23,00	0,29	855,15
43,00	0,54	734,15
63,00	0,79	650,15

Ensaio: 63
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 85
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	812,15
23,00	0,27	1.173,15
43,00	0,51	921,15
63,00	0,74	720,15

Ensaio: 64
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 90
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	731,15
23,00	0,26	1.082,15
43,00	0,48	911,15
63,00	0,70	720,15

Ensaio: 65
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 95
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	751,15
23,00	0,24	1.155,15
43,00	0,45	969,15
63,00	0,66	731,15

Ensaio: 66
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 105
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	762,15
23,00	0,22	1.026,15
43,00	0,41	822,15
63,00	0,60	731,15

Ensaio: 67
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 70
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	894,15
23,00	0,33	1.333,15
43,00	0,61	1.066,15
63,00	0,90	794,15

Ensaio: 68
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 85
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	774,15
23,00	0,27	990,15
43,00	0,51	913,15
63,00	0,74	824,15

Ensaio: 69
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 90
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	794,15
23,00	0,26	1.535,15
43,00	0,48	1.211,15
63,00	0,70	824,15

Ensaio: 70
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 90
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	764,15
23,00	0,26	1.019,15
43,00	0,48	1.019,15
63,00	0,70	971,15

Ensaio: 71
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 95
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	794,15
23,00	0,24	1.175,15
43,00	0,45	1.401,15
63,00	0,66	1.157,15
83,00	0,87	722,15

Ensaio: 72
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 95
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	794,15
23,00	0,24	1.047,15
43,00	0,45	1.460,15
63,00	0,66	1.229,15
83,00	0,87	794,15

Ensaio: 73
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 60
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,05	914,30
23,00	0,38	1.314,99
43,00	0,72	864,29

Ensaio: 74
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 65
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,05	953,96
23,00	0,35	1.493,57
43,00	0,66	1.128,52
63,00	0,97	711,28

Ensaio: 75
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 70
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	914,30
23,00	0,33	1.579,91
43,00	0,61	1.051,73
63,00	0,90	762,78

Ensaio: 76
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 75
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	864,29
23,00	0,31	1.689,20
43,00	0,57	1.175,88
63,00	0,84	762,78

Ensaio: 77
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 85
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	854,22
23,00	0,27	1.664,27
43,00	0,51	1.405,27
63,00	0,74	813,78
83,00	0,98	731,94

Ensaio: 78
 Var [m/s]: 0,85 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 95
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	884,35
23,00	0,24	1.605,43
43,00	0,45	1.360,37
63,00	0,66	1.166,45
83,00	0,87	864,29

Ensaio: 79
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 70
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	792,15
23,00	0,33	872,15
43,00	0,61	751,15
63,00	0,90	720,15

Ensaio: 80
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 75
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	874,15
23,00	0,31	1.047,15
43,00	0,57	894,15
63,00	0,84	722,15

Ensaio: 81
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 85
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	774,15
23,00	0,27	854,15
43,00	0,51	894,15
63,00	0,74	824,15

Ensaio: 82
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 90
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	794,15
23,00	0,26	1.019,15
43,00	0,48	1.019,15
63,00	0,70	952,15

Ensaio: 83
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 95
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	794,15
23,00	0,24	1.229,15
43,00	0,45	1.193,15
63,00	0,66	1.066,15

Ensaio: 84
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 100
 Teor O2[%]: 21

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	774,15
23,00	0,23	1.246,15
43,00	0,43	1.019,15
63,00	0,63	824,15

Ensaio: 85
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 65
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,05	904,34
23,00	0,35	1.194,68
43,00	0,66	934,17
63,00	0,97	700,92

Ensaio: 86
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 65
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,05	934,17
23,00	0,35	1.099,87
43,00	0,66	934,17
63,00	0,97	659,29

Ensaio: 87
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 65
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,05	934,17
23,00	0,35	1.360,37
43,00	0,66	1.314,99
63,00	0,97	731,94

Ensaio: 88
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 75
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	953,96
23,00	0,31	1.458,49
43,00	0,57	1.278,33
63,00	0,84	934,17

Ensaio: 89
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 85
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	973,67
23,00	0,27	1.554,21
43,00	0,51	1.314,99
63,00	0,74	1.138,03
83,00	0,98	773,02

Ensaio: 90
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 95
 Teor O2[%]: 23

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,03	864,29
23,00	0,24	1.545,61
43,00	0,45	1.287,52
63,00	0,66	1.099,87
83,00	0,87	731,94

Ensaio: 91
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 50,00 60
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,05	904,34
23,00	0,38	1.032,33
43,00	0,72	904,34

Ensaio: 92
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 60,00 65
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,05	894,36
23,00	0,35	1.071,04
43,00	0,66	1.333,20
63,00	0,97	934,17

Ensaio: 93
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 65,00 65
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,05	934,17
23,00	0,35	1.440,83
43,00	0,66	1.128,52
63,00	0,97	773,02

Ensaio: 94
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 70,00 65
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,05	953,96
23,00	0,35	1.664,27
43,00	0,66	1.269,11
63,00	0,97	762,78

Ensaio: 95
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 75,00 75
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	914,30
23,00	0,31	1.639,17
43,00	0,57	1.333,20
63,00	0,84	1.099,87

Ensaio: 96
 Var [m/s]: 1,39 Lf[mm]=
 Qc [l/h] 80,00 80
 Teor O2[%]: 25

y (mm)	pos adm	T(K)
3,00	0,04	953,96
23,00	0,29	1.639,17
43,00	0,54	1.204,05
63,00	0,79	1.071,04

Apêndice A

Variação da Concentração da Fuligem ao Longo da Chama para $V_{ar} = 2,36 V_{eg}$

Com o intuito de tirar possíveis dúvidas quanto aos fenômenos que ocorrem com os níveis de velocidades maiores para o ar comparado ao combustível, já que, os valores apresentados são da ordem de aproximadamente quatro vezes a mais que os níveis de velocidade do gás, serão apresentados a seguir dados para a potência de 1,16kW, com Var/Veg em torno de dois.

Na Figura A.1 verificamos que a tendência estabelecida para a relação de $Var/Veg = 3,86$ é semelhante ao verificado para o caso de $Var/Veg = 2,36$, no teor de $O_2 = 21\%$. O fato ocorre, pois a influência da melhor mistura neste tipo de situação, $Var/Veg > 1$, é semelhante, sendo a sensibilidade ao efeito o fator determinante para os níveis de concentração encontrados. As Figuras A.2 e A.3 apresentam os resultados nestas condições, para os teores de 23 e 25%. Semelhante ao caso de 21%, há uma boa semelhança entre os perfis nas condições de Var/Veg iguais a 3,86 e 2,36.

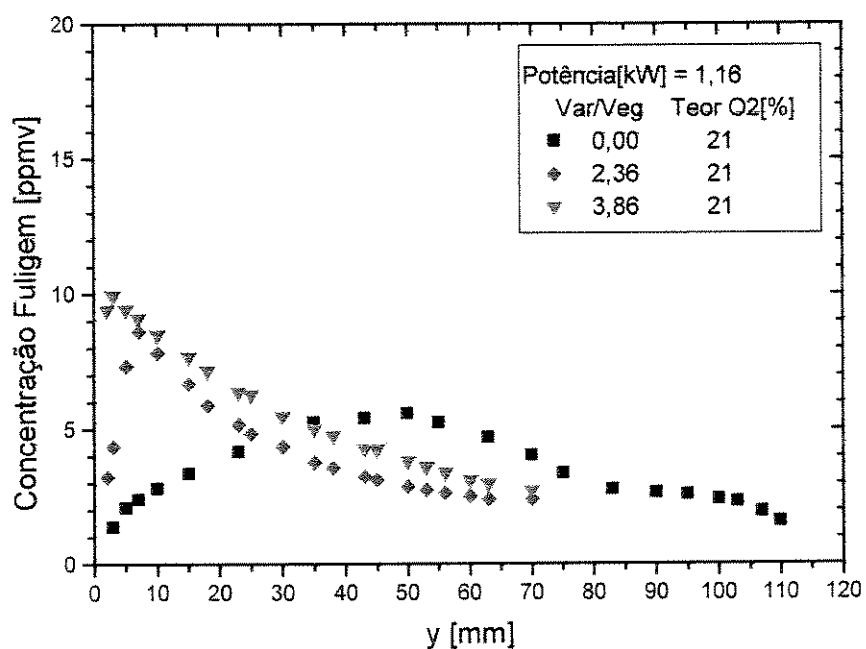


Figura A.1. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O₂[%] = 21.

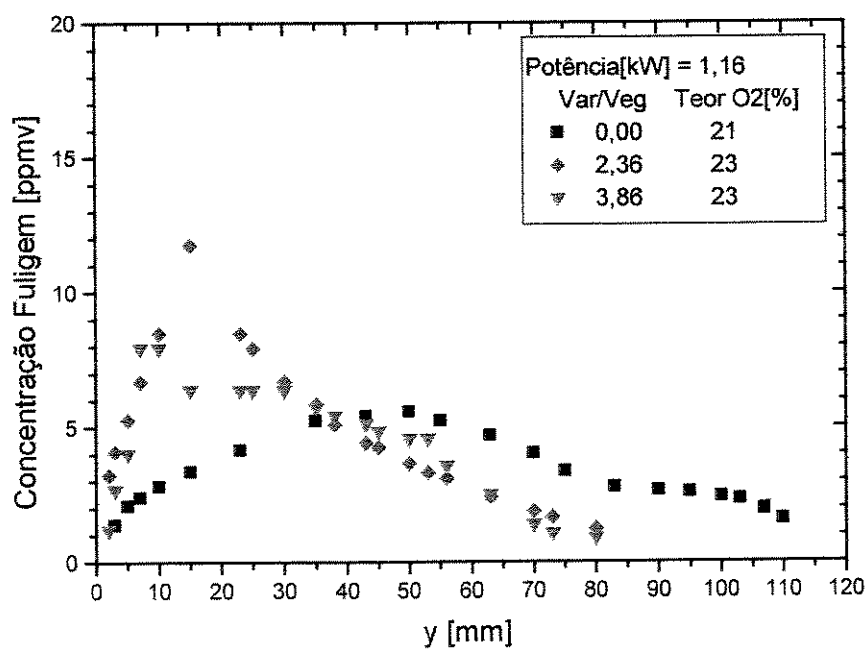


Figura A.2. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O₂[%] = 23.

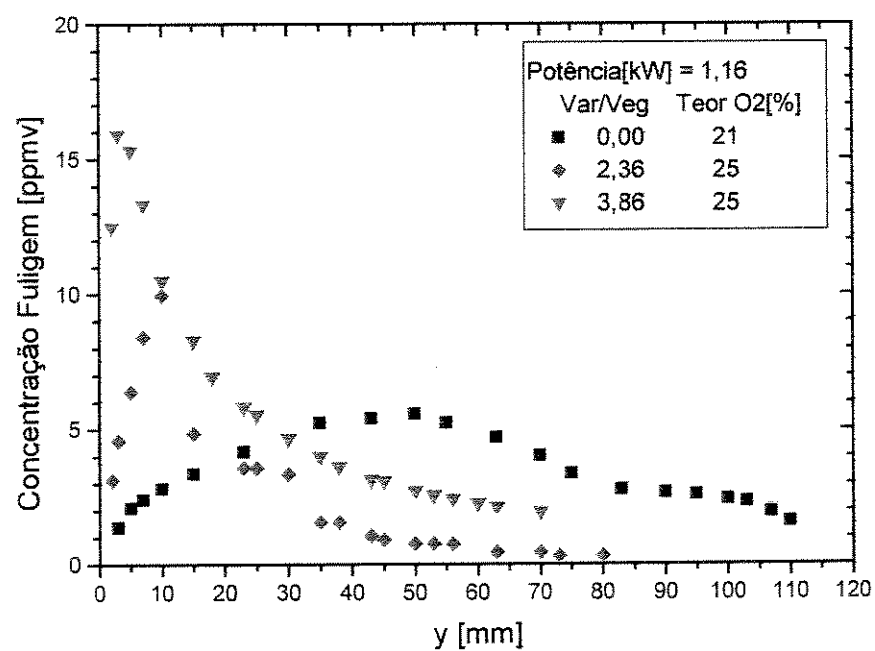


Figura A.3. Variação Axial da Concentração da Fuligem - Potência[kW] = 1,16 - Teor O₂[%] = 25.

Apêndice B

Avaliação da Influência do Acúmulo de Fuligem na Leitura do Termopar

Como tentativa de explicação da influência do acúmulo de fuligem na leitura do termopar, foram idealizadas algumas hipóteses partindo dos resultados obtidos nas leituras. A resposta da leitura do termopar coberto de fuligem, nas curvas plotadas no instrumento utilizado, foi idealizada como descrito na Figura B.1. A leitura feita nas regiões onde a concentração da fuligem fosse baixa, teria uma inclinação de resposta até o valor de pico, após o termopar ser coberto pela fuligem, mais acentuada, enquanto o oposto seria verificado para regiões onde a concentração da fuligem fosse elevada. A queda do sinal de leitura após os valores de pico, também possuiriam sinais diferentes, onde, para a curva de menor fuligem a queda seria mais branda, enquanto, para a curva de mais fuligem a queda seria mais intensa.

A subida até o ponto onde o termopar está coberto é intensa, devido provavelmente à diferença de temperatura entre o ambiente, local este de início da leitura do termopar, e a chama.

A influência da camada de fuligem gerada se deveria a uma resistência de condução da temperatura. Esta causaria uma diferença de temperatura entre a região externa da camada de fuligem e o termopar que está na região interna da camada. A leitura do termopar estaria atenuada pela camada de fuligem formada.

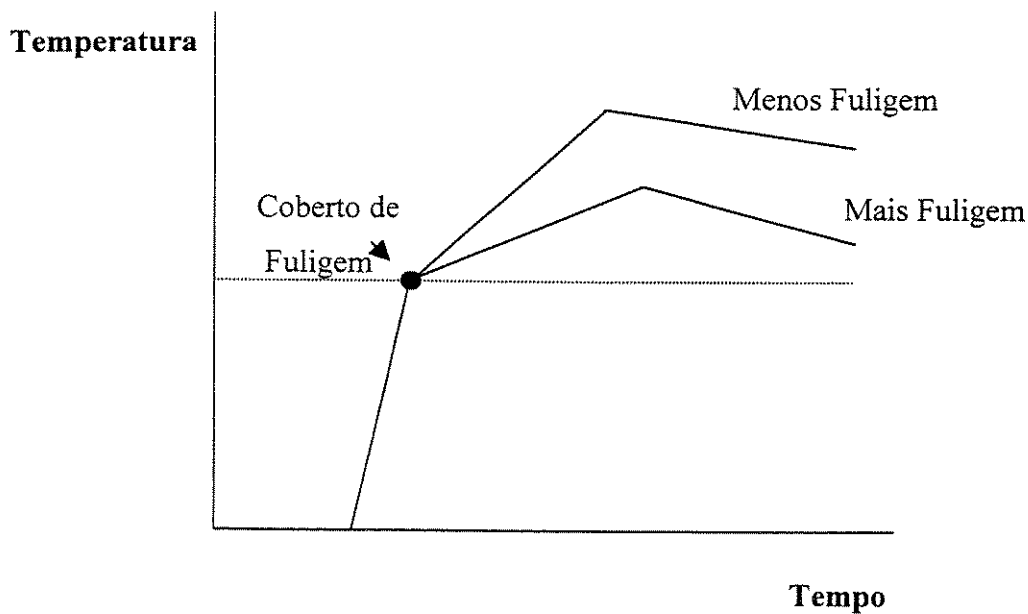


Figura B.1. Variação Temporal da Leitura do Termopar com Acúmulo de Fuligem.

Todavia, após verificação minuciosa dos resultados, constatou-se que a inclinação das curvas na subida, após o termopar estar coberto pela fuligem, seja em curvas de leitura com pequenos ou grandes acúmulos de fuligem, dependeria da região de chama onde o termopar estava sendo inserido. Foram imaginadas duas regiões de chama sendo:

1. Uma primeira região no início da chama onde existisse mais gás combustível e intermediários do que produtos.
2. Uma segunda região onde existisse mais produtos, localizada mais acima da chama.

As hipóteses propostas para a primeira região foram:

- Crescimento da casca de fuligem dada mais rapidamente.
- Maior perda de calor para o ambiente devido a menor espessura da chama nesta região ficando mais próxima do lado do ar por conta da inexistência de produtos para executar uma barreira.

Enquanto as hipóteses propostas para a segunda região foram:

- Crescimento da casca de fuligem dada mais lentamente.
- Menor perda de calor para o ambiente devido a chama possuir maior espessura nesta região por conta dos produtos.

Agora apresentaremos a Tabela B.1 com as possíveis inclinações das curvas de leitura levando em conta as hipóteses acima, sendo maior inclinação indicado pelo símbolo de mais (+) e menor inclinação indicado pelo símbolo de menos (-).

Tabela B.1. Tabela de Inclinações das Curvas de Subida na Leitura do Termopar.

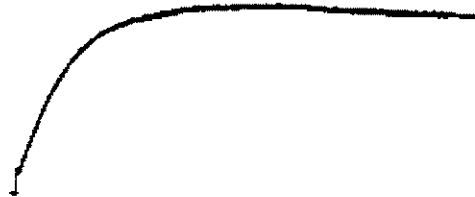
Região	Hipótese	Mais Fuligem	Menos Fuligem
1			
	Crescimento Casca Fuligem	-	-
	Perda Calor Ambiente	-	-
	Efeito Global	-	-
2			
	Crescimento Casca Fuligem	-	+
	Perda Calor Ambiente	+	+
	Efeito Global	-	+

Agora apresentaremos as curvas de leitura de temperatura feitas pelo termopar que serviram de base para as hipóteses propostas.

B.1. Região 1

A Figura B.2 apresenta as curvas de leitura do termopar para as situações de gás arrastando e ar arrastando em regiões onde existe pouca formação da fuligem. Nesta verificamos que a

resposta do termopar até alcançar o valor pico possui uma inclinação menos acentuada levando algum tempo para chegar ao valor pico como indicado na Tabela B.1; chegando ao valor pico, como sugerido pelo modelo da Figura B.1 a queda nessa situação é lenta e gradual.



(a) Potência[kW]= 1,16; y[mm]=3,0; posição adimensional=0,02; gás arrastando



(b) Potência[kW]= 1,16; y[mm]=3,0; posição adimensional=0,03, ar arrastando

Figura B.2. Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 1 com Menor Formação da Fuligem.

Na Figura B.3 temos a situação de uma curva de leitura para uma posição de maior fuligem para o ar arrastando, onde verificamos que a resposta do termopar até alcançar o valor pico possui uma inclinação menos acentuada, até menor que o caso descrito na Figura B.2, levando algum tempo para chegar ao valor de maior temperatura. Chegando a este, a queda nessa situação é rápida e constante.



Figura B.3. Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 1 com Maior Formação da Fuligem- Potência[kW]= 0,72; y[mm]=5,0; posição adimensional=0,08; ar arrastando.

B.2. Região 2

A Figura B.4 apresenta as curvas de leitura do termopar para as situações de gás arrastando e ar arrastando em regiões onde existe pouca formação da fuligem. Nesta verificamos que a resposta do termopar até alcançar o valor pico possui uma inclinação mais acentuada chegando rápido a este valor. Chegando ao valor pico a queda nessa situação é lenta e gradual. As flutuações nas leituras apresentadas na figura são atribuídas à instabilidade da chama nestas regiões (próximas ao topo), que ficaram mais intensas ao longo do tempo.

Na Figura B.5 temos a situação de uma curva de leitura para uma posição de maior fuligem para o gás e o ar arrastando, onde verificamos que a resposta do termopar até alcançar o valor pico possui uma inclinação menos acentuada levando algum tempo para chegar neste. Chegando a este valor a queda nessa situação é rápida e constante. No caso do gás arrastando, percebemos que a temperatura cai e retorna depois de certo tempo próximo ao valor pico. O fato se deve à intensa formação da fuligem, onde foi formada uma camada espessa de fuligem que não possuiu resistência mecânica suficiente para conter o esforço executado pelo escoamento dos gases e se

desprende do termopar voltando a uma situação próxima da original e a partir disto o processo de crescimento da camada é novamente iniciado.



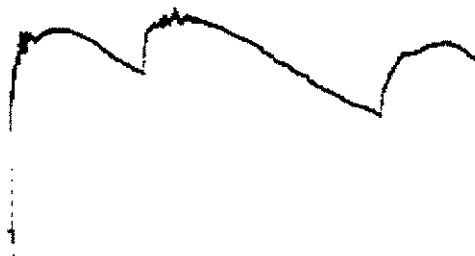
(a): Potência[kW]= 1,16; y[mm]=103,0; posição adimensional=0,76; gás arrastando.



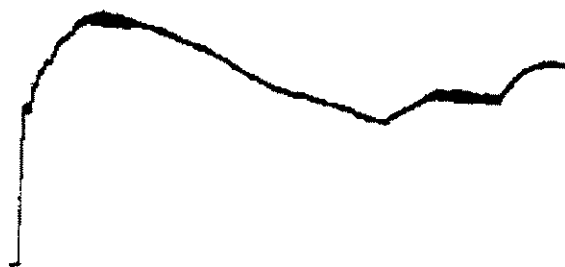
1

(b): Potência[kW]= 0,72; y[mm]=50,0; posição adimensional=0,72, ar arrastando.

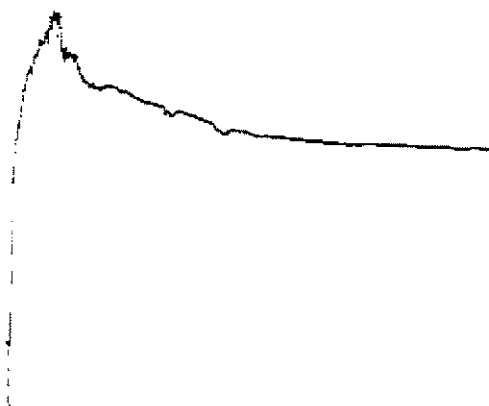
Figura B.4. Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 2 com Menor Formação da Fuligem.



(a) Potência[kW]= 1,16; y[mm]=50,0; posição adimensional=0,37; gás arrastando.



(b) Potência[kW]= 1,16; y[mm]=43,0; posição adimensional=0,32, gás arrastando.



(c) Potência[kW]= 1,16; y[mm]=10,0; posição adimensional=0,11, ar arrastando.

Figura B.5. Variação Temporal da Leitura do Termopar na Região 2 com Maior Formação da Fuligem.

O valor pico em todos os casos abordados é considerado como sendo o valor mais próximo alcançado da temperatura da chama, levando em conta as perdas devido à casca de fuligem formada e a perda de calor para o ambiente.¹

¹ Uma estimativa preliminar da correção de temperatura do efeito combinado da radiação e convecção, desprezando o efeito da condução através da camada de fuligem que cobre o termopar, considerando o gás transparente à radiação, e admitindo que a velocidade dos gases de combustão é igual a velocidade do gás combustível na base do queimador, na temperatura ambiente, indica um valor máximo de correção inferior a 200°C.