

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Emissão de Monóxido de Carbono e Hidrocarbonetos Totais em Câmara de Incineração - Efeito do Número de Rotação e Composição do Combustível

Autor : Waldir Antonio Bizzo

Orientador: Leonardo Goldstein Jr.

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

**Emissão de Monóxido de Carbono e Hidrocarbonetos
Totais em Câmara de Incineração - Efeito do Número de
Rotação e Composição do Combustível**

Autor : Waldir Antonio Bizzo

Orientador: Leonardo Goldstein Jr.

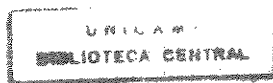
Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Tese de Doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, março de 1997

S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA	17UNICAMP
	B 554e
V. E.	
TOMBO B7	30439
PROC.	281197
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	23/05/97
N.º CPD	

CM-00099314-8

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

B554e Bizzo, Waldir Antonio
Emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos totais em câmara de incineração - efeito do número de rotação e composição do combustível / Waldir Antonio Bizzo.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

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

1. Combustão. 2. Incineração. 3. Poluição. 4. Monóxido de carbono. 5. Hidrocarbonetos. 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 FLUÍDOS

Tese de Doutorado

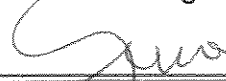
**Emissão de Monóxido de Carbono e Hidrocarbonetos
Totais em Câmara de Incineração - Efeito do Número de
Rotação e Composição do Combustível**

Autor : Waldir Antonio Bizzo

Orientador: Leonardo Goldstein Jr.



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



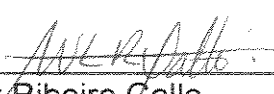
Prof. Dr. Clemente Greco
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



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



Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto
Faculdade de Engenharia de Alimentos - Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Waldir Luiz Ribeiro Gallo
Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 25 de março de 1997

À

Regina, Natália, Mariana e Vitor

Agradecimentos

Este trabalho contou com a colaboração de diversas entidades e pessoas, e expresso meu sincero agradecimento:

à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo financiamento deste projeto;

à Rhodiaco Inds Químicas Ltda e ao Engº José Carlos da Rocha Mendes, pelo empréstimo do cromatógrafo;

ao Laboratório de Medidas de Vazão do IPT - Inst. de Pesquisas Tecnológicas, pelo empréstimo do dispositivo de calibração do tubo de Pitot de 5 furos;

ao Laboratório de Combustão do IPT e à Marilyn Mariano dos Santos, pela verificação da calibração do analisador de CO;

ao Prof. Leonardo Goldstein Jr., pela sua valorosa orientação e incentivo;

ao Prof. Caio Glauco Sánchez, pela sua colaboração permanente;

aos seguintes colegas, pelas suas ideias a este projeto:

engº Francisco D. A. Souza (Agrupamento de Engenharia Térmica, IPT), e Prof. Kamal A. R. Ismail;

à André Luis Cardoso, pela sua colaboração na calibração de instrumentos;

e Wilton Furquim, pelas figuras deste texto e aos demais colegas do departamento que contribuíram neste trabalho.

Finalmente, devo manifestar meu agradecimento especial aos seguintes colegas, cuja colaboração foi fundamental para a realização desta tese:

muito obrigado à Luiz A. Zanaga e à Paulo Roberto Tardin Jr.

Sumário

1	Introdução	1
2	Parâmetros que atuam no desempenho de incineradores	9
3	Descrição da Bancada Experimental	41
4	Descrição do Procedimento Experimental	62
5	Apresentação e Análise dos Resultados	76
6	Conclusões e Propostas para Futuros Trabalho	106
	Referências Bibliográficas	109
	Anexos	
	A - Calibração do pirômetro de sucção	
	B - Calibração do medidor de hidrocarbonetos totais	
	C - Calibração de três tubos de Pitot de 5 furos	
	D - Dados Experimentais	
	E - Análise de Erros	
	F - Medidores de vazão	

Resumo

BIZZO, Waldir Antonio, *Emissão de Monóxido de Carbono e Hidrocarbonetos Totais em Câmara de Incineração - Efeito do Número de Rotação e Composição do Combustível*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997.-----Tese (Doutorado)

A incineração térmica tem sido utilizada como método de tratamento e disposição de resíduos perigosos. Cabe à câmara secundária dos incineradores um papel importante na eficiente destruição dos resíduos e no controle da emissão de produtos de combustão incompleta, sendo a análise contínua das emissões de CO e hidrocarbonetos não queimados o procedimento utilizado para o monitoramento, em tempo real, do seu desempenho.

O presente trabalho estudou experimentalmente o efeito do número de rotação do escoamento no interior da câmara, nas emissões de CO e HC totais para três concentrações de tolueno no combustível e dois valores do excesso de ar. Foram também realizadas medições locais no interior da câmara de combustão, compreendendo: dois campos de velocidades, três distribuições de temperatura e duas distribuições de concentração de CO e HC totais. A distribuição do tempo de residência foi avaliada através da resposta a um sinal de concentração de SO₂ tipo impulso unitário.

Para a consecução da pesquisa foram projetados e construídos uma câmara de combustão cilíndrica horizontal isolada termicamente; um queimador com ajuste variável do número de rotação; três tubos de Pitot de 5 furos para medidas de velocidade do escoamento; um pirômetro de sucção para medidas de temperatura, duas sondas de amostragem de gases de combustão e um analisador contínuo de hidrocarbonetos totais a partir de um cromatógrafo de ionização de chama.

O aumento do número de rotação teve influência na emissão de CO e HC totais, diminuindo as emissões na condição de maior excesso de ar (42%) e aumentando as emissões na condição de menor excesso de ar (19%). A proporção relativa das regiões de mistura e de escoamento pistonado resultante dentro da câmara influenciou a eficiência de combustão, com efeitos diferentes conforme as condições de excesso de ar e de concentração de resíduo no combustível. A relação CO/HC mostrou-se relativamente constante com o número de rotação nestas condições.

Palavras Chave

- Combustão, Incineração, Poluição, Monóxido de Carbono, Hidrocarbonetos totais

Abstract

BIZZO, Waldir Antonio, *Emissão de Poluentes em Câmara Secundária de Incineração: Efeito do Número de Rotação e Composição do Combustível*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997.-----Tese (Doutorado)

Emissions of Carbon Monoxid and Total Hydrocarbons in Incineration Combustion Chamber - Effects of Swirl Number and Fuel Composition

Thermal incineration has been in use for treatment and disposal of hazardous wastes. The secondary chamber plays an important role in the effective destruction of wastes and control of emission of products of incomplete combustion, with continuous analysis of CO and of unburned hydrocarbons used in real time monitoring of the incinerator performance.

This work studied experimentally the CO and total HC emissions in function of the swirl number, combustion chamber, for three fuel toluene concentrations and two excess air values. Local measurements were also performed in the combustion chamber: two velocity fields, three temperature distributions and two gases concentration distribution. The residence time distribution has been evaluated through the response SO₂ concentration pulse signal.

An insulated horizontal combustion chamber was designed and built, as well as a variable swirl burner, three five holes Pitot tubes, one suction pirometer and two combustion gas sampling probes. A HC continuous analyser was adapted from a flame ionization detector chromatograf.

The swirl number influenced the CO and HC emissions, reducing them for the higher excess air condition (42%) and increasing them for the lower excess air (19%). Varying the mixing and plug flow regions size inside the combustion chamber influenced the combustion efficiency in different ways depending on excess air and waste fuel concentration. The CO/HC relation showed to not to vary with the swirl number under these conditions.

Key Words

- Combustion, Incineration, Pollution, Carbon Monoxid, Total Hydrocarbons

Lista de Figuras

1.1	Incinerador de câmaras múltiplas	4
1.2	Incinerador de forno rotativo	6
1.3	Incinerador de injeção líquida	7
1.4	Incinerador de leito fluidizado	8
2.1	Comparação da eficiência de destruição de benzeno obtidas pelo UDRI, e por Lee.	13
2.2	Efeito qualitativo da presença de CH_4 na oxidação térmica de C_2HCl_3	14
2.3	Medidas de concentração de CO_2 e temperatura efetuadas na saída de um forno rotativo em diferentes alturas, durante operação normal, a 0,1 rpm. Valores obtidos da média de medições após alimentação de 6 caixas de resíduos a intervalos de 10 segundos .	16
2.4	Medidas experimentais de concentração de espécies intermediárias na saída de um incinerador piloto, em relação a eficiência de destruição do resíduo incinerado, em diversas condições de capacidade e excesso de ar .	18
2.5	Evolução da produção de PCOPs e PCIs em teste de chama pré-misturada (Bose e Senkan, 1983).	20
2.6	Linhas de corrente típicas de escoamento com rotação - corte no plano axial	24
2.7	Queimador de rotação com entradas de ar axial e tangencial	26
2.8	Queimador de rotação com aletas direcionais d inclinação tangencial regulável e entrada de ar axial.	26
2.9	A curva E de distribuição do tempo de saída para um fluido escoando através de um vaso fechado	31
2.10	Técnicas de estímulo-resposta comumente usadas para estudo da distribuição de tempo de residência em reatores	31
2.11	Sinal típico a jusante, denominado curva C' , como resposta a um sinal de entrada em pulso ideal	33

2.12 Exemplos de média e variância da distribuição do tempo de residência	35
2.13 Esquema demonstrativo da integral de convolução.	36
3.1 Fluxograma de processo e instrumentação da bancada experimental.	42
3.2 Dimensões principais (em mm, sem escala) da câmara de combustão.	43
3.3 Vista geral da bancada experimental.	44
3.4 Desenho dos blocos móveis para regulagem do número de rotação.	45
3.5 Blocos direcionais do queimador antes da montagem final.	46
3.6 Desenho do queimador com gerador de rotação do ar de combustão.	47
3.7 Misturador estático em aço inoxidável refratário, antes da montagem no duto de saída dos gases da fornalha.	49
3.8 Desenho esquemático do pirômetro de sucção.	54
3.9 Pirômetro de sucção, resfriador de gases e tubos de alumina sobressalentes, antes da montagem final no carrinho.	54
3.10 Fluxograma do sistema de sucção do pirômetro.	55
3.11 Desenho esquemático da sonda de amostragem de gases de combustão.	56
3.12 Fluxograma da sistema de amostragem de gases	57
3.13 Fluxograma do sistema de amostragem e análise de hidrocarbonetos totais	58
3.14 Esquema dos dois modelos de tubo de Pitot de 5 furos.	60
3.15 Fluxograma do sistema de medição de velocidade por tubo de Pitot de 5 furos.	61
3.16 Tubo de Pitot de 5 furos montado sobre dispositivo de posicionamento para calibração em bancada.	61
4.1 Exemplo do sinal de resposta na saída da câmara.	71
4.2 Derivada do sinal de resposta em relação ao tempo.	72
4.3 Distribuição do tempo de residência normalizada em concentração e tempo.	73
4.4 Curvas da derivada da resposta em relação ao tempo do sistema de amostragem em 3 testes com concentrações diferentes.	75
5.1 Emissão de CO e HC totais, resíduo com 0% de tolueno e 100% GLP.	77
5.2 Emissão de CO e HC totais, resíduo com 30% de tolueno e 70% de GLP.	78
5.3 Emissão de CO e HC totais, resíduo com 39% tolueno e 61% GLP.	78
5.4 Emissão de CO em função do número de rotação e composição do combustível.	79
5.5 Emissão de HC totais em função do número de rotação e composição do combustível.	80
5.6 Emissão de CO e HC totais, resíduo com 30% de tolueno e 70% de GLP.	81

5.7 Emissão de CO em função do número de rotação e excesso de ar.	82
5.8 Emissão de HC totais em função do número de rotação e excesso de ar.	82
5.9 Relação de emissão HC/CO em função do número de rotação e excesso de ar.	83
5.10 Relação de emissão HC/CO em função do número de rotação e composição do combustível.	84
5.11 Distribuição de velocidades no interior da câmara de combustão.	87
5.12 Distribuição da componente axial das velocidades no interior da câmara.	88
5.13 Distribuição de velocidades no interior da câmara.	89
5.14 Distribuição da componente axial das velocidades no interior da câmara.	90
5.15 Distribuição de temperatura dos gases no interior da câmara, para número de rotação 0,49.	93
5.16 Distribuição de temperatura dos gases no interior da câmara, para o número de rotação 0,68	94
5.17 Distribuição de temperaturas dos gases no interior da câmara, para número de rotação 1,17, com delimitação da Zona Central de Recirculação.	95
5.18 Distribuição de concentração de CO no interior da câmara para número de rotação 0,49.	97
5.19 Distribuição de concentração de HC totais no interior da câmara, para número de rotação 0,49.	98
5.20 Distribuição de concentração de CO no interior da câmara, para número de rotação 1,17, com delimitação da Zona Central de Recirculação.	99
5.21 Distribuição de concentração de HC totais no interior da câmara, com número de rotação 1,17, com delimitação da Zona Central de Recirculação.	100
5.22 Distribuição da concentração média de CO e HC na secção radial, ao longo da câmara de combustão, para número de rotação 0,49.	101
5.24 Distribuição da concentração média de CO e HC na secção radial ao longo da câmara de combustão.	101
5.24 Resposta do sistema de amostragem e analisador de SO ₂ a um estímulo tipo impulso unitário de concentração de SO ₂ .	103
5.25 Distribuição virtual do tempo de residência do sistema de amostragem e analisador de SO ₂ .	103
5.26 Variância da distribuição do tempo de residência da câmara, calculada a partir das curvas de resposta do sinal impulso unitário.	104

Lista de Tabelas

3.1	Características dos medidores de vazão.	51
3.2	Características dos sensores de temperatura.	51
3.3	Características dos medidores eletrônicos de temperatura.	52
3.4	Características dos medidores de pressão.	52
3.5	Características principais dos analisadores de gases.	57
4.1	Parâmetros das curvas de distribuição do tempo de residência obtidos em testes a partir de um impulso unitário.	104

Nomenclatura

Letras Latinas

A/C_{real} : relação ar/combustível utilizada (em massa)

A/C_{esteq} : relação ar/combustível estequiométrica (em massa)

B : largura dos canais formados pelos blocos móvel e fixo do gerador de rotação do queimador

C : concentração normalizada do traçador na saída do reator

C_0 : concentração do traçador antes do degrau;

C_A : concentração final do composto A

C_{Ao} : concentração inicial do composto A

C_f : concentração do traçador no degrau;

C_i : concentração do traçador no ponto calculado.

C_i : concentração instantânea do traçador na saída do reator

E : energia de ativação

E_d : Eficiência de destruição e remoção

G_ϕ : quantidade de movimento tangencial

G_x : quantidade de movimento axial

k, A : constantes da taxa de reação segundo a equação de Arrhenius

$\dot{m}_{GLP}$: descarga de GLP (kg/s)

$\dot{m}_{H_2O}$: descarga de água no pulverizador (kg/s)

$\dot{m}_{td}$: descarga de tolueno (kg/s)

P : pressão estática

Q : área sob a curva concentração versus tempo ou quantidade total da massa que originou o pulso.

r : posição radial do vetor velocidade

R : raio da saída do gerador de rotação

R : constante universal dos gases perfeitos

R : raio do duto de saída do queimador

R_k : raio da lança de combustível, interno ao duto de saída do queimador

S' número de rotação calculado em relação do diâmetro da fornalha

S número de rotação do escoamento

$\bar{t}$ tempo de residência médio (s)

t tempo (s)

T : temperatura absoluta da reação

U : componente axial da velocidade dos gases

$\dot{v}$: vazão dos produtos de combustão, calculada a temperatura de saída da câmara (m^3/s)

V : volume da câmara de combustão (m^3)

$\dot{w}_{PCI}$ potência específica da câmara calculada em relação do PCI (kJ/m^3)

$\dot{w}_{PCS}$: potência específica da câmara calculada em relação ao PCS (kJ/m^3)

W : componente tangencial da velocidade dos gases

x_1, x_2 : constantes da reação

z quantidade de blocos móveis do gerador de rotação do queimador

Letras Gregas

α excesso de ar

ξ : ângulo da posição de ajuste dos blocos móveis

ξ_m : ângulo máximo da posição de ajuste dos blocos móveis

β : ângulo de entrada do bloco tangencial do gerador de rotação

σ : coeficiente da quantidade de movimento tangencial

σ^2 variância da distribuição do tempo de residência

ρ : densidade dos gases;

θ : tempo de residência médio

θ_r : tempo de retardo da reação

Siglas

PCOP Principais Compostos Orgânicos Perigosos

PCI Produtos de Combustão Incompleta

HC hidrocarbonetos não queimados

DTR Distribuição do tempo de residência

ZCR Zona central de recirculação

Capítulo 1

Introdução

1.1 Geração e Disposição de Resíduos Perigosos

A atividade industrial gera grande quantidade de resíduos de natureza perigosa, oriundos principalmente dos setores químico, petroquímico e farmacêutico. Nas indústrias de processo químico, resíduos líquidos e pastosos provêm principalmente de operações de separação, tais como filtração e destilação. Pastas podem ser formadas em processos de decantação em fundos de vasos e reatores. Sistemas de tratamento de efluentes líquidos produzem comumente uma borra pastosa separável por decantação. A operação de lavagem de equipamentos produz geralmente água contaminada com produtos que dificilmente são tratados por processos convencionais. Há ainda resíduos sólidos, tais como embalagens de produtos químicos, produtos fora de especificações ou deteriorados, elementos de filtração descartáveis, etc.

A norma brasileira NBR 10004 classifica como "perigoso" todo produto que apresente risco à saúde pública ou risco ao meio ambiente, ou que possuam como característica: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade; características estas definidas e detalhadas na norma citada. Não estão incluídos no escopo os materiais radioativos.

A norma lista como perigosos resíduos provenientes de cerca de uma centena de processos e por volta de 500 compostos específicos, os quais conferem periculosidade ao resíduo. Sendo assim, a grande maioria dos resíduos químicos são classificados como perigosos e necessitam tratamento adequado. A disposição de resíduos perigosos em aterros industriais não tem sido aceita pelos órgãos de controle de poluição ambiental e é tendência mundial banir completamente a prática de aterro de resíduos perigosos.

Somente a região metropolitana de São Paulo gerou em 1988 cerca de 376.000 toneladas de resíduos perigosos, sendo que 52% destes receberam tratamento ou disposição inadequados (Bernardes Jr., 1990). As estimativas norte-americanas de 1985 somavam aproximadamente 250.000.000 de toneladas de resíduos perigosos no ano (Pluenneke, 1989) e o Reino Unido produz cerca de 3.300.000 toneladas anuais (The Chem. Enginner, 1990). Não há estimativas globais para o Brasil, mas comparando-se a atividade industrial e Produto Interno Bruto nacionais, proporcionalmente aos índices dos Estados Unidos e Grã-Bretanha, pode ser estimado a produção nacional de resíduos em aproximadamente 1.500.000 toneladas anuais.

Dentre as diversas formas de tratamento e disposição de resíduos perigosos, a incineração térmica têm-se mostrado uma das mais eficientes e adequadas. A incineração tem por objetivo a destruição do fator ou componente perigoso dos resíduos, através da oxidação completa, transformando resíduos em gases menos tóxicos, tais como dióxido de carbono e vapor d'água, e em resíduos sólidos disponíveis em aterros, tais como cinzas inertes. Outros tipos de efluentes gasosos da incineração, SO_2 , HCl e NO_x , por exemplo, podem ser controlados através de tecnologias adequadas.

Como melhor alternativa à incineração térmica, somente a reciclagem e/ou minimização da produção de resíduos podem ser competitivas, porém não excluem a necessidade de incineração, mesmo que em menor escala. Mesmo que se aprimorem os processos químicos de fabricação, que se selecione ou utilize "tecnologias limpas", ou que se desenvolva e incentive técnicas de reciclagem, sempre haverá algum resíduo, alguma parcela ainda que pequena, cuja melhor forma de disposição é a incineração térmica.

1.2 O Processo de Incineração Térmica

O processo de incineração térmica emprega a oxidação química em alta temperatura para destruição dos compostos perigosos, transformando-os em substâncias de baixo potencial químico e físico, tais como CO_2 e H_2O , resultados da oxidação completa de hidrocarbonetos e sendo assim, resíduos orgânicos são os grandes candidatos a incineração térmica. A redução de volume é uma consequência vantajosa do processo, pois da transformação da parcela orgânica em gases exauridos para a atmosfera, restam apenas as cinzas (sais minerais, metais, etc.). Embora a parcela de compostos orgânicos normalmente deva ser a preponderante, é possível incinerar também resíduos inorgânicos contaminados. Exemplo disso é a incineração de solos contaminados com pequenas concentrações de compostos orgânicos perigosos, geralmente da ordem de partes por milhão. Além de cinzas inertes, metais e seus óxidos, podem ser produzidos alguns compostos indesejáveis, tais como ácidos ou não inertes (HCl , HBr , SO_x , NO_x), material particulado e Produtos de Combustão Incompleta (PCIs).

A incineração é um complexo de fenômenos químicos e físicos, nem sempre completamente entendidos. Secagem, pirólise, redução e oxidação química são os principais fenômenos. Entende-se como secagem a evaporação da umidade contida nos resíduos de natureza sólido ou pastosa. Pirólise é um complexo fenômeno que envolve volatilização de compostos, quebra de moléculas e reações químicas internas em estruturas sólidas ou gases, geralmente através da atuação de energia térmica e ausência de oxigênio, ou com atmosfera redutora, ou seja, com teor de oxigênio abaixo do estequiometricamente necessário. Redução química é uma etapa intermediária, e pode ser classificada como uma das inúmeras reações em cadeia que compõem um processo de combustão, até a oxidação final do composto.

1.3 A Tecnologia de Incineração

A incineração em leito fixo sobre grelha, ou em poço, foi a técnica pioneira para destruição de resíduos sólidos, tendo sido aplicada inicialmente na destruição de resíduos urbanos. O incinerador de câmaras múltiplas utiliza o conceito de leito fixo, adicionado de uma câmara de pós-combustão para completa oxidação dos gases e voláteis originados na câmara primária. Melhoramentos incluem grelhas reciprocantes para revolvimento da massa sólida em combustão e o "Incinerador de Ar Controlado", com injeção de ar de combustão sub-estequiométrico na câmara primária e com controle de excesso de ar na câmara de pós-combustão. Tais tipos de incineradores tem sido adequados para destruição de resíduos hospitalares, lixo doméstico ou industrial comum, não perigosos. Um esquema do incinerador de câmaras múltiplas está apresentado na Figura 1. 1.

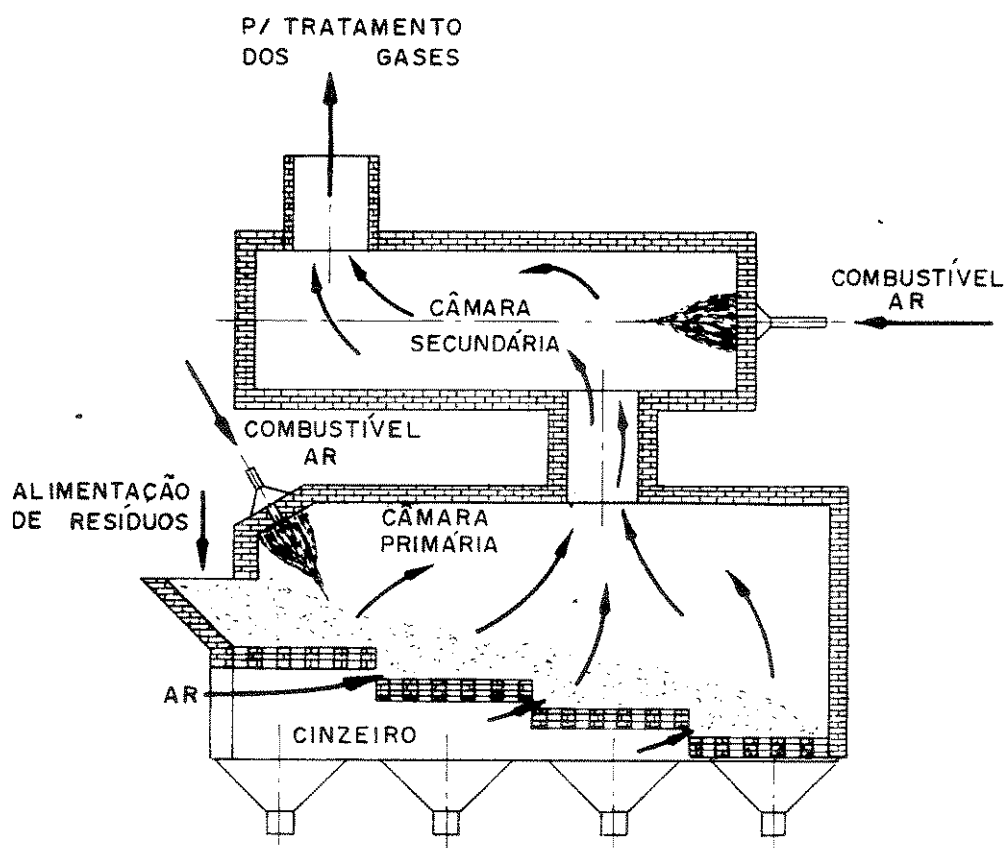


Figura 1. 1 Incinerador de câmaras múltiplas.

Na câmara primária ocorrem principalmente os processos de secagem e pirólise, incluindo aí a oxidação parcial do carbono fixo para CO. A grande vantagem da utilização de ar subestequiométrico nesta câmara é a menor velocidade dos gases, diminuindo o arraste de cinzas volantes e material particulado para a chaminé (Tessitore e Cross, 1988). Na câmara secundária ocorre a combustão completa dos gases e voláteis produzidos na primeira câmara, com auxílio de excesso de ar adequado. O tempo de residência dos sólidos na câmara primária é longo, da ordem de 30 a 180 minutos, e necessário para garantir a completa volatilização do resíduo e oxidação do carbono fixo, restando apenas as cinzas.

O sucesso do processo de incineração no que se refere à destruição dos resíduos e emissão de poluentes gasosos está no controle adequado da combustão na câmara secundária. Os principais parâmetros usuais na tecnologia de incineração são:

- temperatura da câmara secundária: 800 a 1400 °C;
- tempo de residência médio dos gases: 1 a 4 segundos;
- teor de oxigênio: 100 a 250% de excesso de ar.

A diversidade da forma física dos resíduos forçou o desenvolvimento de incineradores de forno rotativo, que se constituem hoje o tipo mais versátil para destruição de resíduos. Os fornos rotativos incineram diversos tipos de resíduos, desde sólidos finamente divididos, até tambores e pequenos contenedores preenchidos com resíduos; queimam pastas e borras e ainda líquidos nebulizáveis. O forno rotativo funciona como câmara primária, podendo operar com ou sem excesso de ar, sendo complementado por uma câmara secundária, onde se dá a combustão dos gases e voláteis. Estes tem sido utilizados para recuperação de solos degradados e contaminados por aterros inadequados, pois podem ser projetados para operar em larga faixa de temperaturas e tempos de residência (Oppelt, 1987). Sua grande desvantagem, a despeito da larga flexibilidade operacional, é o alto custo de investimento, o qual inviabiliza a implantação de pequenas unidades para o atendimento das necessidades dos pequenos geradores de resíduos. Um esquema do incinerador de forno rotativo é apresentado na Figura 1. 2.

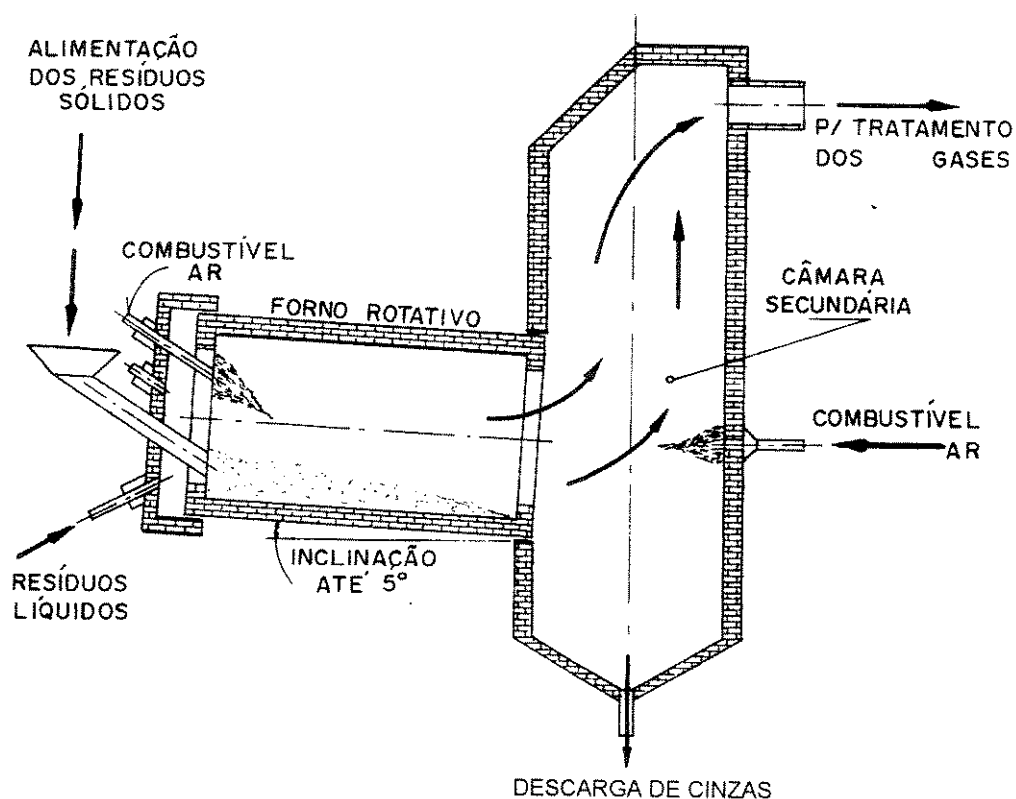


Figura 1.2 Incinerador de forno rotativo.

Quando o resíduo for líquido nebulizável, a incineração pode ser feita em incineradores de injeção líquida, constituídos por uma única câmara de combustão, onde o resíduo é nebulizado diretamente e queimado em suspensão, conforme apresentado na Figura 1.3. As etapas de volatilização, pirólise e combustão ocorrem em um mesmo espaço físico e o incinerador funciona como uma câmara secundária incinerando gases.

Todos estes tipos normalmente necessitam de uma fonte auxiliar de combustível, e são equipados com queimadores convencionais nas câmaras primária e secundária. Através de um balanço de energia do sistema, com informações sobre o poder calorífico do resíduo e suas variáveis operacionais determina-se a necessidade de combustível auxiliar.

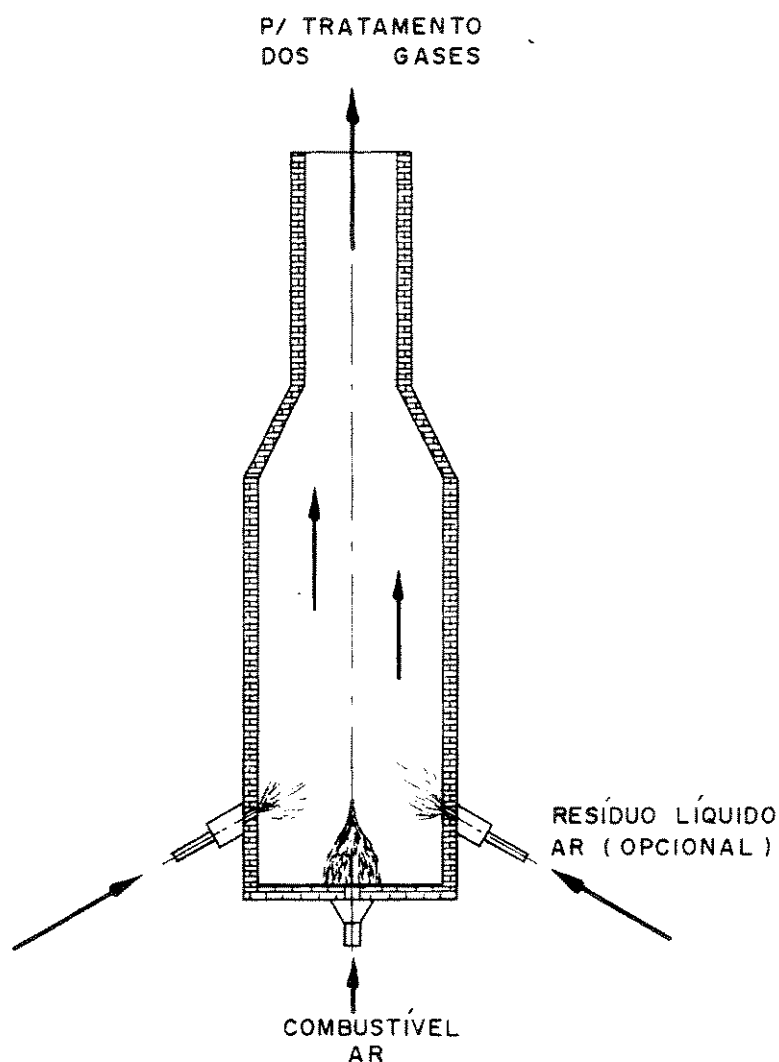


Figura 1. 3 Incinerador de injeção líquida.

Os incineradores de leito fluidizado tem aplicação mais recente, tendo sido utilizado para destruição de lodos provenientes do tratamento biológico de efluentes municipais e industriais. Apesar de necessitarem de alimentação contínua e uniformização do tamanho das partículas de resíduos, apresentam boa flexibilidade quanto ao estado físico dos resíduos, pois aceitam líquidos, pastas e sólidos granulados e pulverizados. Devido ao baixo excesso de ar requerido, pois promovem excelente contacto entre ar e resíduo, aceitam resíduos de alta umidade com menor necessidade de combustível adicional. Tem grande possibilidade de

recuperação de calor dos produtos de combustão e podem ser projetados e implantados a partir de pequenas capacidades nominais, sendo adequados, portanto, a larga faixa de usuários. Um esquema do incinerador de leito fluidizado é apresentado na Figura 1. 4. Versões mais modernas deste incinerador tem apresentado também uma câmara secundária, com o sistema de leito fluidizado operando como câmara primária.

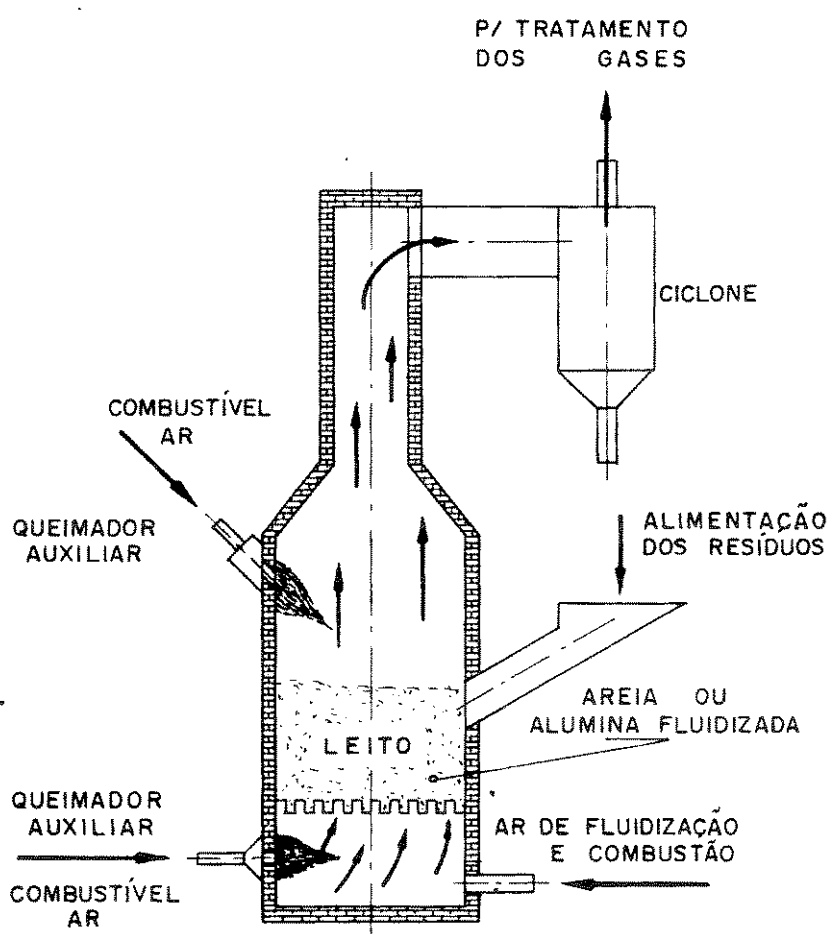


Figura 1. 4 Incinerador de leito fluidizado.

Capítulo 2

Parâmetros que atuam no desempenho de incineradores

Neste capítulo são introduzidos os parâmetros que definem e influenciam o desempenho de incineradores e se apresenta o estado-da-arte de sua atuação no processo de combustão numa câmara secundária. São estudados:

- medidas de desempenho de incineradores de resíduos perigosos;
- monitoramento de incineradores;
- cinética da combustão;
- aerodinâmica de câmaras de combustão;
- mistura e reações químicas;
- distribuição do tempo de residência.

2.1 Eficiência de destruição dos resíduos e emissões gasosas de incineradores

O desempenho de incineradores de resíduos perigosos é medido normalmente por dois parâmetros principais: a eficiência de destruição dos resíduos e as emissões gasosas do incinerador. A norma brasileira NBR-11175, bem como outras normas internacionais dispõe

sobre padrões de desempenho de incineradores, fixando valores mínimos para a eficiência de combustão, limitando emissões atmosféricas de determinadas substâncias e especificando condições operacionais e de monitoramento.

A Eficiência de Destruição e Remoção E_d é definida como:

$$E_d = \frac{PCOP_{entrada} - PCOP_{saida}}{PCOP_{entrada}} \quad (2.1)$$

onde:

PCOP: principais compostos orgânicos perigosos, os quais são compostos e substâncias relacionadas na listagem nº 4 da norma NBR-10004 - Resíduos Sólidos.

Entrada e saída correspondem às taxas de alimentação e taxas de emissão medidas na entrada do incinerador e na chaminé de saída para atmosfera (kg/s).

A norma exige comprovação, através de testes operacionais de queima, de Eficiência de Destruição e Remoção E_d igual ou maior que 99,99% para PCOPs, e de 99,999% para PCBs (polibifenilas cloradas) e dioxinas. Normas internacionais tem exigido maiores eficiências de destruição e remoção. O teste de queima pode ser dispensado, contanto que as condições de projeto e operação sejam:

- temperatura mínima de saída na câmara secundária: 1200° C;
- tempo de residência mínimo na câmara secundária: 2 segundos;
- temperatura mínima de saída da câmara primária: 1000° C;
- tempo de residência dos sólidos: 30 minutos em forno rotativo ou 60 minutos em leito fixo;
- mínimo de 7% O₂ nos gases de chaminé.

As normas nada especificam a respeito da emissão de Produtos de Combustão Incompleta (PCIs), mas determinam limites para emissões de CO, NO_x, SO₂, HCl, metais e outros compostos.

A avaliação do desempenho operacional de um incinerador deve ser feita através da avaliação e análise das descargas de massa que entram e saem do incinerador. O resíduo incinerado é transformado em produtos de combustão gasosos e cinzas. A combustão completa de hidrocarbonetos puros deve emitir somente dióxido de carbono e vapor de água. Compostos orgânicos mais complexos podem produzir outras substâncias, dependendo da composição do resíduo. A composição real dos produtos de combustão emitidos num processo de incineração não podem ser previstos através da simples análise estequiométrica das reações de oxidação, a partir da composição elementar do resíduo incinerado, considerando combustão completa no final do processo.

A termodinâmica dos processos químicos mostra que numa reação de oxidação, tal como acontece com a combustão de compostos orgânicos, a composição dos produtos da reação é função da temperatura e tempo de residência nesta condição, assumindo perfeita mistura entre reagentes. A situação real dos processos que ocorrem em sistemas de incineração não reproduz as condições de equilíbrio químico, de modo que Principais Compostos Orgânicos Perigosos (PCOPs) que estão presentes no resíduo incinerado, e Produtos de Combustão Incompleta (PCIs) são emitidos por incineradores. Produtos de combustão incompleta são compostos orgânicos parcialmente oxidados, e intermediários da combustão altamente estáveis, como por exemplo, hidrocarbonetos aromáticos polinucleares. Um requisito básico para o bom desempenho dos processos de incineração é controlar tais emissões, e mantê-las dentro de valores e parâmetros aceitáveis para a saúde humana e meio ambiente.

Testes exaustivos em inúmeros incineradores de resíduos perigosos mostraram que sistemas adequadamente projetados e operados atingem as eficiências de destruição e remoção de resíduos atualmente desejadas, com emissões gasosas aceitáveis dentro do nível de segurança. Basicamente, as emissões de PCIs são da mesma ordem de grandeza das emissões de fontes convencionais de combustão utilizando combustíveis fósseis (Oppelt, 1987).

Duas questões são relevantes ao projeto e operação de incineradores de resíduos perigosos:

- a garantia de obtenção da eficiência de destruição requerida e,

- a garantia do controle de emissões gasosas para a atmosfera dentro das normas e limites de segurança.

A Eficiência de Destruição e Remoção é função de diversos fatores, entre eles:

- temperatura e tempo de residência na câmara de combustão;
- teor de oxigênio;
- tipo, características e composição química do resíduo;
- características fluidodinâmicas da câmara de combustão;
- método e controle da alimentação dos resíduos, ar de combustão e combustível auxiliar.

Grande importância tem sido dada às condições de temperatura e tempo de residência. Diversos testes de laboratório, tais como realizados por Graham, Hall e Dellinger(1986), no UDRI - University Dayton Research Institute, tiveram o objetivo de determinar tais parâmetros para diversos compostos. Estes testes foram realizados em experimentos de laboratório em condições de oxidação térmica sem chama e depois correlacionados com equações teóricas de cinética química, a fim de obter informações que permitiriam a previsão de resultados de testes de incineração antes da construção do protótipo ou sistema. Lee (1988) conseguiu, com alguns compostos, melhores condições de mistura entre reagentes, e os resultados são comparados na Figura 2. 1.

Uma compilação de resultados de testes em escala industrial de diversos incineradores mostrou que os resultados são melhores que os obtidos em laboratório, em oxidação térmica sem chama (Lee, 1987). Mesmo compostos considerados estáveis, foram destruídos em 99,99% a temperaturas da ordem de 900°C e 2 segundos de tempo de residência. Muitos autores sustentam que nenhum composto orgânico sobrevive a temperaturas maiores que 900°C e 2 segundos de tempo de residência (Lee, 1988).

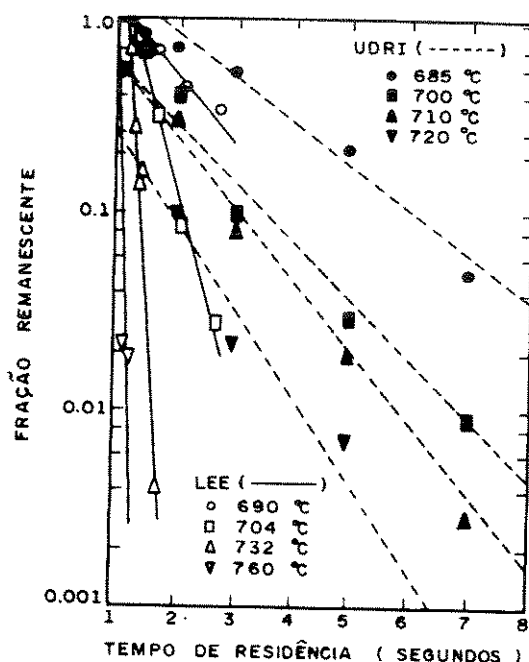


Figura 2. 1 Comparação da eficiência de destruição de benzeno obtidas pelo UDRI, e por Lee(1988).

Em escala de laboratório não é possível reproduzir condições tais como mistura e turbulência na câmara de combustão, efeitos de resfriamento em paredes, padrões de escoamento e recirculação, concentração de oxigênio, presença de combustível auxiliar. Testes de laboratório servem para uma avaliação qualitativa prévia entre condições de operação e tipos de resíduos, sendo que alguns compostos ou misturas de compostos perigosos foram testados quanto à degradação térmica em ambiente oxidante sem chama (Graham, Hall e Dellinger, 1986 e Taylor e Dellinger, 1988). Uma escala de incinerabilidade foi estabelecida por Taylor, Dellinger e Lee (1990), utilizando a mesma metodologia, tentando determinar comparativamente a possibilidade de destruição de resíduos conforme sua composição química. Esta escala assume que se um determinado resíduo é destruído em um determinado sistema de incineração, com seus parâmetros de operação correspondentes, todos os resíduos que estão abaixo na escala de incinerabilidade também serão destruídos, com maior ou igual eficiência de destruição e remoção.

Apesar da utilidade desta classificação, ela não é totalmente segura. Como os compostos foram ensaiados individualmente, muitos resíduos, que são misturas de diversos

compostos, podem ser catalisados pela presença de outro resíduo, de maneira que o resultado pode ser melhor ou pior que o previsto. A Figura 2. 2 mostra o estudo comparativo da oxidação térmica de tricloroetileno na presença de metano (Senkan, 1988). Carroll et alii (1992) testaram em escala piloto um conjunto de compostos e Dellinger, Taylor e Lee (1993), testaram em escala real outro conjunto de compostos a fim de avaliar em campo a confiabilidade da escala e concluíram que, para os compostos utilizados a escala obteve 97,5% de confiabilidade em relação ao E_d dos compostos. A avaliação quanto a emissão de produtos de combustão incompleta não foi realizada.

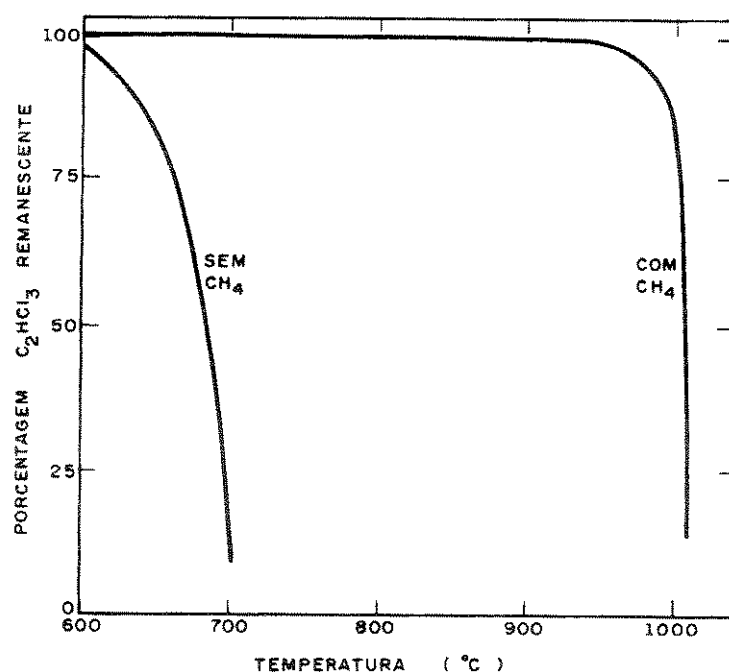


Figura 2. 2 Efeito qualitativo da presença de CH_4 na oxidação térmica de C_2HCl_3 (Senkan, 1988).

Alguns modelos utilizados para obtenção de dados cinéticos da incineração de compostos são modelos ideais, geralmente baseados na teoria do Reator de Fluxo Pistonado (Theodore e Reynolds, 1987), com base em teoria e correlações de cinética e equilíbrio químico (Cooper, Alley e Overcamp, 1982). O melhoramento do desempenho operacional de incineradores não parece estar limitado ou controlado apenas pelo equilíbrio químico já que as reações de oxidação de compostos orgânicos são extremamente rápidas. As combinações temperatura/tempo de residência necessários para destruição dos resíduos orgânicos podem ser diminuídas em relação às praticadas atualmente, já que estudos e resultados da cinética química assim indicam (Lee, 1988).

A causa mais provável de insucessos na operação de incineradores parece ser condições inadequadas de mistura entre os reagentes, ou seja, resíduo e ar de combustão. Os padrões de escoamento e recirculação dos gases e o método de alimentação do resíduos podem determinar maior ou menor eficiência de destruição em determinadas condições de operação. Radicais livres, altamente reativos e intermediários de combustão, podem escapar da zona de chama, ou serem resfriados em contacto com paredes mais frias, interrompendo a reação química e escapando assim da câmara de combustão. A estratificação da concentração de oxigênio, ou mesmo dos compostos incinerados, pode retardar a velocidade de reação, principalmente em regiões de baixa concentração, tais como na saída das câmaras de combustão. As eficiências de destruição requeridas são da ordem de 99,999%, resultando em emissões permitidas de concentrações extremamente baixas. Pequenas diferenças de concentração de reagentes ou temperaturas podem resultar em diminuição das velocidades de reação a ponto de não ser atingido o desempenho esperado ou previsto. A Figura 2. 3 mostra a comparação de temperatura e concentração de CO_2 em duas alturas diferentes na saída de um forno rotativo (Lester et alii, 1991). Cundy et alii (1991), em medições efetuadas também em incinerador de forno rotativo detectaram forte estratificação de compostos na saída do forno. De maneira geral, a câmara secundária de incineradores de forno rotativo não recebe, na entrada, uma mistura homogênea de gases, e os padrões de escoamento produzidos pelo queimador secundário devem ter importância significativa na eficiência da combustão.

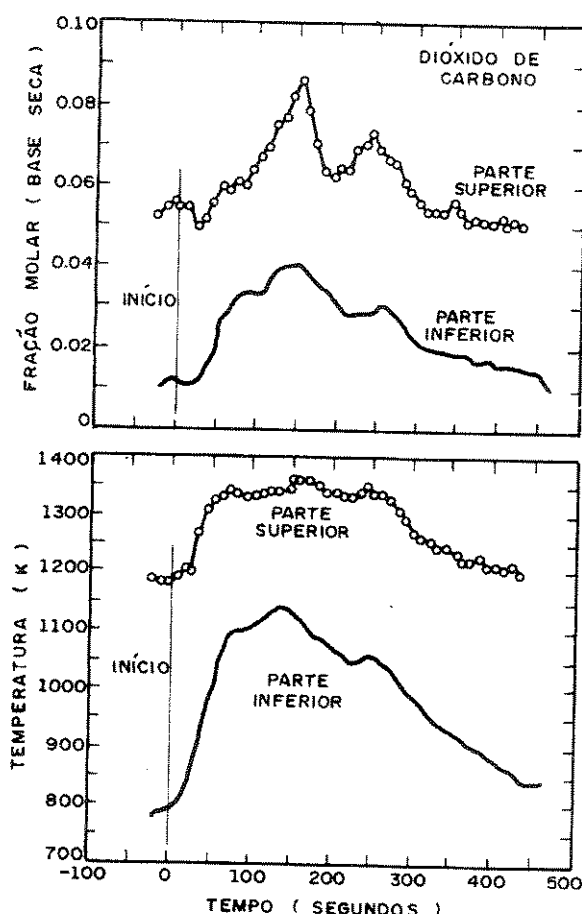


Figura 2. 3 Medidas de concentração de CO_2 e temperatura efetuadas na saída de um forno rotativo em diferentes alturas, durante operação normal, a 0,1 rpm. Valores obtidos da média de medições após alimentação de 6 caixas de resíduos a intervalos de 10 segundos (Lester, 1991).

2.2 Monitoramento do desempenho e da operação de incineradores

O controle de emissões gasosas pode ser feito continuamente através da análise dos gases de combustão. A tecnologia disponível permite o monitoramento contínuo de alguns gases, tais como CO , CO_2 , O_2 , SO_x , NO_x e hidrocarbonetos totais. É possível também

monitorar gases ácidos, como HCl , Cl_2 , H_2S . Cada um destes gases tem métodos específicos, com custos de investimento e de operação diversos. A prática corrente utiliza o monitoramento de O_2 e CO com o objetivo de controlar as condições de combustão e eficiência de destruição do resíduo, mas isto parece não ser suficiente para limitar as emissões de produtos de combustão incompleta.

A avaliação da eficiência de destruição e remoção obtida num incinerador, atualmente só é possível através de testes programados, onde métodos de amostragem de chaminé coletam substâncias voláteis emitidas, e adsorvidas adequadamente num receptor, para posterior análise química. Com o conhecimento de parâmetros mensuráveis de operação, como temperatura, vazão de ar de combustão, combustível auxiliar, alimentação do resíduo e sua composição, pode ser feita a avaliação da eficiência de destruição conseguida. Esta prática não assegura, entretanto, que a incineração se realize perfeitamente durante a operação normal do sistema. Condições anormais devido a falhas de equipamento ou operação não são evitadas pelo teste de queima. Um entupimento ou deterioração de um bico pulverizador, por exemplo, pode alterar a performance do sistema, e seria interessante que tal anomalia pudesse ser detectada instantaneamente.

Diversas pesquisas tem sido feitas com o intuito de tentar relacionar emissões de gases possíveis de monitoramento contínuo com a eficiência de destruição obtida (La Fond et alii, 1985, Dellinger e Hall, 1986).

La Fond et alii, 1985, testaram em uma câmara de combustão turbulenta a emissão de CO , HC totais e CH_4 e compararam a eficiência de destruição obtida com uma mistura de compostos, incluindo compostos halogenados, sendo que alguns resultados parciais são apresentados na Figura 2. 4. Observaram que o aumento da emissão de CO e HC totais precede a diminuição da eficiência de destruição de resíduos, o que não ocorre com CH_4 .

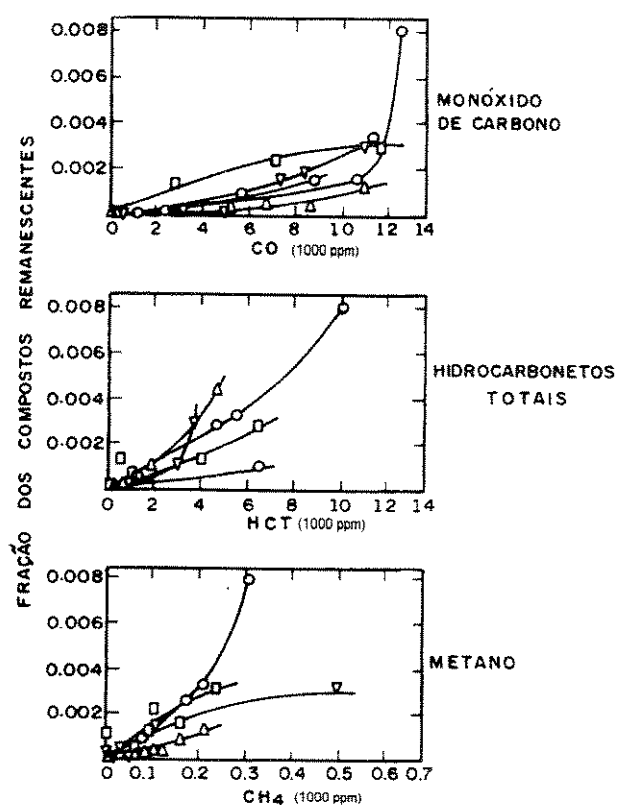


Figura 2. 4 Medidas experimentais de concentração de espécies intermediárias na saída de um incinerador piloto, em relação a eficiência de destruição do resíduo incinerado, em diversas condições de capacidade e excesso de ar (La Fond et alii, 1985).

A produção de CO está relacionada com o equilíbrio CO/CO_2 e, por ser um dos compostos mais estáveis, nas condições de incineração, em comparação com orgânicos, é hoje um indicativo de boas condições de combustão, sendo usado também em sistemas de potência, com combustíveis convencionais, a fim de controlar a eficiência de combustão.

Mantendo-se a concentração de CO dentro de certos limites, p.ex. 100 ppm, espera-se que a eficiência de destruição obtida esteja também dentro do previsto e necessário. Estudos em escala industrial mostraram a eficácia desse pressuposto (Wood et alii, 1989), porém, o resultado é que o monitoramento através da concentração de CO é uma medida muito

conservativa (Dempsey e Oppelt, 1993). A taxa de emissão de CO pode aumentar sem que necessariamente a eficiência de destruição dos resíduos seja diminuída. Um parâmetro de monitoramento por demais conservativo limita a operação de sistemas de incineração e impede uma maior adoção da incineração térmica como solução para a destinação de resíduos perigosos. Por outro lado, a inexistência de um monitoramento em tempo real da eficiência de destruição de resíduo não permite aumentar a confiabilidade da incineração térmica, principalmente aos olhos da comunidade não acadêmica. O monitoramento de hidrocarbonetos totais, em algumas situações, parece ser eficaz para o correlacionamento com a taxa de destruição de compostos orgânicos. Hidrocarbonetos totais incluem os Produtos de Combustão Incompleta e os Principais Compostos Orgânicos Perigosos presentes no resíduo incinerado, e a emissão de tais compostos mostra alguma correlação com a taxa de destruição requerida.

A Figura 2. 5 mostra a evolução da produção de PCIs, PCOPs e CO em testes de laboratório com chama pré-misturada (Bose e Senkan, 1983). Staley et alii(1989) e Roesler et alii(1995) analisam emissões da incineração de orgânicos halogenados, porém não encontraram correlação satisfatória entre a emissão de CO, HC e a eficiência de destruição e remoção.

O monitoramento da quantidade e qualidade dos poluentes emitidos deve ser considerado mais importante que apenas a eficiência de destruição do resíduo, embora as normas atuais avaliem o incinerador pela eficiência de destruição de determinados compostos, mas não determinam como controlar a possível transformação destes compostos em outros poluentes devido à reações na câmara de combustão. Toda fonte de combustão emite PCIs em maior ou menor concentração, dependendo do combustível e das suas condições de combustão. A incineração de resíduos orgânicos perigosos, monitorada pela máxima emissão de PCIs pode ser uma boa solução para o controle, em tempo real, da eficiência de destruição. A medição de hidrocarbonetos totais pode ser feita através de Detector de Ionização de Chama, e apresenta ainda alguns inconvenientes. Os problemas principais se relacionam com o método de captação da amostra, o tempo de resposta e a possibilidade de interferentes na medida, principalmente espécies cloradas, que alteram quantitativamente a resposta do detector (La Fond et alii, 1985).

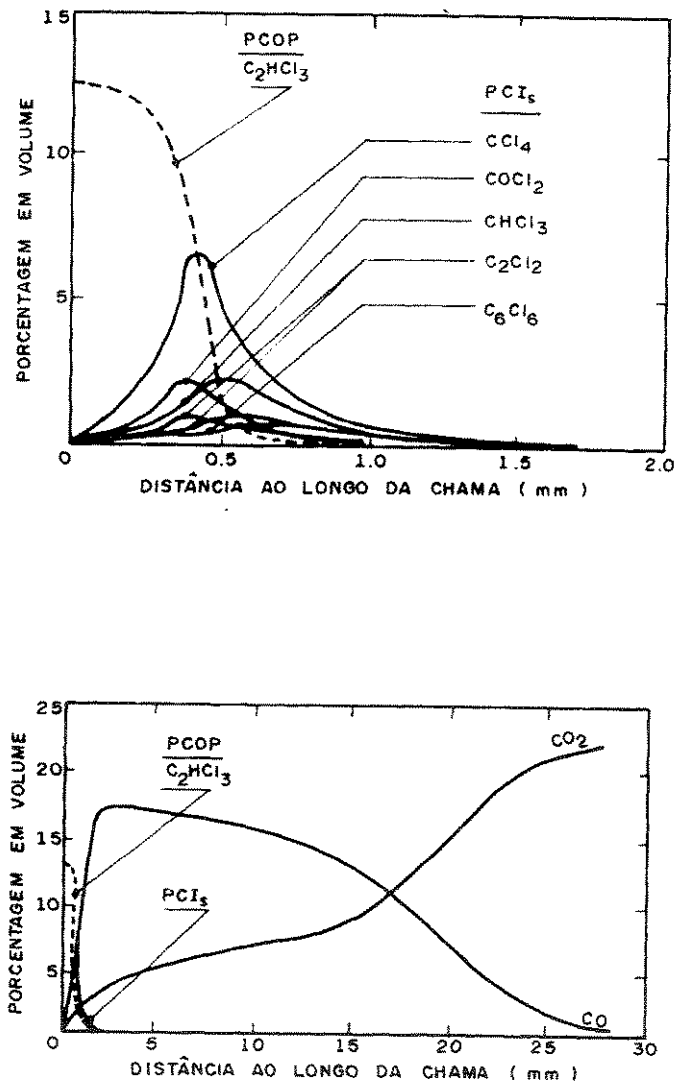


Figura 2. 5 Evolução da produção de PCOPs e PCIs em teste de chama pré-misturada (Bose e Senkan, 1983).

As câmaras de combustão apresentam complexos fenômenos de natureza química e física ocorrendo simultaneamente e envolvendo grande número de variáveis e grandezas difíceis de serem equacionadas e calculadas.

O comportamento de fluidos na câmara de combustão leva em conta as equações fundamentais da termodinâmica e fenômenos de transporte, tais como proposto por Bird, Stewart e Lighfoot (1960), através de equações de aplicação geral, ou por equações específicas e aplicadas a câmaras de combustão, como propostas e descritas por Beér e Chigier (1972). Este conjunto de equações, resolvido simultaneamente permite prever os padrões de escoamento no interior de uma câmara de combustão que atenda alguns parâmetros de desempenho, tais como taxas de transferência de calor, controle de emissões poluentes, possibilitando a otimização da geometria da câmara. Infelizmente, a quantidade de variáveis envolvidas, a presença de turbulência e reações químicas ainda não completamente conhecidas impedem resultados plenamente confiáveis, principalmente quando a grande preocupação é o controle de emissão de substâncias poluentes, com restrições de emissão da ordem de partes por milhão, o que implica na necessidade de estabelecer modelos e resoluções matemáticas de alta precisão.

Embora sejam conhecidas grande parte das propriedades da maioria dos gases de combustão, a diversidade de compostos em reação simultânea e alta temperatura em câmaras de combustão introduzem grande dificuldade de avaliação. Quando o processo de combustão envolve substâncias químicas não usuais, tais como nos processos de incineração de resíduos perigosos, a falta de informações de cinética química e até de propriedades físicas é um fator de dificuldade.

2.3 Cinética química da Combustão e Incineração

As reações químicas presentes na combustão e incineração de compostos ainda não foram todas identificadas dada a grande variedade de reações intermediárias e compostos instáveis, existentes em curto espaço de tempo e diluídos no reator com distribuição espacial não homogênea. A partir de dados experimentais, Lee et alii(1982), mostraram que as equações seguintes podem representar a taxa de reação de diversos compostos orgânicos:

$$\ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right) = \begin{cases} -k(\theta - \theta_1) & , \quad \theta > \theta_1 \\ 0 & , \quad \theta \leq \theta_1 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\theta_1 = x_1 - x_2 T \quad (2.3)$$

$$k = Ae^{-E/RT} \quad (2.4)$$

onde:

C_A : concentração final do composto A

C_{A0} : concentração inicial do composto A

T : temperatura absoluta da reação

$x1, x2$: constantes

k, A : constantes da taxa de reação segundo a equação de Arrhenius

E : energia de ativação

R : constante universal dos gases perfeitos

θ : tempo de residência médio

θ_1 : tempo de retardo da reação

Dados experimentais obtidos foram modelados e correlacionados por estas equações. O modelo assume que nenhuma reação ocorre até que seja decorrido o tempo de retardo θ_1 . Parâmetros foram estimados e alguns resultados tabelados por Theodore e Reynolds (1987), que através da comparação de características químicas estruturais dos compostos, temperatura de autoignição e outras propriedades, desenvolveram equações para predizer a cinética de destruição de compostos que ainda não foram testados experimentalmente.

Apesar da aparente utilidade destas equações, a diversificação de tipos e compostos de resíduos industriais limita sua aplicação a poucos casos especiais, cujos dados já estavam disponíveis na literatura através de resultados experimentais. As equações assumem

temperatura constante na câmara de incineração, o que não é exatamente uma limitação, mas uma prática de dimensionamento a favor da segurança, tomando como temperatura da câmara a temperatura de saída dos gases. O tempo de residência médio deve ser tomado como o tempo de permanência dos gases no volume compreendido entre o queimador e a saída de câmara de incineração. O resultado numérico fornece uma estimativa do tempo de residência necessário para destruir um composto com uma eficiência de destruição desejada, a uma determinada temperatura de incineração. Nada pode ser previsto a respeito da emissão de Produtos de Combustão Incompleta outros que não a do próprio composto incinerado.

2.4 Aerodinâmica de Câmaras de Combustão

A pesquisa em aerodinâmica de câmaras de combustão teve como objetivo inicial o estudo do espalhamento de jatos em ambientes não confinados, aplicados a combustão por difusão. A mistura entre fluidos, ou a variação da concentração em cada ponto da câmara é importante para o desempenho de queimadores e sua estabilidade de chama. Investigações sobre combustão turbulenta em ambientes confinados permitiram o desenvolvimento de diversas técnicas de estabilização de chamas baseadas na recirculação de gases quentes e intermediários de combustão na zona de ignição. Além da turbulência provocada pela injeção de jatos de fluidos, a presença de um obstáculo físico (“bluff bodies”) provoca uma zona de recirculação de gases, auxiliando a estabilidade de chamas.

Jatos com rotação (“swirl jet”) são utilizados normalmente para promover a estabilização de chamas em queimadores industriais, valendo-se das características de um movimento rotacional e de fenômenos de turbulência, provocando intensa zona de recirculação de gases, conforme esquematizado na Figura 2. 6.

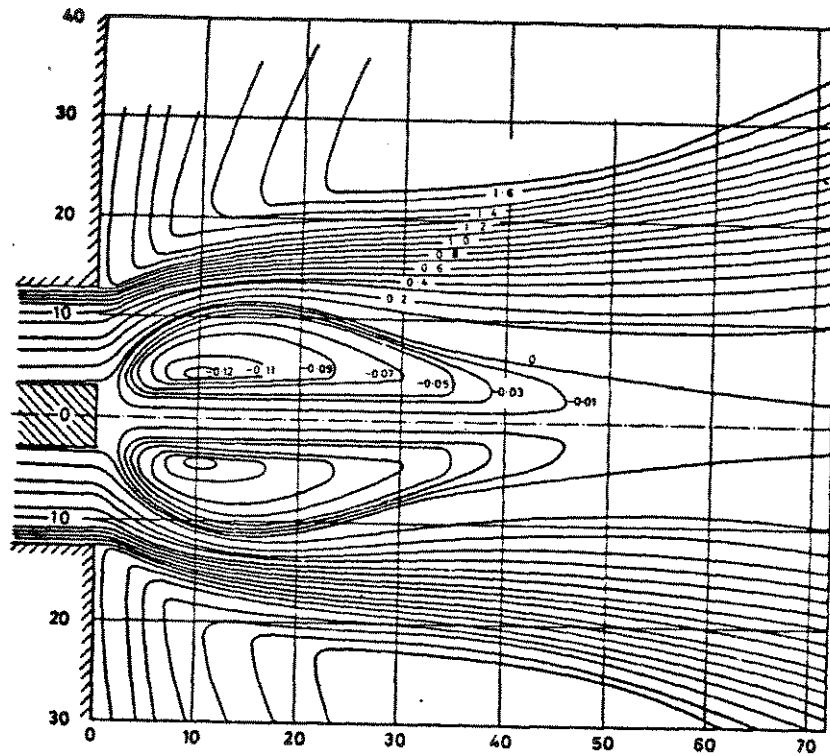


Figura 2. 6 Linhas de corrente típicas de escoamento com rotação - corte no plano axial (Beér e Chigier, 1972).

Beér e Chigier, 1972, consolidaram os estudos até a época, abordando a teoria da aerodinâmica da combustão e os dados experimentais sobre escoamentos com rotação, e propuseram um número adimensional, chamado Número de Rotação (“Swirl Number”), com a finalidade de caracterizar e avaliar a intensidade de jatos rotacionais, definido como:

$$S = \frac{G_{\varphi}}{G_x R} \quad (2.5)$$

onde

$$G_{\varphi} = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r \, dr \quad (2.6)$$

e

$$G_x = \int_0^R U \rho U 2\pi r \, dr + \int_0^R P 2\pi r \, dr \quad (2.7)$$

sendo:

G_ϕ : quantidade de movimento tangencial;

G_x : quantidade de movimento axial;

R : raio da saída do gerador de rotação;

U : componente axial da velocidade dos gases;

W : componente tangencial da velocidade dos gases;

r : posição radial;

P : pressão estática;

ρ : densidade dos gases;

Estudos experimentais comprovaram que tanto a quantidade de movimento tangencial G_ϕ , como a quantidade de movimento axial G_x são conservados em jatos ou chamas livres com rotação. O número de rotação S apresenta similaridade significativa em jatos produzidos por geradores de rotação geometricamente similares, permitindo a correlação de padrões de escoamento e recirculação em queimadores e fornalhas.

A rotação do escoamento numa corrente de fluido pode ser produzida por dispositivos adequados, tais como a entrada tangencial de ar num duto circular (Figura 2. 7) ou a utilização de aletas direcionais com inclinação axial (Figura 2. 8).

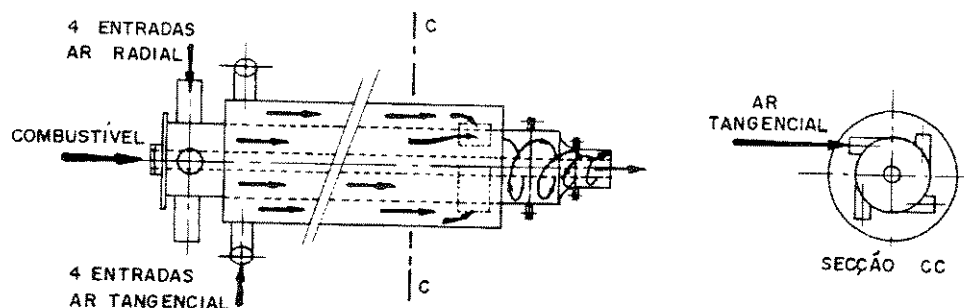


Figura 2. 7 Queimador de rotação com entradas de ar axial e tangencial.

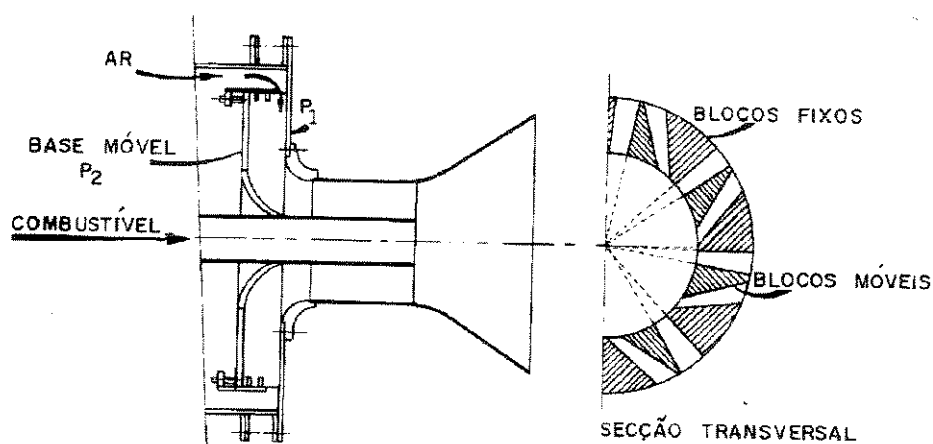


Figura 2. 8 Queimador de rotação com aletas direcionais de inclinação tangencial regulável e entrada de ar axial.

O número de rotação tem servido de base para a caracterização de escoamentos em fornalhas e queimadores. Devido a dificuldade experimental de se avaliar o valor da pressão estática P em cada posição r dentro de uma câmara de combustão, Beér e Chigier, 1972, propuseram uma simplificação da definição inicial, omitindo o segundo termo da expressão para a quantidade de movimento axial, permitindo a avaliação do número de rotação através da distribuição inicial de velocidades na entrada do gerador de rotação.

Beltagui e Maccallum, 1976, estudando escoamentos com rotação em fornalhas experimentais, concluíram que as dimensões da Zona Central de Recirculação(ZCR) dependiam mais do diâmetro da fornalha do que do diâmetro do gerador de rotação (normalmente, o queimador). Propuseram a definição de um novo número de rotação, omitindo o termo da pressão estática e substituindo R , o raio do gerador de rotação, por D , o diâmetro da fornalha. O novo número de rotação, S^* permite estabelecer similaridade de escoamentos com maior independência da relação de diâmetros da fornalha e do queimador, e da condição se o escoamento é isotérmico ou com chama. Apresenta também excelente similaridade em relação ao máximo fluxo reverso na ZCR, definido como a relação entre o fluxo de massa que retorna à Zona de Recirculação e o fluxo de massa total injetado na fornalha.

A intensidade da Zona Central de Recirculação é definida pela relação entre o fluxo de massa reverso e o fluxo de massa que entra na fornalha. Uma relação linear entre a intensidade da ZCR e o número de rotação efetivo é demonstrado pelos resultados de diversos experimentos.

El-Mahallawy et alii, 1977, estudaram o efeito da combustão na similaridade entre escoamentos a frio e a quente e concluíram, tal qual Weber e Dugué (1992), que a combustão aumenta a aceleração axial, ou seja, a quantidade de movimento axial, reduzindo o tamanho e intensidade da Zona Central de Recirculação. A combustão altera a distribuição das linhas de corrente, mas tem pouco efeito na quantidade de movimento tangencial. Através de dados experimentais propuseram uma correlação entre o número de rotação frio e um número de rotação a quente que produz os mesmos padrões de escoamento e intensidade da Zona de Recirculação. Esta correlação, porém, só deve ser usada em geometrias similares ao experimento.

Styles, Syred e Najim, 1979, utilizaram-se de um modelo com água para comparar o comportamento de um combustor ciclônico. Baseado na observação dos padrões de escoamento e na localização e formato da Zona de Recirculação propuseram uma correlação do número de rotação a frio e levando em conta o efeito da combustão:

$$S_{combust\tilde{a}o} \approx S_{isotermico} \frac{T_{entrada} (^{\circ} K)}{T_{saida} (^{\circ} K)} \approx S_{isotermico} \frac{\rho_{saida}}{\rho_{entrada}} \quad (2.8)$$

Weber e Dugué, 1992, estudando a aceleração de escoamentos em combustão com rotação em fornalhas altamente confinadas propuseram o seguinte número de rotação efetivo para chamas bem misturadas:

$$S_{efet} = S \frac{G_{x,frio}}{G_{x,combust\tilde{a}o}} \quad (2.9)$$

Para baixos números de rotação ($S < 0,7$), o número de rotação efetivo simplifica-se como o definido anteriormente por Styles et alii.

Moneib et alii, 1977, relacionaram teoricamente o número de rotação com as dimensões da Zona Central de Recirculação e estabeleceram um parâmetro adimensional relativo ao diâmetro da ZCR, porém os resultados são apenas razoáveis. Serag-Eldin, 1977 propôs um modelo teórico de escoamento frio, considerando turbulência que apresentou ótimos resultados com experimentos a frio. Khalil, 1977, propôs um modelo completo de simulação de câmaras de combustão, incluindo equações de turbulência e modelos de cinética de reação. Comparando com resultados experimentais conseguiu boa concordância no que se refere ao raio da ZCR em relação ao número de rotação e aos perfis de velocidade axial e tangencial. Foram testados 3 modelos de reação e concluiu que a cinética química apresenta a maior fonte de imprecisão. Risk e Mongia (1993, 1993 e 1995) estabeleceram um modelo tridimensional de combustor para turbinas à gás, aliado a correlações semi-analíticas de emissão de CO e HC totais, que resultaram em boa correlação com resultados experimentais.

2.5 Mistura e Reação Química

A boa mistura entre combustível e comburente sempre foi perseguida no projeto e desenvolvimento de queimadores e é realmente necessária para a estabilidade da chama e o desempenho de combustores em larga faixa de operação. O conceito clássico dos 3 T's, temperatura, tempo e turbulência, largamente utilizado em sistemas de combustão tem como base fundamental o contato homogêneo e total dos reagentes para se obter combustão completa, com total oxidação do combustível, transformando hidrocarbonetos em CO_2 e H_2O . Inicialmente o objetivo principal no projeto de um combustor era conseguir um "Reator Bem Misturado". A combustão incompleta era detectada pela presença de CO e fuligem, não se considerando, nos primórdios do desenvolvimento experimental de combustores com rotação, a emissão de outros compostos poluentes, tais como NO_x e hidrocarbonetos polinucleares. A preocupação com a produção de tais poluentes é relativamente recente, e advém tanto dos atuais conceitos de gerenciamento ambiental, como do desenvolvimento de instrumentação que permite detectar e analisar as baixas concentrações usuais destes compostos.

Bowman, 1975, revisou a cinética de formação de poluentes em processos de combustão e destacou que, muitos compostos encontrados em produtos de combustão não fazem parte da composição inicial do combustível, sugerindo que um complicado processo de pirólise, síntese e oxidação compõe os mecanismos do processo de combustão.

Pratt(1976), revisando os processos de mistura e reação química em combustão contínua, relacionou a formação de poluentes às flutuações turbulentas e intermitência espacial da temperatura e concentração de espécies químicas. Destacou o problema da flutuação e sua complicada representação matemática. Com o objetivo de modelamento matemático alternativo aos dois modelos clássicos de Reatores, o "Reator Bem Misturado", e o "Reator de Fluxo Pistonado", propôs um modelo para a descrição dos padrões de mistura de fluidos e partículas dentro do reator, que considera basicamente a Distribuição do Tempo de Residência, na tentativa de representar o efeito verdadeiro da turbulência e dos padrões de escoamento na mistura dos reagentes.

Claypole e Syred(1982), estudando a estabilidade de chamas em combustores com rotação propuseram um modelo físico simplificado do escoamento na combustão, onde dividiram as regiões de chama em regiões de "Reator Bem Misturado" e de "Reator em Fluxo Pistonado"

2.6 A Distribuição do Tempo de Residência

Os conceitos apresentados a seguir, são detalhados em Levenspiel, 1972. Elementos de fluidos que percorrem caminhos diferentes num reator ou câmara de combustão podem gastar tempos diferentes para o atravessarem. A representação da distribuição deste tempos de saída é chamada Distribuição de Tempo de Residência, a curva E , expressa de tal maneira que a área sob a curva seja unitária:

$$\int_0^{\infty} E \, dt = 1 \quad (2.10)$$

A fração de fluido com tempo (ou idade) de saída maior que t_1 é:

$$\int_{t_1}^{\infty} E \, dt \quad (2.11)$$

representada na Figura 2. 9.

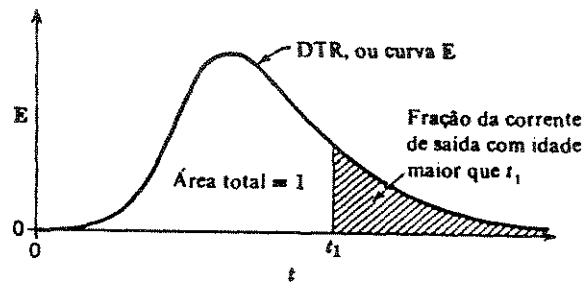


Figura 2. 9 A curva E de distribuição do tempo de saída para um fluido escoando através de um vaso fechado (Levenspiel, 1972).

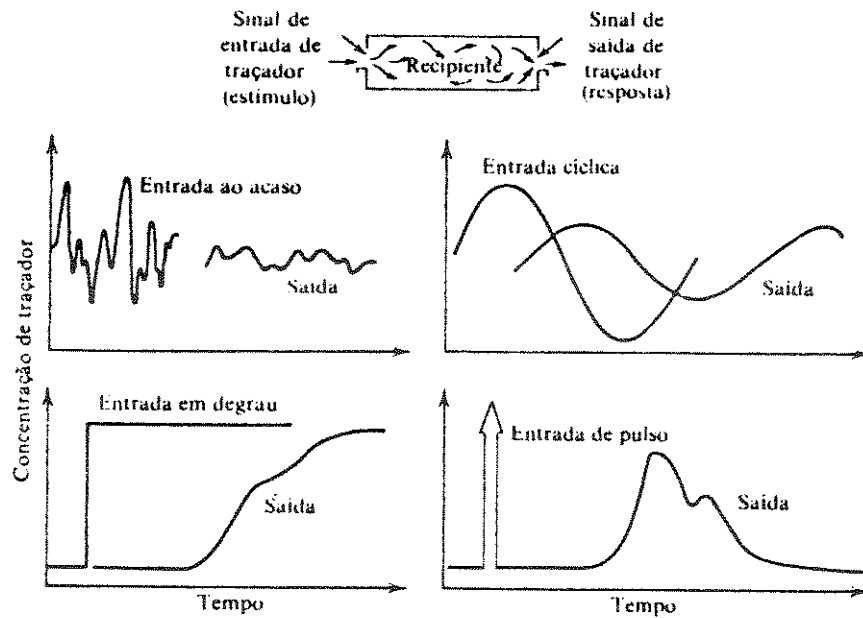


Figura 2. 10 Técnicas de estímulo-resposta comumente usadas para estudo da distribuição de tempo de residência em reatores (Levenspiel, 1972).

A curva E é útil no estudo de escoamentos não-ideais, ou seja, escoamentos que se afastam dos modelos de Fluxo Pistonado ou Reator bem Misturado. A determinação da curva E pode ser feita experimentalmente, através da técnica de estímulo e resposta. Promove-se a injeção de um traçador na entrada de um sistema e verifica-se a resposta desta perturbação na saída do mesmo. O sinal de entrada do traçador pode ser de diversos tipos, como por exemplo, em degrau, cíclico, etc., conforme mostrado na Figura 2. 10.

Se for fornecido na entrada da corrente um sinal de pulso de um traçador, conforme a Figura 2. 11, a concentração normalizada na saída do reator pode ser expressa tal que:

$$\int_0^{\infty} C \, dt = \int_0^{\infty} \frac{C_i}{Q} \, dt = 1 \quad (2.12)$$

onde:

$$Q = \int_0^{\infty} C_i \, dt \quad (2.13)$$

sendo:

$\bar{C}$: concentração normalizada do traçador na saída do reator;

C_i : concentração instantânea do traçador na saída do reator;

Q : área sob a curva concentração versus tempo; ou quantidade total da massa que originou o pulso.

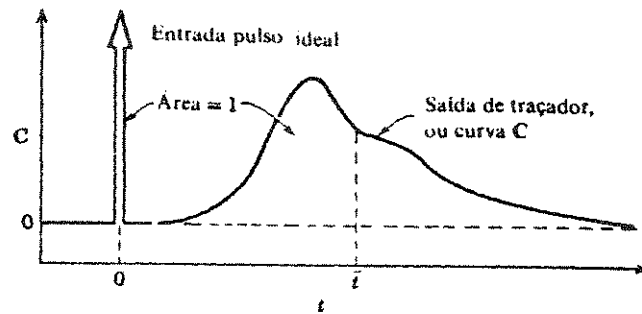


Figura 2. 11 Sinal típico a jusante, denominado curva C , como resposta a um sinal de entrada em pulso ideal (Levenspiel, 1972).

Para um recipiente fechado, definido como sendo um vaso onde o fluido escoar em regime permanente e com perfil plano de velocidades nos dutos de entrada e saída, Levenspiel (1972), mostrou que:

$$C = E \quad (2.14)$$

O tempo de residência médio $\bar{t}$ é definido como a relação entre o volume útil do reator e a vazão volumétrica dos fluidos entrando ou saindo. Levenspiel também demonstrou que:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t E dt = \frac{\text{volume}}{\text{vazão}} \quad (2.15)$$

Um sinal em degrau, também denominado impulso unitário, tem no sinal de saída do traçador a curva F . Pode ser demonstrado que:

$$F = \int_0^t E dt \quad (2.16)$$

Derivando esta expressão, tem-se:

$$E = \frac{dF}{dt} \quad (2.17)$$

ou seja, a distribuição do tempo de residência pode ser conhecida diretamente através da derivada em relação ao tempo da resposta, na saída, a um sinal tipo impulso unitário.

Pode ser conveniente caracterizar a distribuição do tempo de residência através de um parâmetro numérico, que represente a curva E ; para tanto, além do valor da média, já visto, considera-se a variância σ^2 da DTR, definida como:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 E dt \quad (2.18)$$

Para o caso de ser conhecida a curva de resposta através de medidas discretas, dentro de intervalos de tempo iguais, a média e a variância podem ser calculadas por:

$$\bar{t} = \sum t_i E_i \Delta t \quad (2.19)$$

e

$$\sigma^2 = \sum t_i^2 E_i \Delta t - \bar{t}^2 \quad (2.20)$$

Uma comparação de formas de curva de distribuição, e correspondentes variâncias está na Figura 2. 12.

Escoamento não-ideal

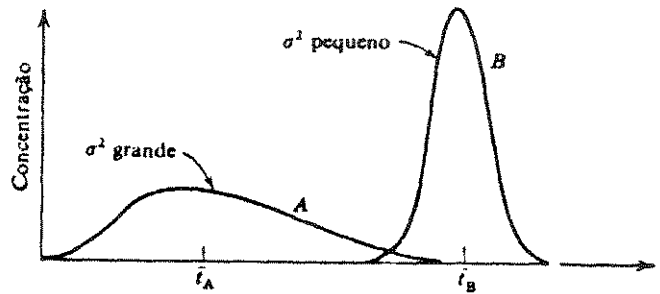


Figura 2. 12 Exemplos de média e variância da distribuição do tempo de residência(Levenspiel, 1972).

Em algumas situações não é possível a produção de um sinal de entrada perfeitamente definido, tal como o sinal de pulso ou o sinal degrau. É o caso, por exemplo, de dois recipientes em série, onde o sinal de entrada no segundo recipiente é modificado pelo passagem do traçador no primeiro recipiente. Um sinal de entrada genérico C_{ent} , tal como o mostrado na Figura 2. 13 ao passar pelo recipiente será modificado pela DTR do mesmo, ocasionando um sinal de saída C_{saida} , que é a convolução do sinal de entrada C_{ent} com a função E , que representa a DTR. A integral de convolução dos sinais consecutivos é:

$$C_{saida}(t) = \int_0^t C_{ent}(t-t')E(t')dt' \quad (2.21)$$

Conhecida a Distribuição do Tempo de Residência, a previsão da conversão de uma reação química pode ser tomada diretamente das informações de um traçador se a reação for de 1ª ordem, ou seja, linear; porém não permite sua previsão para reações de ordem diferente de 1. Reações de combustão e incineração são complexas o suficiente para não serem representadas por equações simples de cinética química, e não se pode esperar que as informações de um traçador para determinado modelo geométrico de uma fornalha resolva o problema da combustão incompleta; no entanto a informação da Distribuição do Tempo de

Residência pode ser útil para uma avaliação da não idealidade do escoamento de um reator e para comparações entre diversos padrões de escoamento. Wen e Fan (1975) fazem extensa compilação de teorias e modelos de distribuição de tempo de residência, descrevendo técnicas e aplicações a escoamentos e reatores. Em uma extensa lista de casos de aplicação da técnica de estímulo e resposta através de traçadores para determinação da DTR, nenhum dos casos se referia a câmaras de combustão.

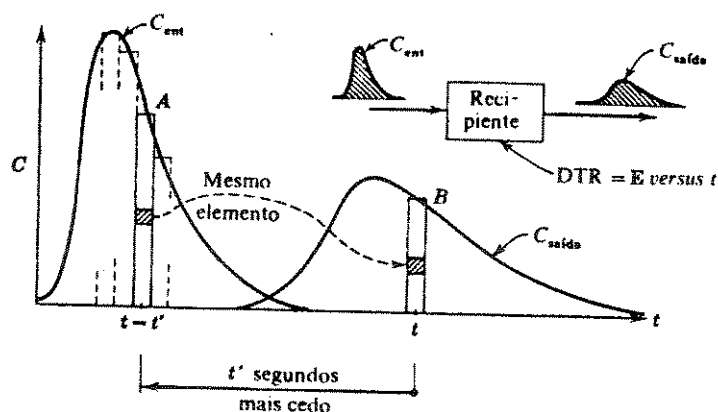


Figura 2. 13 Esquema demonstrativo da integral de convolução (Levenspiel, 1972).

A aplicação experimental de traçadores para determinação da DTR requer algumas condições básicas para o sucesso dos resultados:

- o traçador escolhido deve ser perfeitamente miscível com o fluido do escoamento estudado em quantidade pequena o suficiente para não afetar as condições de escoamento.
- o instrumento de detecção deverá ser sensível o suficiente para detectar as pequenas concentrações utilizadas. A fim de facilitar a interpretação dos dados, a resposta do instrumento de detecção deve ser linearmente proporcional à concentração.

Do ponto de vista da incineração com baixa emissão de poluentes o modelo ideal de reator seria um conjunto de dois reatores em série, sendo o primeiro um Reator Bem Misturado, seguido por um Reator de Fluxo Pistonado. O Reator Bem Misturado garantiria a mistura ideal entre os reagentes e a estabilidade da chama, enquanto que o Reator de Fluxo Pistonado garantiria o mesmo tempo de residência para todas as parcelas de fluidos, otimizando o volume da câmara de incineração. A distribuição não plana da DTR faz com que haja partículas de fluido com curto tempo nas condições de incineração, provocando a produção de Produtos de Combustão Incompleta, havendo, por outro lado, partículas de fluido com tempo de residência desnecessariamente maior que o tempo médio.

Field et alii, 1967, já descreviam a preocupação com a DTR em caldeiras de carvão pulverizado com fins de se obter combustão completa. A passagem mais rápida de partículas de carvão, não queimando completamente, diminui o rendimento de caldeiras e aumenta a emissão de particulados. Apesar da dificuldade tecnológica de medições da época, tais conceitos foram úteis na otimização de caldeiras. Beér e Chigier, 1972, descrevem alguns poucos resultados de testes de DTR utilizando hélio como traçador, realizado por outros pesquisadores, e aplicados à fornalhas de caldeiras. Concluíram que o número de rotação pode controlar a distribuição do tempo de residência e, conseqüentemente, a emissão de fuligem.

Chang et alii (1989), experimentaram em escala piloto a incineração de alguns líquidos organoclorados e hidrocarbonetos com o objetivo de estudar a emissão de Produtos de Combustão Incompleta. Apesar de que sua preocupação principal foi o processo de pulverização por gotas e falhas na pulverização, Chang assumiu que o reator utilizado no experimento comportava-se como um Reator Bem Misturado, não isolando o efeito da Distribuição do Tempo de Residência dentro da câmara de combustão. Chang, Mournighan e Huffman (1991) propuseram um método analítico de equilíbrio químico para previsão da emissão de PCIs na incineração de orgânicos clorados e concluíram que os resultados apresentavam alguma consistência com dados experimentais, porém não fizeram nenhuma comparação numérica direta.

Liu et alii (1992), efetuando testes com combustão de carvão pulverizado em fornalha piloto, observaram que o aumento da recirculação interna diminuía a eficiência de conversão de carbono, porém não ofereceu explicações baseadas na DTR., mas propuseram que um provável aumento do tempo de residência das partículas ocorria em regiões de baixa concentração de O_2 e menor temperatura.

Dada a dificuldade de calcular teoricamente o comportamento de câmaras de incineração, o ensaio em escala de laboratório parece ser uma alternativa a viabilizar. Williams et alii (1988), testaram um modelo tridimensional, em escala, de uma câmara secundária de um incinerador rotativo, com ar frio e um traçador de fumaça. Apesar de pouco embasamento teórico, propuseram a similaridade através do número de Reynolds, e determinaram o tempo de residência mínimo pela visualização do traçador de fumaça em câmara lenta de video-tape.

Nasserzadeh et alii, 1995, utilizaram a técnica de um sinal traçador pseudo-aleatório, com injeção de metano e resposta em CO_2 , aplicada a modelos em escala e a um incinerador de resíduos urbanos. Concluíram que o tempo de residência médio não representa adequadamente as condições de combustão e pode levar a resultados errados em relação à emissão de produtos de combustão incompleta.

É consenso que um fator de desempenho importante de incineradores, seja quanto à eficiência de destruição de resíduo ou à emissão de Produtos de Combustão Incompleta, é o projeto da câmara secundária de combustão. Fabricantes e operadores de incineradores na Europa tem reprojetoado suas câmaras secundárias, para um processo de combustão multiestágio, a fim de prevenir bolsões dentro da câmara (Gilges, 1991), mas ainda não caminharam para um modelo de reator mais perto do ideal.

2.7 Objetivos deste trabalho

Este trabalho teve por objetivo específico estudar a influência do número de rotação, e por consequência, a influência da fluidodinâmica na emissão de CO e HC totais em uma câmara secundária de incineração. Estudou-se também a influência da concentração do resíduo incinerado, na câmara secundária, e do excesso de ar.

Foram mantidas constantes o tempo de residência médio, a temperatura de saída e a potência específica da câmara de combustão.

O composto escolhido para ser utilizado como resíduo incinerado foi o tolueno, classificado na escala de incinerabilidade proposta por Taylor, Dellinger e Lee (1990), na décima sexta posição de dificuldade, entre os compostos não halogenados, atrás de benzeno, naftaleno, benzo-pireno e diversos derivados deste. O combustível utilizado, o GLP-gás liquefeito de petróleo, composto basicamente por propano e butano, não é listado na classificação citada.

A distribuição do tempo de residência foi estudada através da utilização da técnica de estímulo-resposta pela injeção de um sinal de concentração de SO_2 na entrada da câmara de combustão. O gás SO_2 foi escolhido como traçador pois:

- não é componente do combustível e resíduo utilizado;
- é relativamente estável dentro das condições de incineração adotadas;
- foi passível de monitoramento contínuo através de um analisador de SO_2 disponível.

Este analisador possui um conversor catalítico para SO_3 .

Para o estudo das emissões na saída da câmara foi mantido excesso de ar de 42%, variando o teor de tolueno no produto incinerado em 0%, 30% e 39% de tolueno, sendo efetuados testes com 8 números de rotação.

Foram efetuados testes com excesso de ar de 19% e 30% de tolueno no combustível, para 8 valores de número de rotação.

Foram efetuadas medidas locais no interior da câmara de combustão, para testes com 30% de tolueno e 42% de excesso de ar onde obteve-se:

- campo de velocidades para 2 números de rotação;
- distribuição de temperaturas para 3 números de rotação;
- distribuição de concentração de gases para 2 números de rotação.

Finalmente, foram medidas as variâncias da distribuição do tempo de residência, variando o número de rotação, com 30% de tolueno e 42% de excesso de ar.

Para realização dos teste propostos foram projetados e construídos:

- uma câmara de combustão cilíndrica horizontal, com isolamento térmico e acessórios;
- um queimador com dispositivo para variação do número rotação;
- um pirômetro de sucção, para medição de temperaturas dos gases;
- 3 tubos de Pitot de 5 furos, para medidas de velocidade;
- 2 sondas de amostragem de gases de combustão e
- um sistema de amostragem e análise de hidrocarbonetos totais, a partir de um cromatógrafo de ionização de chama.

Capítulo 3

DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

3.1 Fluxograma de Processo

A bancada experimental é composta por uma câmara de combustão cilíndrica horizontal, com um queimador equipado com dispositivo de regulação do número de Rotação. O queimador pode ser alimentado com gás liquefeito de petróleo (GLP) e com vapor de combustível líquido, produzido num vaporizador de combustível. Os produtos de combustão saem da fornalha pelo duto de saída, são resfriados rapidamente por um lavador resfriador de gases e succionados por um exaustor para a chaminé de descarga de gases e daí para fora do laboratório. A Figura 3. 1 apresenta um esquema do fluxograma de processo e instrumentação da bancada experimental.

3.2 Forno de testes

A câmara de combustão é cilíndrica e tem diâmetro interno de 470 mm e é construída em módulos de 600 mm, num total de 5 módulos, podendo medir até 3000 mm de comprimento. Neste trabalho foram utilizados três módulos, totalizando comprimento de 1800 mm. As dimensões da câmara foram adotadas de maneira que as sondas de medição de temperatura, velocidade e concentração de gases produzissem pouca interferência no escoamento e que fosse possível reproduzir condições típicas encontradas em câmaras de incineração. O corpo da fornalha é construído em chapa de aço carbono com revestimento interno de manta refratária de espessura 150 mm. Na lateral da fornalha, em cada módulo, foi construído uma abertura retangular, com dimensões 50 x 500 mm, permitindo a inserção de sondas para medição de temperatura, velocidade e composição dos gases de combustão em 90% do comprimento da fornalha. O fechamento destas aberturas é feito com tijolo isolante de modo a permitir a introdução das sondas com a retirada de apenas um tijolo.

A Figura 3.2 apresenta um esquema da fornalha com dimensões principais. A Figura 3.3 apresenta duas vistas da fornalha de testes com o carrinho, para apoio das sondas de temperatura, velocidade e amostragem de gases. O carrinho corre sobre trilhos nivelados na lateral da fornalha.

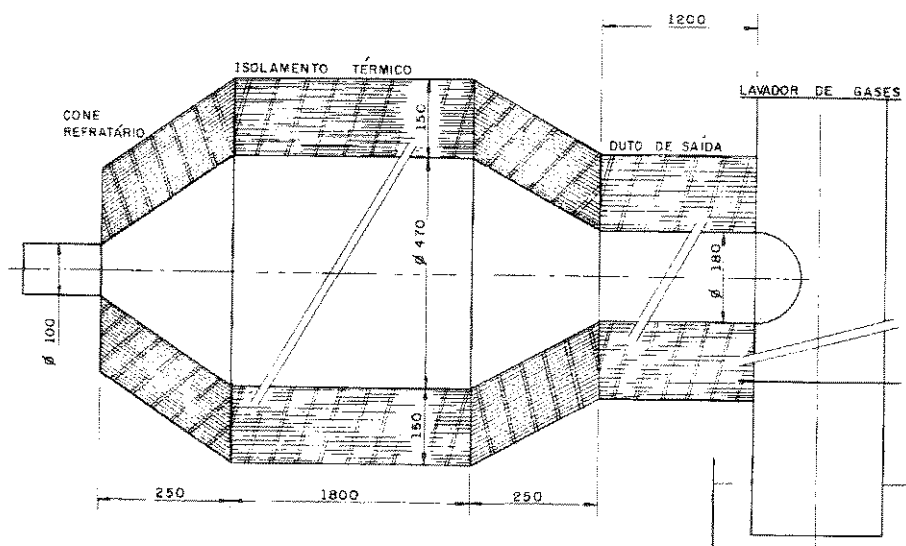


Figura 3.2 Dimensões principais (em mm, sem escala) da câmara de combustão.

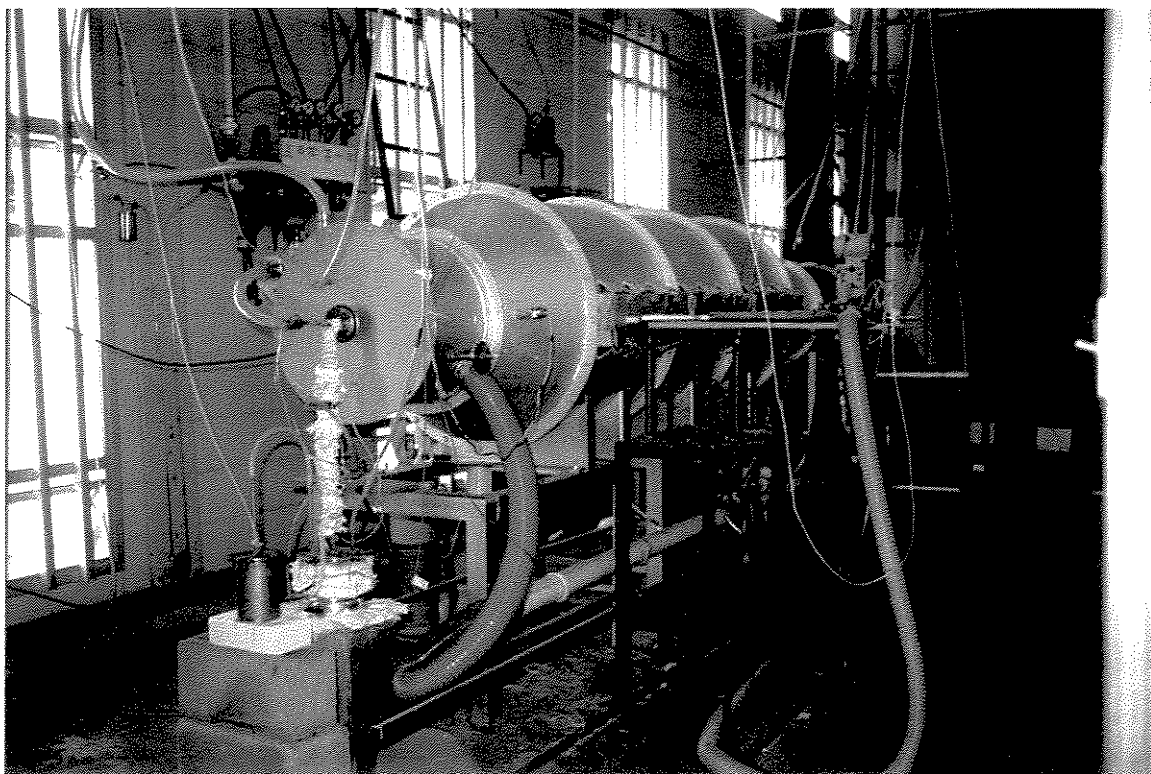
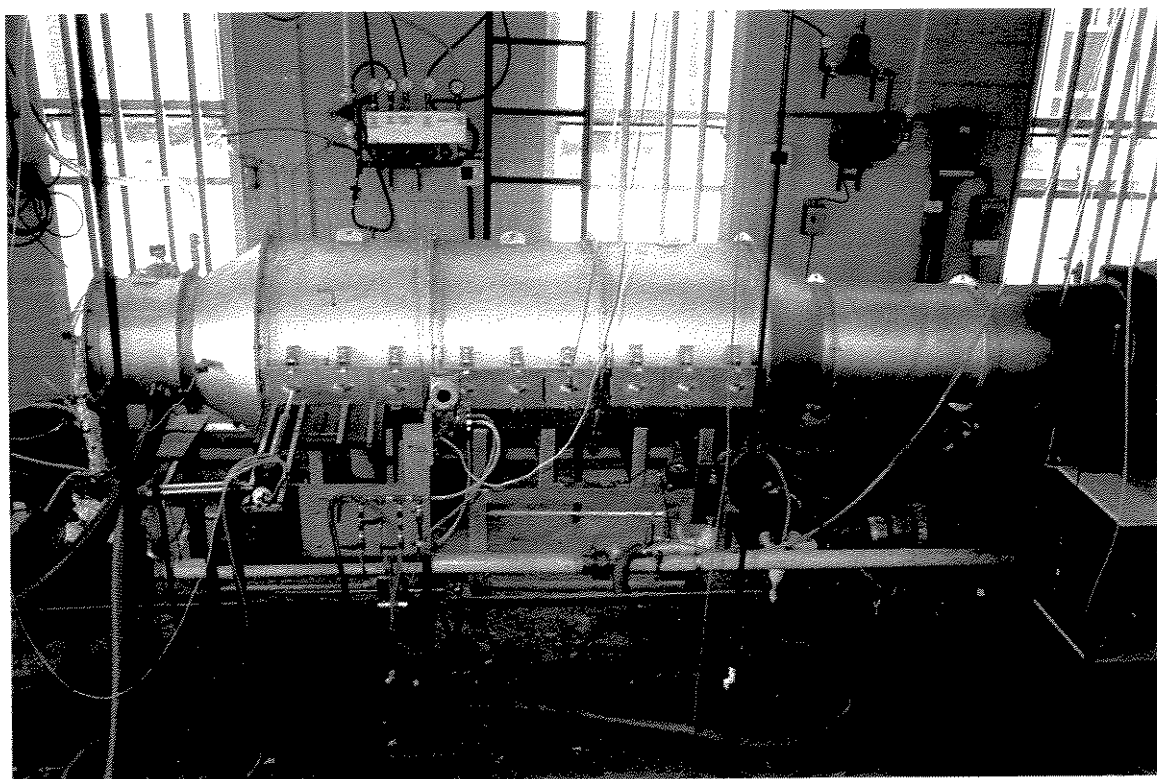


Figura 3. 3 Vista geral da bancada experimental.

3.3 Queimador

O queimador com número de rotação variável é construído com blocos direcionais, em aço inoxidável, conforme Beér e Chigier, 1972. A variação do número de rotação da fornalha é obtida através da variação da posição angular do bloco móvel, dosando a parcela de ar de combustão na direção radial e a parcela de ar na direção angular, a qual possui uma componente de velocidade tangencial. A Figura 3. 4 apresenta o desenho dos blocos direcionais e a Figura 3. 5 traz as fotos de cada bloco antes da montagem final. A Figura 3. 6 apresenta um desenho do conjunto do queimador.

A lança de combustível permite a injeção de GLP no duto central e a injeção de líquido vaporizado na camisa da lança. Como dispositivos de segurança, o sistema de combustão foi equipado com programador de combustão, célula ultravioleta para detecção de chama, sistema de ignição por eletrodos, e válvula solenóide na alimentação de GLP. A vazão de combustível líquido e de GLP é medida por rotâmetro e a vazão de ar de combustão por uma placa de orifício projetada segundo a norma ISO 5167.

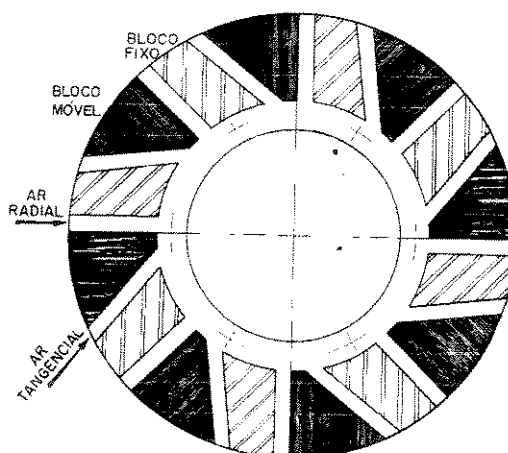


Figura 3. 4 Desenho dos blocos móveis para regulação do número de rotação.

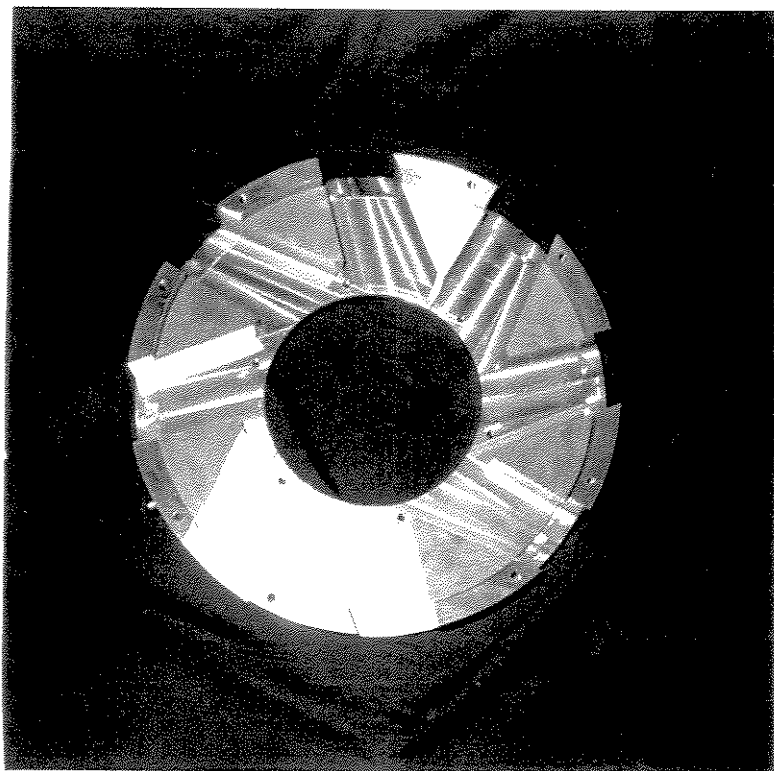


Figura 3. 5 Blocos direcionais do queimador antes da montagem final.

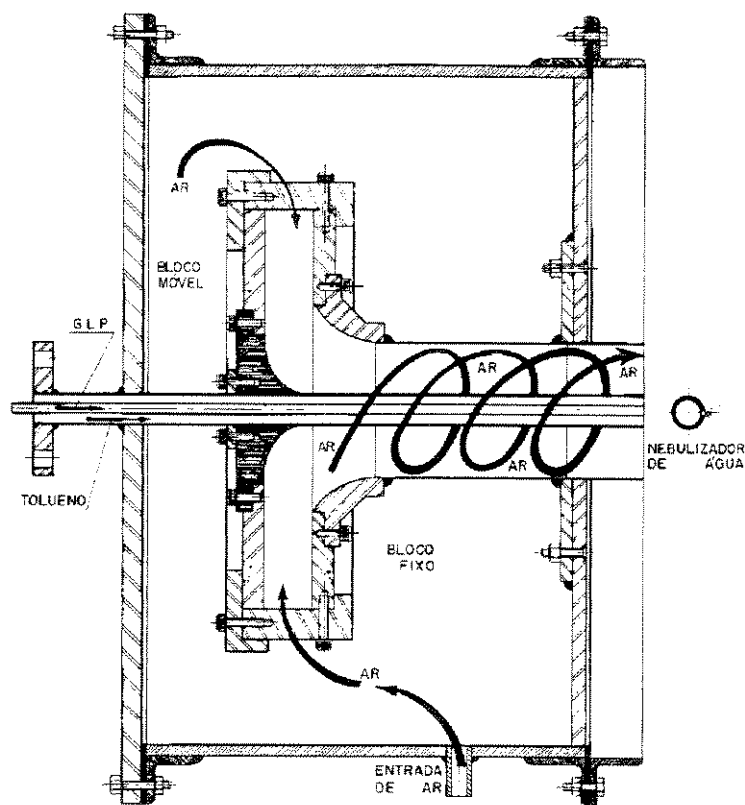


Figura 3. 6 Desenho do queimador com gerador de rotação do ar de combustão.

3.4 Vaporizador de combustível

O vaporizador de combustível líquido é um tanque de aço inoxidável aquecido na parte inferior externa por uma resistência elétrica embutida em placa refratária. A alimentação de líquido foi controlada por uma válvula agulha e bóia, mantendo constante o nível de líquido no interior do tanque de ebulição. A bóia e a válvula agulha foram montadas num tanque separado do tanque de ebulição, em comunicação com este, a fim de evitar a interferência da formação de bolhas e ebulição no controle de nível através da bóia. A resistência elétrica foi ligada a um variador de voltagem, possibilitando o controle da taxa de vaporização de líquido

através do controle da potência imposta ao aquecedor elétrico. A tensão de alimentação foi monitorada por um indicador digital de voltagem.

3.5 Nebulizador de água

Com a finalidade de controlar a temperatura de saída da câmara de combustão e simultaneamente o excesso de ar, foi instalado uma lança de nebulização de água posicionada a frente do centro do queimador, inserida através de um orifício na lateral do cone refratário. Sendo a câmara adiabática, a pulverização da água correspondeu a introdução de uma carga térmica de resfriamento possível de ser controlada. A água adicionada na câmara de combustão aproxima a composição dos gases no interior da câmara à da operação normal de um incinerador, que recebe resíduos com alto teor de umidade. A presença de água é uma característica comum em diversos resíduos industriais.

O sistema de nebulização de água é composto por uma bomba de média pressão (7 bar), válvula de regulagem de vazão, um medidor de vazão tipo tubo capilar, e lança nebulizadora de água, com orifício de 1,0 mm. Foi possível a nebulização na faixa de vazão de 60 a 120 kg/h.

3.6 Sistema de injeção de SO₂

O sistema de injeção de SO₂ foi utilizado para introduzir um sinal de concentração de SO₂ na entrada do ar de combustão. O sistema é composto por uma garrafa de SO₂, duas válvulas de regulagem de vazão, duas válvulas de bloqueio para abertura rápida e rotâmetro para medir a vazão instantânea de SO₂. O ponto de injeção é conectado na entrada do ar de combustão, antes de um misturador estático, cuja finalidade é homogeneizar a concentração de SO₂ na corrente do ar de combustão.

3.7 Duto de saída dos gases de combustão

O duto de saída de produtos de combustão da fornalha tem 178 mm de diâmetro interno por 1200 mm de comprimento. É composto internamente por um pré-moldado de fibra cerâmica rígida, com isolamento térmico de 120 mm de manta refratária. Na entrada do duto, foi instalado um misturador estático, construído em aço inoxidável refratário tipo AISI 310. A finalidade do misturador estático é homogeneizar a concentração dos gases de combustão na saída da fornalha antes da tomada de amostra, cuja sonda de amostragem está localizada no final do duto de saída. Além do misturador estático, um trecho reto de 5 diâmetros contribui para a homogeneização da mistura de gases e da temperatura de saída. Um termopar tipo K está instalado na mesma secção da sonda de amostragem. A Figura 3. 7 apresenta o misturador estático antes da montagem na fornalha.

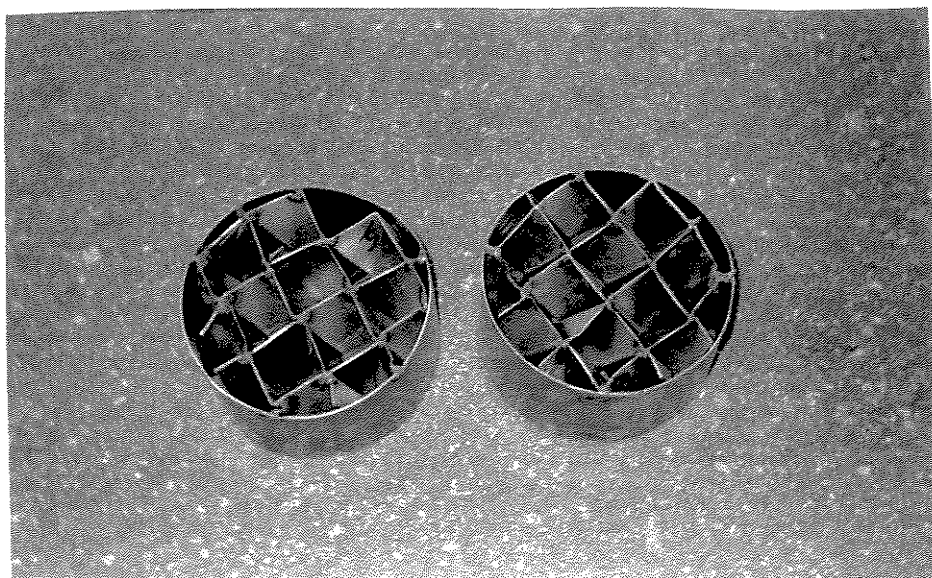


Figura 3. 7 Misturador estático em aço inoxidável refratário, antes da montagem no duto de saída dos gases da fornalha.

3.8 Resfriador rápido de gases e exaustor.

Os produtos de combustão são resfriados rapidamente por um lavador úmido de gases e são succionados por um exaustor, que os envia a chaminé. Uma válvula tipo borboleta permite regular a vazão total de gases e a pressão na câmara de combustão. Um termopar tipo J e um manômetro de coluna de água indicam temperatura e pressão na entrada do exaustor. Um manômetro inclinado de coluna de água foi instalado na região central da câmara de combustão para monitorar a regulagem da pressão interna da câmara próxima de zero.

3.9 Descrição da instrumentação

3.9.1 Medidores de vazão, temperatura e pressão

Os instrumentos utilizados na bancada experimental e suas características estão listados nas tabelas a seguir.

- Tabela 3.1 - Medidores de vazão
- Tabela 3.2 - Sensores de temperatura
- Tabela 3.3 - Medidores de temperatura
- Tabela 3.4 - Medidores de pressão

Na continuação descreve-se o pirômetro de sucção, a sonda de amostragem de gases, os analisadores de CO, O₂, SO₂, e hidrocarbonetos totais, e o tubo de Pitot de 5 furos.

Tabela 3. 1 Características dos medidores de vazão.

Item	Fluido	Tipo	Escala	Precisão	Fabricante
V1	GLP	rotâmetro	1 a 11 Nm ³ /h, densidade 2,272 kg/m ³	3% + 0,11 Nm ³ /h	Gemu mod. 875/21/44
V2	combustível líquido (tolueno)	rotâmetro	0 a 15 l/h	2%	Gilmont
V3	ar de combustão	placa de orifício d/D = 0,77	até 550 kg/h	0,8%	laboratório norma ISO 5167, ed. 1980
V4	SO ₂	rotâmetro	20 a 360 NI/h de ar, densidade 1,293 kg/m ³	3% + 3,6 NI/h	Gemu mod. 875/21/15
V5	produtos de combustão - saída do pirômetro de sucção	rotâmetro	200 a 2500 NI/h de ar, densidade 1,293 kg/m ³	3% + 25 NI/h	Gemu mod. 875/21/15
V6	água de nebulização	tubo capilar	até 150 kg/h	2 kg/h	laboratório

Tabela 3. 2 Características dos sensores de temperatura.

Item	Fluido	Tipo	Precisão	Dimensões	Fabricante
T1	ar de combustão	J	+ - 4°C	3 mm. inox 316	Robert Shaw
T2	combustível líquido vaporizado	J	+ - 4°C	3 mm. inox 316	Robert Shaw
T3	produtos de combustão - saída da fornalha	K	+ - 1%	3 mm. inconel	Robert Shaw
T4	produtos de combustão - saída do lavador	J	+ - 4°C	3 mm. inox 316	Robert Shaw
T5	produtos de combustão - em chama - pirômetro de sucção	S	+ - 0,5%	0,35 mm. tubo capilar 99% Al ₂ O ₃	Robert Shaw
T6	produtos de combustão - saída do resfriador do pirômetro de sucção	J	+ - 4°C	1,6 mm. inox 316	Robert Shaw
T7	gás de amostragem - saída da sonda refrigerada	J	+ - 4°C	1,6 mm. em inox 316	Robert Shaw

Tabela 3. 3 Características dos medidores eletrônicos de temperatura.

Tipo	Escala	Precisão	Fabricante	Modelo
J	-20 a 800° C	0.25% +- 1 dígito	Robert Shaw	IDT-800
K	-20 a 1250° C	0.25% +- 1 dígito	Robert Shaw	IDT-800
S	300 a 1700 °C	0.25% +- 1 dígito	Robert Shaw	IDT-800

Tabela 3. 4 Características dos medidores de pressão.

Item	Fluido	Tipo	Escala	Precisão
P1	ar de combustão	coluna de água	0 a 1000 mm	1 mm
P2	GLP	coluna de água	0 a 1000 mm	1 mm
P3	combustível líquido vaporizado	coluna de água	0 a 1000 mm	1 mm
P5	produtos de combustão - saída da fornalha	coluna de água	0 a 150 mm	1 mm
P6	produtos de combustão - saída do lavador	coluna de água	0 a 500 mm	1 mm
P7	água de recirculação do lavador-resfriador	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	
P8	produtos de combustão - saída do pirômetro de sucção	coluna de água	0 a 1000 mm	
P9	água de refrigeração do Pitot 5 furos	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	
P10	água de refrigeração da sonda de amostragem de gases	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	
P11	água de refrigeração do pirômetro de sucção	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	
P12	produtos de combustão - Pitot 5 furos	capacitivo	-500 a +500 Pa	0,5%
P13	câmara de combustão	inclinado	10 mm	0.2 mm

3.9.2 Pirômetro de Sucção

A medida de temperatura dos gases de combustão no interior da fornalha foi feita com uma sonda de sucção de gases, onde um sensor de temperatura é parcialmente protegido da radiação no interior da fornalha por uma dupla couraça de material refratário. O pirômetro de sucção foi projetado e construído seguindo recomendações de projeto e operação de Chedaille e Braud, 1972.

A fim de interferir o mínimo no escoamento dos gases de combustão, foi selecionado o menor diâmetro possível, considerando as dimensões dos tubos de alumina e dos tubos capilares para suporte do termopar disponíveis comercialmente. O diâmetro externo da sonda na ponta de cerâmica é 15 mm. A Figura 3. 8 apresenta um desenho esquemático do pirômetro enquanto que a Figura 3. 9 apresenta uma foto do pirômetro antes da montagem final. A Figura 3. 10 traz o fluxograma do sistema de sucção do pirômetro.

Para minimizar o erro de medição da temperatura do gás, Chedaille e Braud recomendam velocidade de sucção da ordem de 100 a 200 m/s ou fluxos de sucção da ordem de 50×10^3 kg/m²h. Nas dimensões escolhidas no presente projeto, operou-se com taxa de sucção de 70×10^3 kg/m²h e velocidade na ponta do termopar de 85 m/s. Nestas condições, a massa succionada pelo pirômetro em operação representava menos de 0,5% da descarga total de gases dentro da câmara de combustão, produzindo pouca distorção das linhas de corrente do escoamento no interior desta.

O Anexo A traz o método de cálculo da eficiência do pirômetro de sucção, utilizada para corrigir a temperatura medida no interior da fornalha, cujo valor encontrado foi 99% .

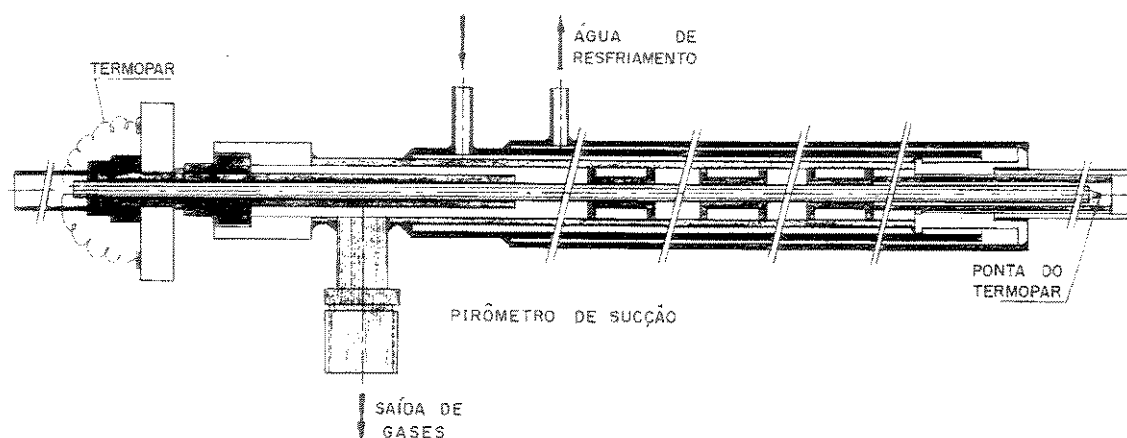


Figura 3. 8 Desenho esquemático do pirômetro de sucção.

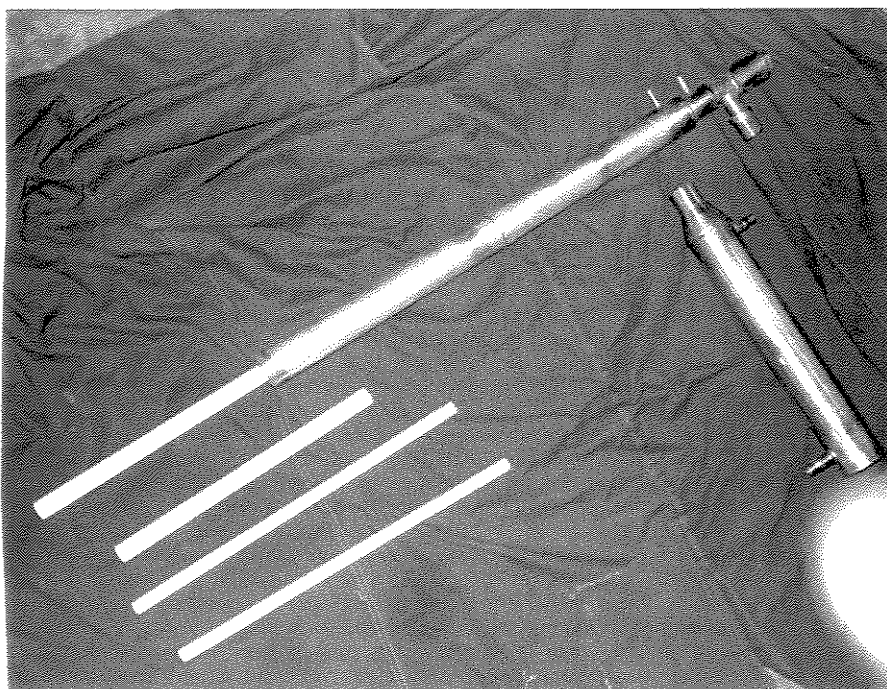


Figura 3. 9 Pirômetro de sucção, resfriador de gases e tubos de alumina sobressalentes, antes da montagem final no carrinho.

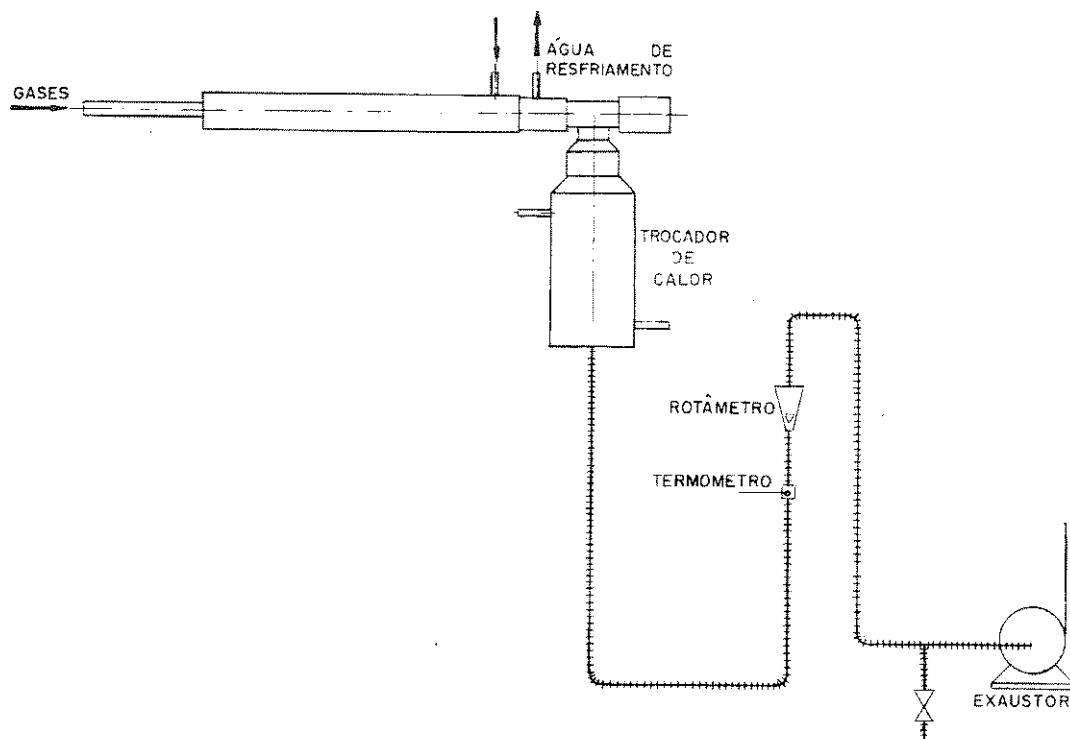


Figura 3. 10 Fluxograma do sistema de sucção do pirômetro.

3.9.3 Sonda de Amostragem de Gases

A amostragem de gases em ambiente de reação química exige que a reação seja interrompida no ponto de amostragem ou o mais próximo possível deste. Chedaille e Braud, 1972, sugerem que o resfriamento rápido para temperaturas menores do que 300 °C interrompe a maioria das reações de combustão. Neste trabalho, analisou-se CO, CO₂, SO₂, O₂ e Hidrocarbonetos totais e em temperatura abaixo de 300 °C, de modo que a composição da mistura não deve ter variado consideravelmente em relação ao ponto de amostragem no interior da câmara. Empiricamente foi estimado por Chedaille e Braud que um tempo de resfriamento menor do que 0,003 segundos é satisfatório para os propósitos de análise de gás amostrado numa câmara de combustão. Com uma sucção de 5 l/min, gases a 1500°C são resfriados a 200 °C em menos de 0,002 segundos num tubo de 3 mm de diâmetro, refrigerado com água. Nestas condições, o comprimento necessário da parte resfriada da sonda é da ordem de 30 mm.

Foram projetadas e construídas duas sondas de amostragem com diâmetro interno de 2 mm refrigeradas com água. As sondas possuem uma câmara de mistura e de separação da água condensada, com um termopar para controle da temperatura dos gases já resfriados. No circuito de sucção foi instalado um medidor de vazão para controlar a vazão do gás da amostra. A sucção foi feita por uma bomba de diafragma e o gás de amostra é enviado a um distribuidor com válvulas de bloqueio, permitindo o envio a cada um dos analisadores de gases: CO, CO₂, SO₂, O₂ e HC totais. A Figura 3. 11 apresenta um desenho esquemático de fabricação de uma das sondas.

A Figura 3. 12 traz o fluxograma do sistema de amostragem dos gases, com dispositivo de regulagem de pressão para evitar sobrepressão de gases, com a bomba de diafragma próxima ao ponto de amostragem. Todos os analisadores de gases também possuíam sua própria bomba de sucção, porém operando com vazões diferentes em cada analisador. A bomba de amostragem da sonda operou com vazão nominal de 5 l/min, e o regulador de pressão com alívio, equilibrava a vazão de alimentação conforme a sucção de cada analisador. As características principais de cada analisador são apresentados na Tabela 3. 5.

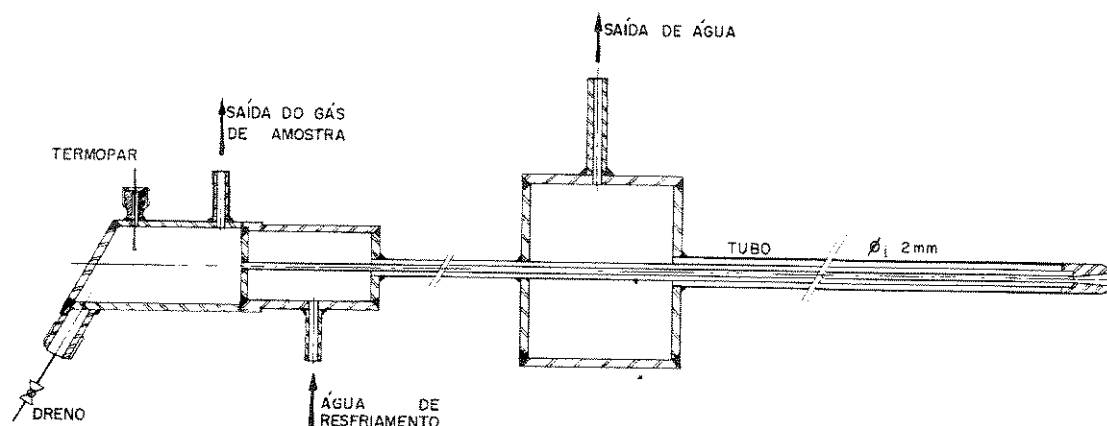


Figura 3. 11 Desenho esquemático da sonda de amostragem de gases de combustão.

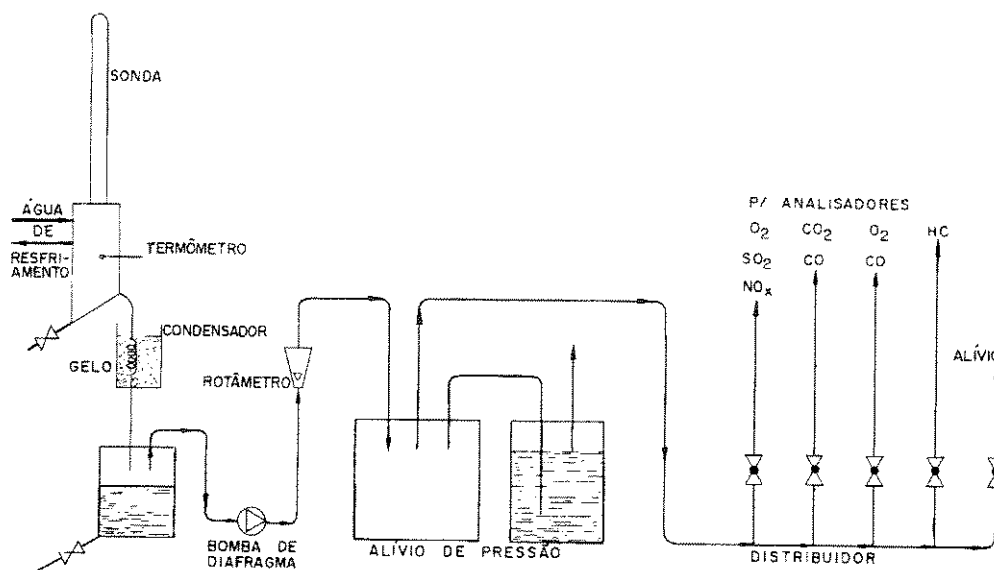


Figura 3. 12 Fluxograma da sistema de amostragem de gases

Tabela 3. 5 Características principais dos analisadores de gases.

Gás	Fabricante	Modêlo	Sensor	faixa de medição	Precisão	Amostragem
O ₂	Horiba	ENDA-1400	paramagnético	0 a 25%	+/-0,012% (em volume)	contínua 3 l/min
SO ₂	Horiba	ENDA-1400	infravermelho não dispersivo	0 a 1000 ppm	+/-5 ppm	contínua 3 l/min
CO	Horiba	MEXA-311 GE	infravermelho não dispersivo	0 a 10%	+/-0,04% ou 2% da leitura	descontínua
CO ₂	Horiba	MEXA 311 GE	infravermelho não dispersivo	0 a 20%	+/-0,3% ou 2% da leitura	descontínua
CO	Testo	Testo 342	célula eletroquímica	0 a 4000 ppm	+/-5% da leitura ou 20 ppm	descontínua
O ₂	Testo	Testo 342	célula eletroquímica	0 a 21%	+/- 0,2% (em volume)	descontínua
HC	Varian	2440-10	ionização de chama	-	ver Anexo B	-

3.9.4 Analisador de Hidrocarbonetos Totais

A análise do teor de hidrocarbonetos não queimados foi realizada utilizando um cromatógrafo Varian, modelo 2440-10, com detector de ionização de chama, adaptado para amostragem contínua dos gases de combustão. A coluna do cromatógrafo foi retirada, instalando-se no lugar desta um tubo de cobre, de diâmetro interno igual a 1,6 mm. A amostra de gás foi alimentada continuamente, substituindo o gás de arraste do cromatógrafo. O sinal de saída do eletrômetro do cromatógrafo foi medido com um multímetro Hewlett Packard, modelo 3478A.

A vazão de amostra para o detector foi 27 ml/min, sendo que a sucção de amostragem foi de cerca de 3 l/min, permitindo rápida renovação do gás de amostra nos tubos de condução, minimizando o tempo de resposta do detector. Um fluxograma do sistema está apresentado na Figura 3. 13. A descrição do método de calibração, utilização e a análise de incerteza estão contidas no Anexo B.

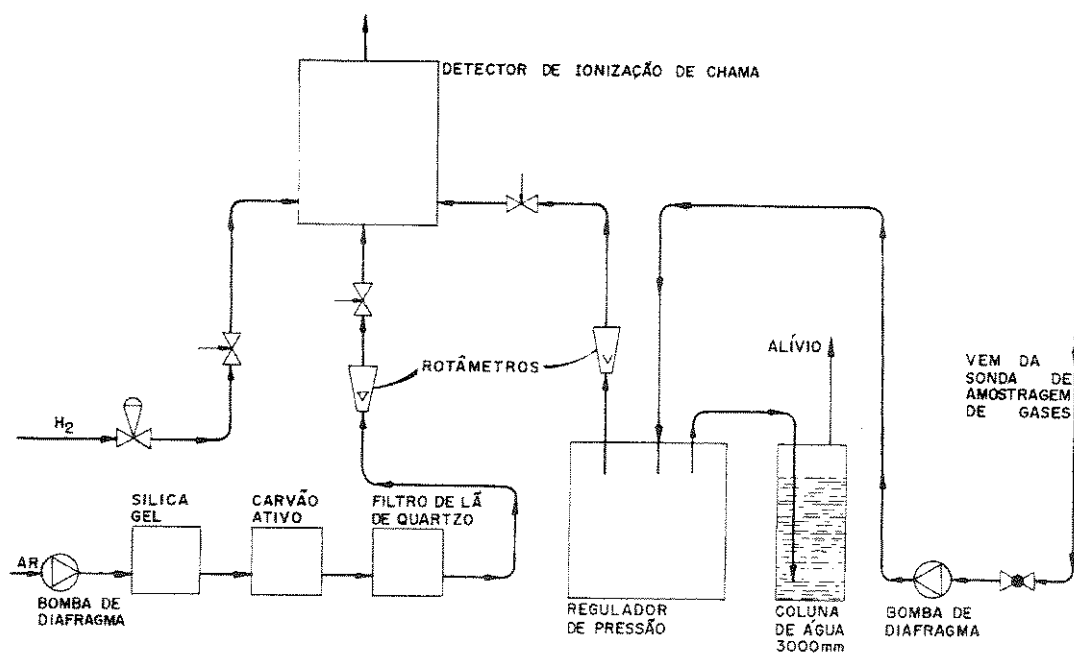


Figura 3. 13 Fluxograma do sistema de amostragem e análise de hidrocarbonetos totais

3.9.5 *Tubo de Pitot de 5 Furos*

Tubos de Pitot hemisféricos com 5 furos sensores de pressão têm sido usados para determinação de direção e velocidade de escoamento em câmaras de combustão (Beltagui, Kenbar e Maccallum, 1993). Existem outros métodos para a medição de velocidade e direção, tais como anemometria a laser por efeito Doppler ou a anemometria a fio quente, mas o tubo de Pitot de 5 furos tem a vantagem do menor custo de investimento. Como desvantagem, é um método intrusivo de medição e exige trabalho de calibração exaustivo.

Neste trabalho foram projetados e construídos três tubos de Pitot de 5 furos, refrigerados com água e com diâmetro externo de 10 mm. Esta dimensão representa 2,1% do diâmetro e 0,045% da secção transversal da câmara de combustão. Foram construídas 2 sondas de cabeça hemisférica, como proposto por Lee e Ash, 1956, e um sonda de cabeça cônica (Bizzo, Cardoso e Goldstein, 1996). A Figura 3. 14 apresenta um desenho esquemático dos dois modelos de tubo de Pitot de 5 furos e a Figura 3. 15 apresenta um fluxograma do sistema de medição. A Figura 3. 16 traz uma foto do tubo de Pitot montado no dispositivo de posicionamento para calibração em bancada de testes.

A calibração do tubo de Pitot é necessária porque os valores da magnitude e direção da velocidade do escoamento obtidos experimentalmente apresentam diferenças em relação aos resultados previstos pela teoria aplicável à sonda de cabeça perfeitamente hemisférica. Tais diferenças podem ser atribuídas ao tamanho dos furos, sua localização, bem como às demais imperfeições originadas na construção da sonda. No caso da sonda de cabeça cônica, devido à sua geometria apresentar mudanças abruptas de contorno, não são obtidas expressões analíticas que poderiam relacionar as diferenças de pressões nos furos com a direção e magnitude da velocidade do escoamento.

O método de calibração consiste em posicionar a sonda em um escoamento com direção e magnitude de velocidade previamente conhecidos, anotando-se as 4 diferenças de pressão dos furos (entre cada furo periférico e o furo central) para diversos pares de ângulos que representam a direção da velocidade em relação à cabeça da sonda, totalizando 864 medidas de

diferenças de pressão. Uma descrição do método de calibração e os resultados obtidos são apresentados no Anexo C.

As medidas de diferenças de pressão foram feitas com um medidor de pressão diferencial tipo capacitivo, fabricado pela Smar, modelo LD-301. Este medidor foi calibrado em fábrica na faixa de -50 a +50 mmCA e tem precisão declarada de $\pm 0,05$ mmCA (0,5 Pa).

Para medição da velocidade dentro da câmara de combustão foi utilizada somente uma sonda de cabeça hemisférica. A sonda de cabeça cônica apresentou baixa sensibilidade em operação a quente, e uma sonda hemisférica, já calibrada, foi inutilizada durante os testes iniciais da câmara, devido a possível falha no sistema de refrigeração.

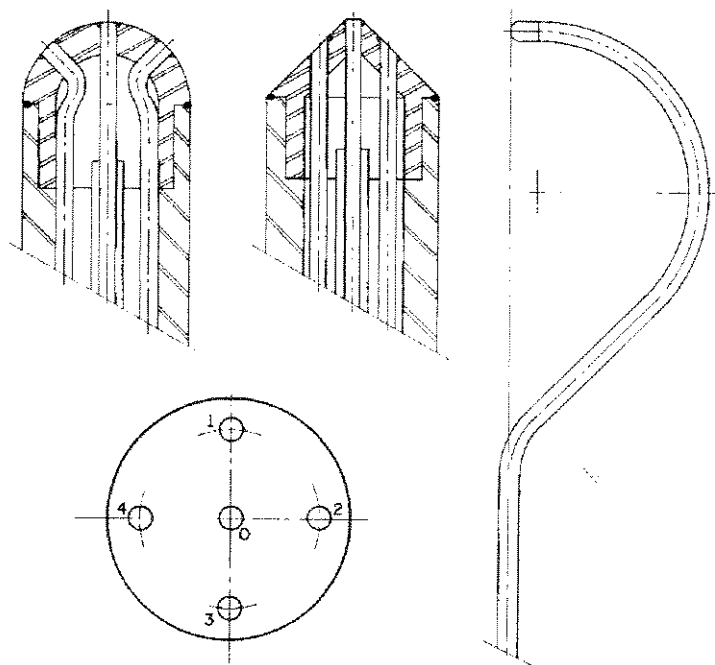
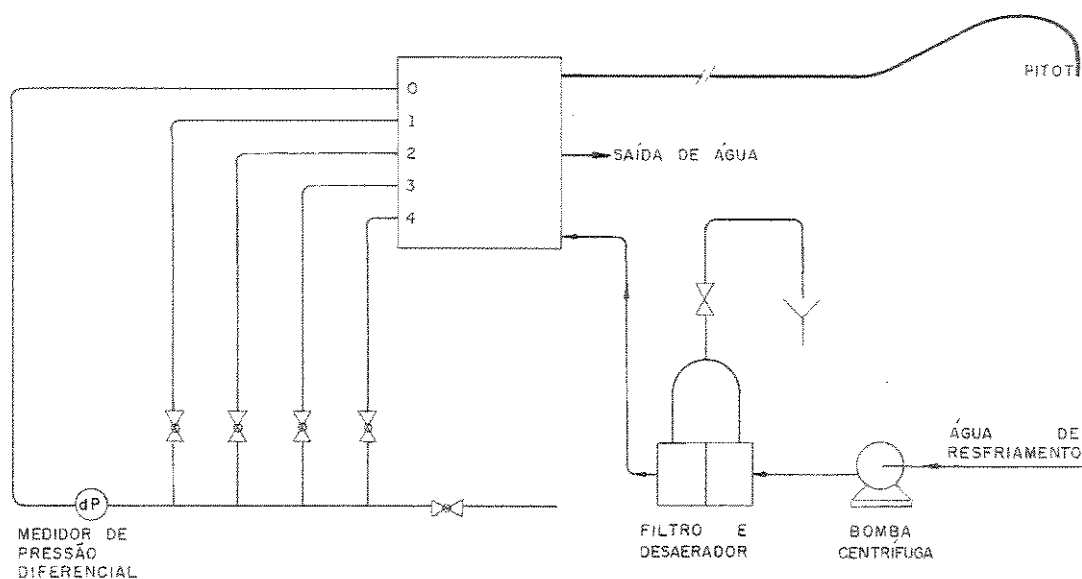


Figura 3. 14 Esquema dos dois modelos de tubo de Pitot de 5 furos.



SONDA DE PITOT DE 5 (CINCO) FUROS - FLUXOGRAMA

Figura 3. 15 Fluxograma do sistema de medição de velocidade por tubo de Pitot de 5 furos.

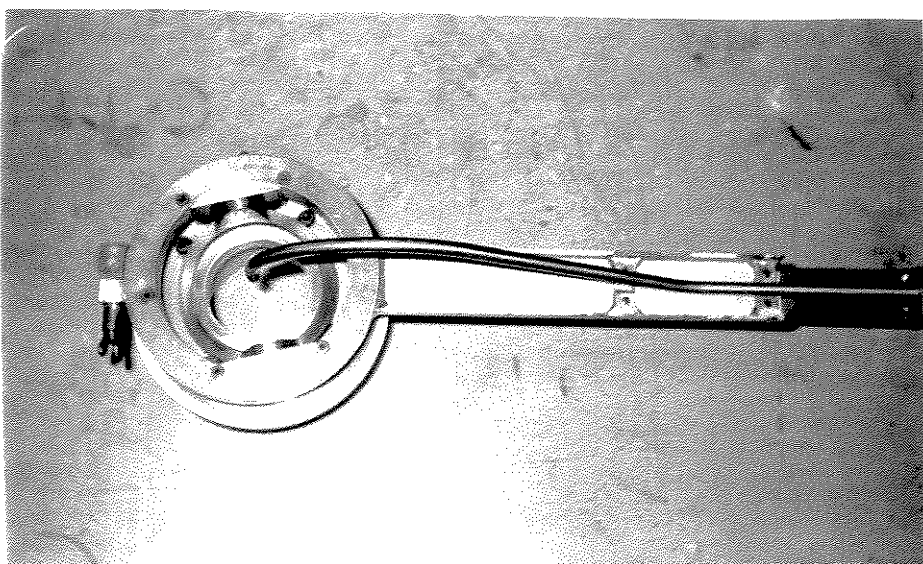


Figura 3. 16 Tubo de Pitot de 5 furos montado sobre dispositivo de posicionamento para calibração em bancada.

Capítulo 4

DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Comissionamento da bancada experimental

Diversos ensaios iniciais foram executados a fim de testar o funcionamento do sistema e da instrumentação. Foram determinadas empiricamente as condições necessárias para a ignição do queimador, com GLP, e delimitada a cada potência desejada, a faixa do número de rotação onde a chama permanecia estável. Para esta potência e temperaturas de saída variando de 830 a 850 °C, foram estabelecidas condições de operação -temperaturas e pressões- que serviriam posteriormente para a realização dos testes efetivos na condição de regime permanente. Foram necessárias cerca de 3 horas para o sistema atingir estabilidade de temperatura.

Diversos problemas e dificuldades operacionais foram solucionados até se conseguir iniciar a efetiva tomada dos dados experimentais. Pode-se citar:

- arraste excessivo de água do lavador resfriador para a chaminé de descarga;
- deposição de fuligem na célula ultravioleta de monitoramento da chama, causando sucessivos apagamentos e reignições;
- ataque químico causado por tolueno em mangueiras e vedações;
- defeito no analisador de O_2 de sensor paramagnético;
- falta de estanqueidade da linha de amostragem do gás;
- inutilização de uma sonda de Pitot de cabeça hemisférica por possível falha de refrigeração, com perda da sonda e do correspondente trabalho de calibração;
- baixa sensibilidade à variação da velocidade de escoamento na medição de diferenças de pressão nas sondas de Pitot, em operação na presença de chama;
- condensação de água na superfície fria da sonda de Pitot, com eventual recobrimento dos furos sensores de pressão, impedindo a utilização da sonda em algumas posições.

Para evitar o arraste de água do lavador foi instalado um separador de gotículas tipo recheio, retirado posteriormente devido a excessiva perda de carga, sendo a solução final adotada a instalação de uma chicana interna no lavador.

A obstrução ótica do sensor ultravioleta para monitoramento da chama, devido à deposição de fuligem foi solucionada instalando-se uma chave elétrica manual, onde desligava-se a atuação do sensor quando a câmara de combustão atingia 800 °C na saída. Estando a temperatura acima do ponto de autoignição, a câmara já aquecida tornava a operação segura, com pouca possibilidade de apagamentos. A deposição de fuligem ocorreu com mais intensidade em algumas das condições de operação adotadas.

Diversos plásticos e elastômeros foram testados em contacto com tolueno. Apesar de ser conhecida a capacidade do tetrafluoretileno (teflon) de resistir quimicamente a solventes fortes, como o tolueno, ele não apresentou elasticidade suficiente para permitir sua utilização em vedações. Mangueiras e borrachas de silicone resistiram o suficiente para a realização dos ensaios, apesar de apresentarem algum inchaço em contacto direto com o tolueno.

O analisador de O_2 de sensor paramagnético indicou sistematicamente teores de oxigênio maiores do que os calculados estequiometricamente. Foi substituído por um analisador de célula eletroquímica, não contínuo, sem comprometer a operação e as medições, uma vez que atingida a estabilidade, as vazões de combustível e ar mantinham-se constantes.

A estanqueidade da linha de amostragem foi testada diversas vezes e solucionados os vazamentos. Este fato não solucionou a medição errática do teor de O_2 , comprovando o diagnóstico de defeito no analisador paramagnético.

A eventual falha de refrigeração ocorrida nos testes iniciais da sonda de Pitot não foi plenamente identificada. Pode ter sido causada por uma bolha de ar no sistema de refrigeração retida na cabeça do Pitot durante o teste inicial; pode ter ocorrido também um defeito de fabricação ou de montagem do tubo interno de refrigeração, o que será esclarecido na ocasião da análise da peça danificada.

A baixa sensibilidade a escoamentos mais lentos ocorreu principalmente com o tubo de Pitot de cabeça cônica, o qual, comparativamente ao tubo de cabeça hemisférica, forneceu uma menor diferença de pressões para uma mesma condição de escoamento. Mesmo assim, o tubo de cabeça hemisférica não se mostrou sensível em baixos número de rotação, com o número de Reynolds em chama da ordem de 100 ou menos. A sensibilidade era aumentada quando a sonda de Pitot era posicionada na direção do escoamento; porém, quando a sonda estava no sentido vertical para baixo, a água condensada na superfície fria recobria os furos sensores de pressão. Em certas condições, nem a limpeza periódica, com ar comprimido, do tubo sensor possibilitou a medição. As medidas de velocidade, nas condições escolhidas para o experimento, somente se mostraram possíveis para altos número de rotação, quando velocidades maiores permitiam melhor sensibilidade da sonda.

4.2 Procedimento experimental

Medidas experimentais na câmara de combustão foram efetuadas nas seguintes condições mantidas constantes:

- temperatura de saída dos gases: 840° C
- tempo de residência médio: 1,1 segundos
- excesso de ar: 42% e 19%.
- potência específica da câmara: 360 kW/m³ e

tendo-se variado o número de rotação do escoamento e a fração de tolueno no combustível. As condições acima reproduzem valores típicos encontrados em câmaras secundárias de processos convencionais de incineração.

No primeiro grupo de ensaios foi medido a emissão de CO e HC totais nos gases de saída, em função de 8 números de rotação e para 3 concentrações diferentes de tolueno no combustível - 0%, 30% e 39% - com 42% de excesso de ar. Um ensaio com menor excesso de ar - 19% - foi efetuado para o combustível com 30% de tolueno.

No terceiro grupo de ensaios, com 42% de excesso de ar e 30% de tolueno no combustível, foram efetuadas medidas locais no interior da câmara de combustão:

- 3 ensaios com distribuição de temperaturas;
- 2 ensaios com distribuição de concentração de gases;
- 2 ensaios com distribuição de velocidades.

As medições foram efetuadas após se atingir a estabilidade dos parâmetros de operação. Esta estabilidade era conseguida após 2 a 3 horas de operação e confirmada pela manutenção dos principais parâmetros de operação por um período mínimo de 30 minutos.

A operação da câmara era iniciada apenas com GLP, em baixa carga e maior excesso de ar. Após a câmara atingir temperatura segura para haver estabilidade da chama (cerca de 750 °C ou mais), aumentava-se a vazão de GLP. Quando a temperatura de saída atingia 850 a 900 °C, era introduzido na câmara a lança nebulizadora de água e regulada a relação ar/combustível desejada através do controle da vazão de ar. Vapor de tolueno era adicionado vagarosamente, já que o vaporizador necessitava de um certo tempo para o aquecimento e estabelecimento do regime permanente. À medida que a descarga de vapor de tolueno era aumentada, diminuía-se a vazão de GLP, mantendo-se o excesso de ar desejado. A vazão de água pulverizada era controlada a fim de manter a temperatura de saída da câmara na faixa de 820 a 840 °C. O número de rotação era ajustado em operação, a partir de um dispositivo de posicionamento do bloco móvel do queimador com indicação de posição no lado externo. Durante os testes, eram anotados periodicamente as condições gerais de operação da câmara.

As medidas de temperatura do gás no interior da câmara foram registradas em um registrador gráfico HP mod.7090A. A medida obtida com o pirômetro apresentou oscilação devido à turbulência existente no interior da câmara. O registro gráfico da temperatura permitiu verificar a estabilidade da medição e obter o valor médio de temperatura no ponto.

A concentração dos gases, tanto na saída da câmara como no seu interior foi tomada como a média de 6 valores obtidos a cada 10 segundos, após a chegada da nova amostra aos analisadores, cujo tempo de resposta era da ordem de 30 a 60 segundos.

As velocidades foram obtidas através da medição das diferenças de pressão entre os orifícios da sonda de Pitot, e também apresentaram oscilação devido a turbulência no interior da câmara. O valor da diferença de pressão era tomada após constatação visual da estabilidade da oscilação da pressão indicada em torno de um valor médio.

A distribuição do tempo de residência foi obtida a partir da produção de um sinal de concentração de SO₂, tipo degrau. Com a abertura da primeira válvula do circuito estabelecia-se uma concentração linha base na saída da câmara, através da regulação de vazão do traçador. Após a estabilização do sistema de amostragem e do analisador, abria-se rapidamente a segunda válvula, aumentando a concentração em degrau. A concentração na

saída da câmara era registrado em função do tempo num registrador gráfico HP 7090A. Para cada número de rotação este procedimento foi repetido, mantido constante o tempo médio de residência, a potência específica e o excesso de ar. A fim de estabelecer a influência do sistema de amostragem e do analisador de SO_2 , três testes foram efetuados, com a tomada de sua resposta à injeção do SO_2 , diretamente na entrada do sistema de amostragem, sem passar pela câmara de combustão, sendo os dados registrados em função do tempo.

Os dados completos relativos aos testes realizados estão apresentados em tabelas no anexo D.

4.3 Processamento dos Dados Experimentais

As medidas experimentais foram realizadas com o sistema operando em regime permanente, sendo as variáveis anotadas no início e no fim de cada conjunto de medições. Para efeito de cálculo, utilizou-se o valor médio das medidas obtidas em cada teste. Verificou-se que as variações foram pequenas ou inexistentes, dentro da precisão dos aparelhos utilizados, comprovando a condição de regime permanente.

A partir das descargas e temperaturas das correntes obtidas, são calculados os seguintes parâmetros de operação:

4.3.1 Excesso de Ar

O excesso de ar α , é definido como:

$$\alpha = \frac{A / C_{real}}{A / C_{esteq}} - 1 \quad (4.1)$$

onde:

A/C_{real} : relação ar/combustível utilizada (em massa);

A/C_{esteq} : relação ar/combustível estequiométrica (em massa).

4.3.2 Tempo de residência médio dos gases:

O tempo de residência médio dos gases, $\bar{t}$, é dado por:

$$\bar{t} = \frac{\dot{v}}{V} \quad (4.2)$$

onde:

$\dot{v}$: vazão dos produtos de combustão, calculada a temperatura de saída da câmara (m^3/s)

V : volume da câmara de combustão (m^3)

4.3.3 Potência específica:

A potência específica da câmara $\dot{w}_{PCS}$, calculada com base no poder calorífico superior dos combustíveis, é dada por:

$$\dot{w}_{PCS} = \frac{\dot{m}_{GLP} 45891,2 + \dot{m}_{tol} 42839,8}{V} \quad (4.3)$$

onde:

$\dot{m}_{GLP}$: descarga de GLP (kg/s)

$\dot{m}_{tol}$: descarga de tolueno (kg/s)

45891,2 kJ/kg é o poder calorífico superior do GLP e

42839,8 kJ/kg é o poder calorífico superior do tolueno gasoso.

A potência específica também pode ser calculada levando em conta a água introduzida na câmara:

$$\dot{w}_{PCI} = \frac{\dot{m}_{GLP} 45891,2 + \dot{m}_{tol} 42839,8 - \dot{m}_{H_2O} 2440}{V} \quad (4.4)$$

onde

$\dot{m}_{H_2O}$: é a descarga de água no pulverizador (kg/s) e

2440 kJ/kg é a entalpia de vaporização da água a pressão normal e 25° C.

4.3.4 Composição do combustível

Calculada como a relação ponderada das descargas de GLP e tolueno:

$$\%tolueno = \frac{\dot{m}_{tol}}{\dot{m}_{tol} + \dot{m}_{GLP}} \times 100 \quad (4.5)$$

4.3.5 Número de Rotação

O número de rotação S' para um gerador de rotação de blocos móveis, como utilizado neste trabalho, é calculado pelas relações a seguir, a partir das dimensões do queimador, sendo que estas equações apresentaram boa correlação com resultados experimentais (Beér e Chigier, 1972):

$$S' = \sigma \frac{R}{2B} \left[1 - \left(\frac{R_h}{R} \right)^2 \right] \quad (4.6)$$

onde:

R: raio do duto de saída do queimador;

R_h: raio da lança de combustível, interno ao duto de saída do queimador;

B: largura dos canais formados pelos blocos móvel e fixo do gerador de rotação do queimador;

σ: coeficiente da quantidade de movimento tangencial, calculado pela equação:

$$\sigma = \frac{2\pi}{z\xi_m} \operatorname{sen} \beta \frac{\cos \beta \left[1 + \tan \beta \tan \left(\frac{\xi}{2} \right) \right] \left(\frac{\xi}{\xi_m} \right)}{\left\{ 1 - \left[1 - \cos \beta \left(1 + \tan \beta \tan \left(\frac{\xi}{2} \right) \right) \right] \frac{\xi}{\xi_m} \right\}} \quad (4.7)$$

onde:

z quantidade de blocos móveis;

β: ângulo de entrada do bloco tangencial do gerador de rotação;

ξ: ângulo da posição de ajuste dos blocos móveis;

ξ_m: ângulo máximo da posição de ajuste dos blocos móveis.

No cálculo do número de rotação utilizado neste trabalho não está incluído a quantidade de movimento axial devido a água nebulizada no interior da câmara.

4.3.6 Distribuição do Tempo de Residência.

A Figura 4. 1 mostra um exemplo do sinal de resposta a um degrau de concentração de SO_2 na saída da câmara de combustão enquanto a Figura 4. 2 traz a curva derivada do sinal em relação ao tempo. As derivadas foram calculadas permitindo o cálculo do tempo de residência médio pela equação 2.19 do cap. 2. A curva de distribuição do tempo de residência do conjunto câmara de combustão-sistema de amostragem é obtida, por sua vez, pela normalização da concentração e do tempo.

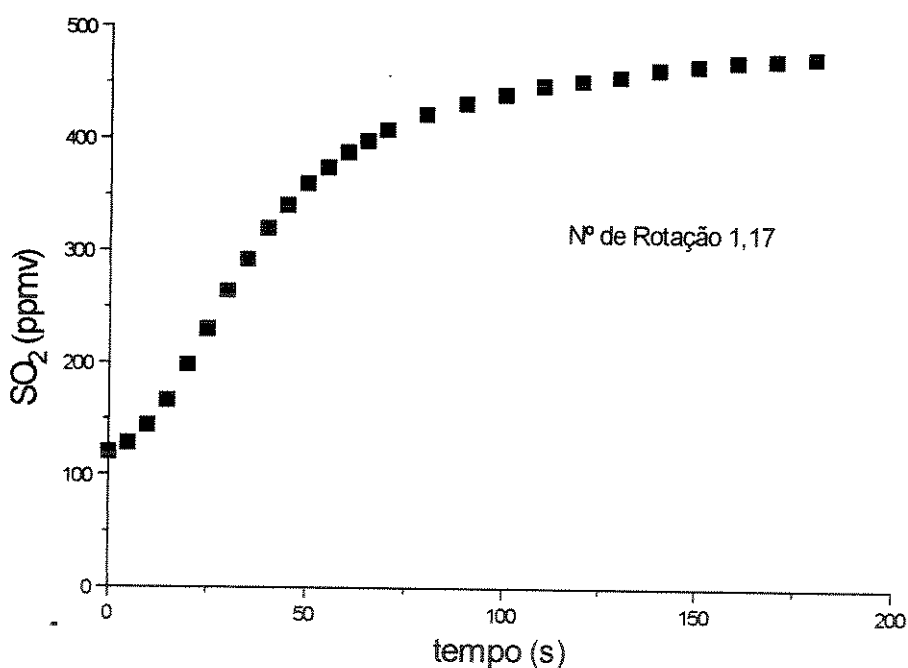


Figura 4. 1 Exemplo do sinal de resposta na saída da câmara.

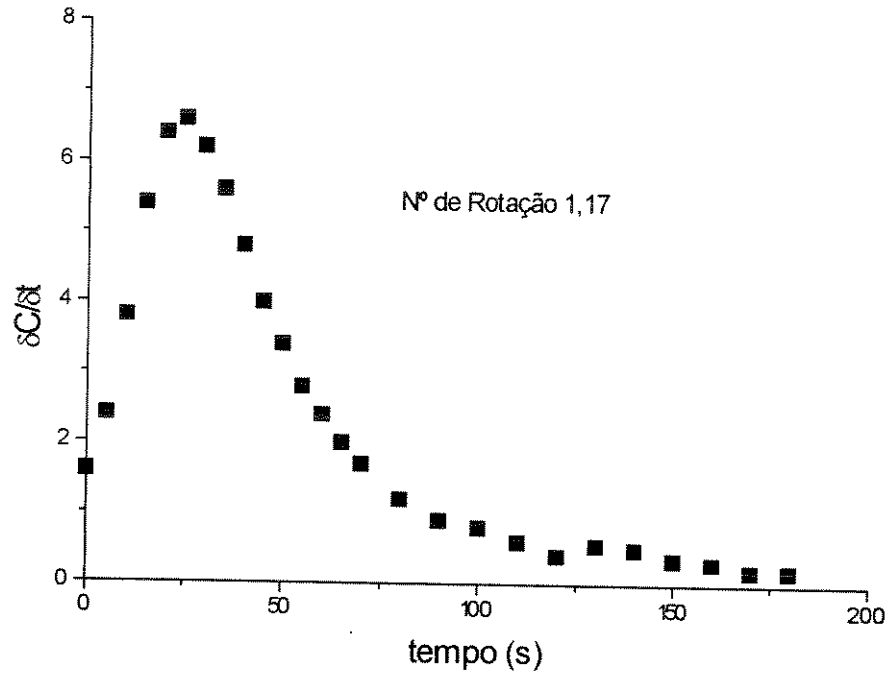


Figura 4. 2 Derivada do sinal de resposta em relação ao tempo.

A concentração normalizada $\hat{C}$ em cada ponto é obtida através da equação:

$$\hat{C} = \frac{C_i - C_0}{C_f - C_0} \quad (4.8)$$

onde:

C_0 : concentração antes do degrau;

C_f : concentração no degrau;

C_i : concentração no ponto calculado.

O tempo normalizado $\hat{t}$ é calculado por:

$$\hat{t} = \frac{t_i}{\bar{t}} \quad (4.9)$$

t_i : tempo no ponto calculado

$\bar{t}$: tempo de residência médio.

A derivada da concentração normalizada em relação ao tempo é calculada ponto a ponto fornecendo a curva F , conforme o exemplo da Figura 4.3.

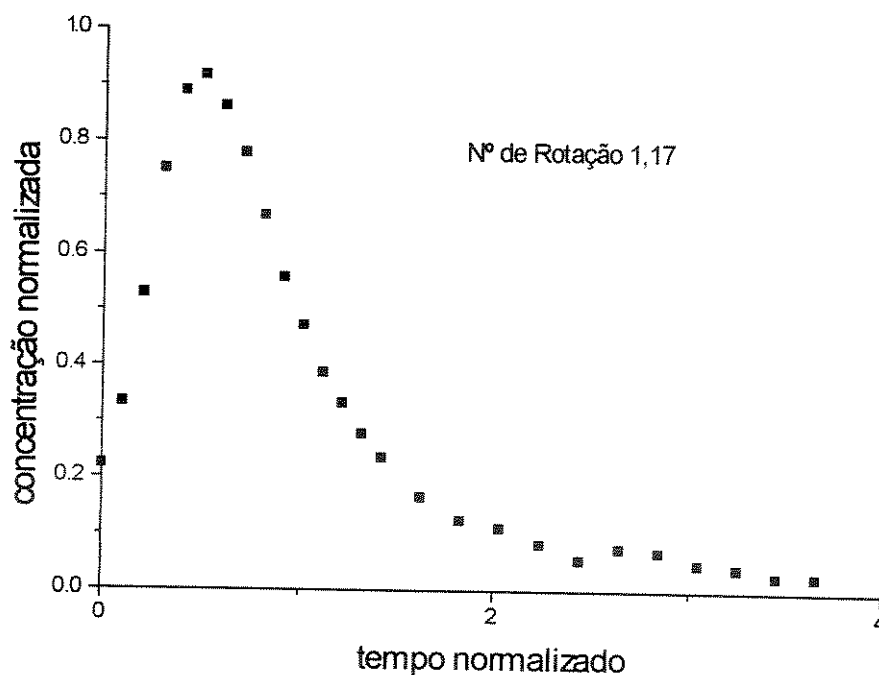


Figura 4.3 Distribuição do tempo de residência normalizada em concentração e tempo.

O verdadeiro sinal de resposta na saída da câmara de combustão é modificado pela passagem no sistema de amostra e pelo tempo de resposta do analisador de SO_2 . As curvas da derivada da resposta do sistema de amostragem-analisador, em relação ao tempo são apresentadas na Figura 4. 4. Em cada teste, para cada número de rotação não foi possível

manter perfeitamente as concentrações antes e depois do sinal em degrau. Para cada número de rotação testado, foi feita uma interpolação linear para obter a curva de resposta do sistema de amostragem isolado, baseado nas curvas nos testes realizados conforme a Figura 4.4, nas concentrações de início e fim de degrau correspondente a cada teste da câmara. Foram calculadas a média e a variância da curva E (distribuição do tempo de residência) para o conjunto câmara-sistema de amostragem e para o sistema de amostragem isolado. Para um sistema de resposta linear, Levenspiel (1972), mostrou que as médias e as variâncias das curvas de distribuição do tempo de residência de 2 ou mais recipientes em série podem ser somadas, ou seja, a soma das variâncias de cada recipiente é igual a variância do conjunto de recipientes. Assim, a variância da distribuição do tempo de residência da câmara, para cada número de rotação, foi calculada por:

$$\sigma_{camara}^2 = \sigma_{conjunto}^2 - \sigma_{sist.amostragem}^2 \quad (4.10)$$

As curvas de distribuição da câmara não foram obtidas nesta etapa de trabalho, devendo ser tópico para desenvolvimento futuro. Para obtenção destas curvas é necessário a deconvolução do sinal de resposta do conjunto câmara-sistema de amostragem, em relação ao sinal de resposta do sistema de amostragem isolado. A deconvolução não é uma operação matemática trivial. Alguns métodos de deconvolução discreta foram tentados de maneira preliminar, mas os resultados não foram significativos, gerando curvas que eram fisicamente irreais, já que oscilavam e exibiam valores negativos em alguns momentos, provavelmente devido à não obtenção de um modelo que representasse satisfatoriamente o sistema de amostragem e análise de gás.

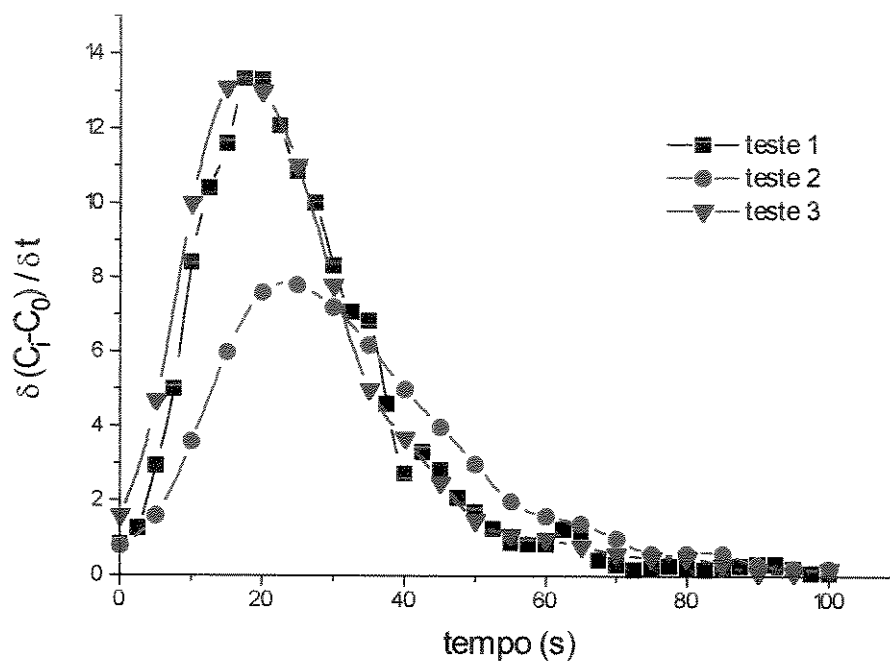


Figura 4. 4 Curvas da derivada da resposta em relação ao tempo do sistema de amostragem em 3 testes com concentrações diferentes.

Capítulo 5

Apresentação e Análise dos Resultados

A qualidade da combustão depende de três parâmetros principais: temperatura, tempo de residência e o contacto efetivo entre o combustível e o oxidante. Neste trabalho, se fixou a potência térmica da câmara, que é aproximadamente adiabática, foi mantido o tempo de residência total da mistura gasosa na câmara e se variou o número de rotação do escoamento, implicando basicamente na variação da fluidodinâmica e na distribuição do tempo de residência. O efeito destas variações é analisado em termos das emissões gasosas de CO e HC não queimados na saída da câmara. A relação entre as emissões de HC totais e CO, como parâmetro indicativo da qualidade da combustão e incineração, também foi analisada. Para algumas das condições testadas, apresenta-se o campo de velocidades, as distribuições de temperaturas e de concentração de gases no interior da câmara, bem como se discute a distribuição do tempo de residência a partir de sua variância. Foram testados três composições de combustível e dois valores de excesso de ar.

5.1 Influência da Composição do Resíduo e do Excesso de Ar nas Emissões gasosas

As Figura 5. 1, 5.2 e 5.3 apresentam as emissões de CO e HC não queimados em função do número de rotação, para a queima de combustíveis com 0%, 30% e 39% de tolueno na composição em massa, respectivamente, para os maiores excesso de ar testados, mantidas constantes a potência térmica da câmara, de cerca de 360 kW/m^3 (em relação ao PCI), bem como a temperatura de gases na saída da câmara em torno de 840° C , e o tempo de residência em torno de 1,1 segundos. Observa-se que as emissões globais na saída da câmara diminuem com o aumento do número de rotação dos gases, que praticamente deixa de ter influência a partir de um certo valor. Esta tendência não fica clara apenas no primeiro caso, onde não foi utilizado tolueno como combustível e o excesso de ar ficou 11% maior devido à limitação no suprimento de GLP.

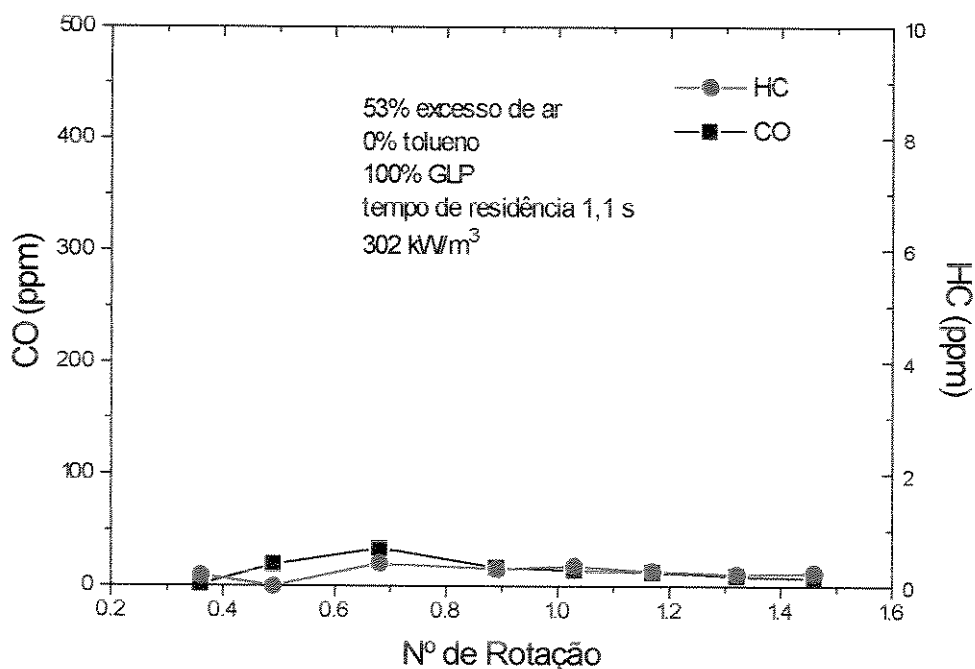


Figura 5. 1 Emissão de CO e HC totais, resíduo com 0% de tolueno e 100% GLP.

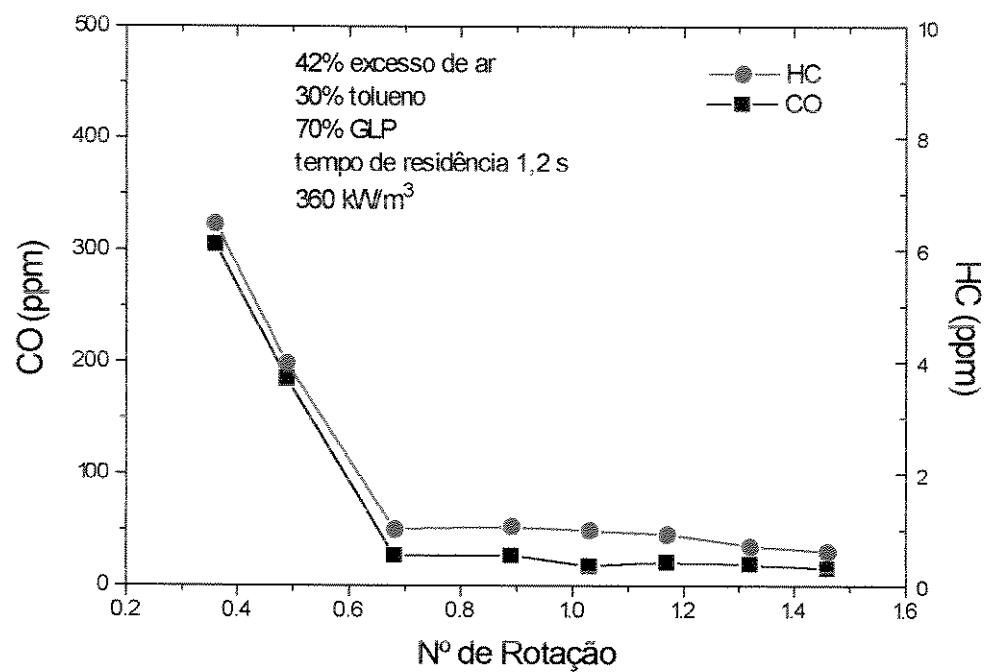


Figura 5. 2 Emissão de CO e HC totais, resíduo com 30% de tolueno e 70% de GLP.

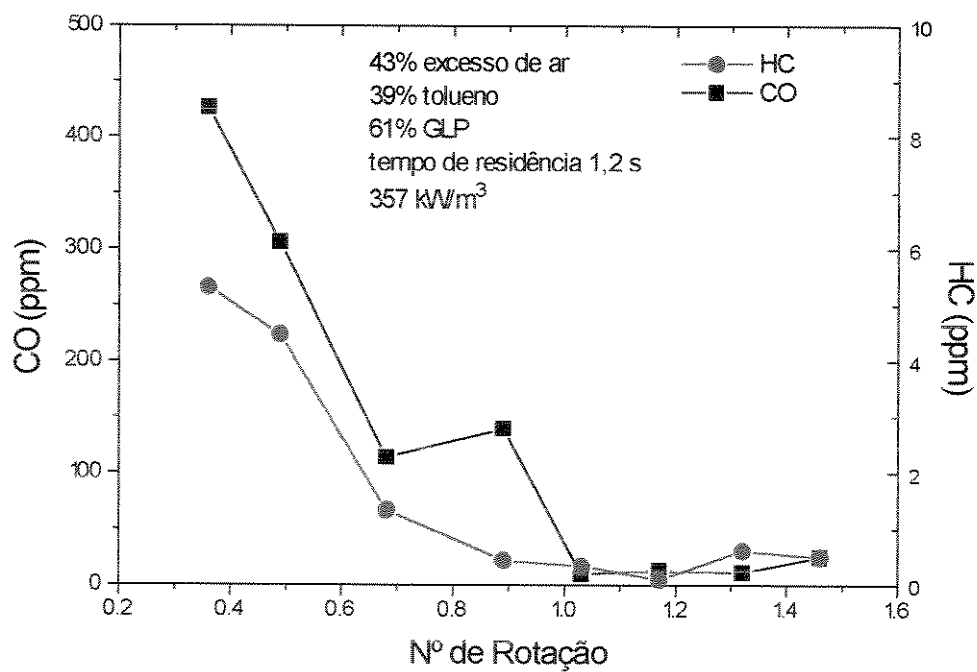


Figura 5. 3 Emissão de CO e HC totais, resíduo com 39% tolueno e 61% GLP.

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam as emissões de CO e HC totais, respectivamente, em função da composição do combustível, para 42% de excesso de ar. Para baixos números de rotação, a emissão de CO é sensivelmente maior para o combustível com maior concentração de tolueno, um composto orgânico aromático de combustão mais difícil que o GLP, sendo que para a emissão de HC totais as diferenças não são significativas para as composições de combustível testadas, mesmo para baixos números de rotação, exceto quando não havia nenhum tolueno na composição, caso em que as emissões foram menores. A emissão de HC totais e CO aparenta ser ligeiramente maior para 30% do que para 39% de tolueno, para altos valores de número de rotação, porém, os valores obtidos situam-se na mesma ordem de grandeza da incerteza das medidas, nesta faixa de concentração.

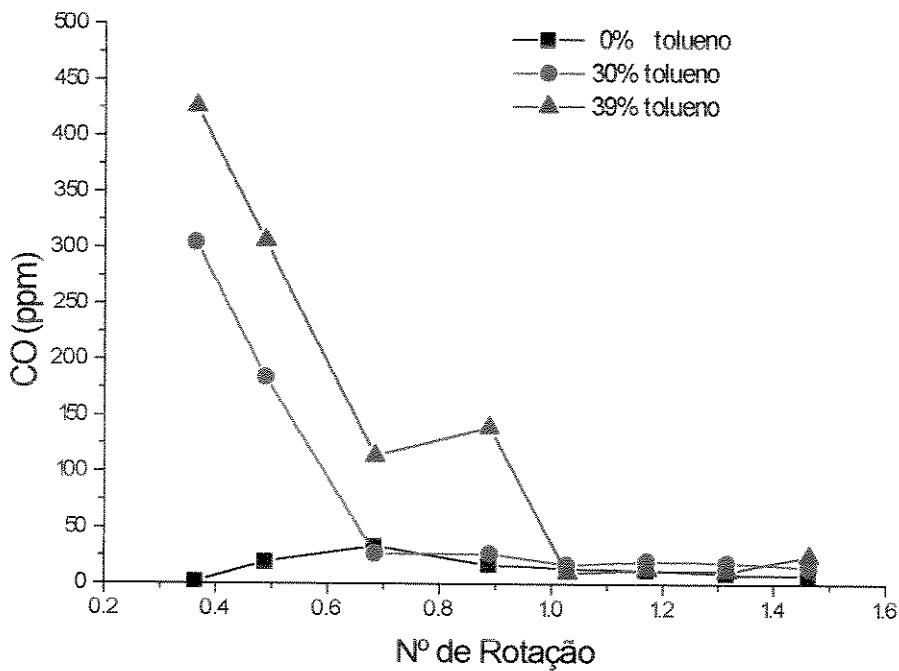


Figura 5.4 Emissão de CO em função do número de rotação e composição do combustível.

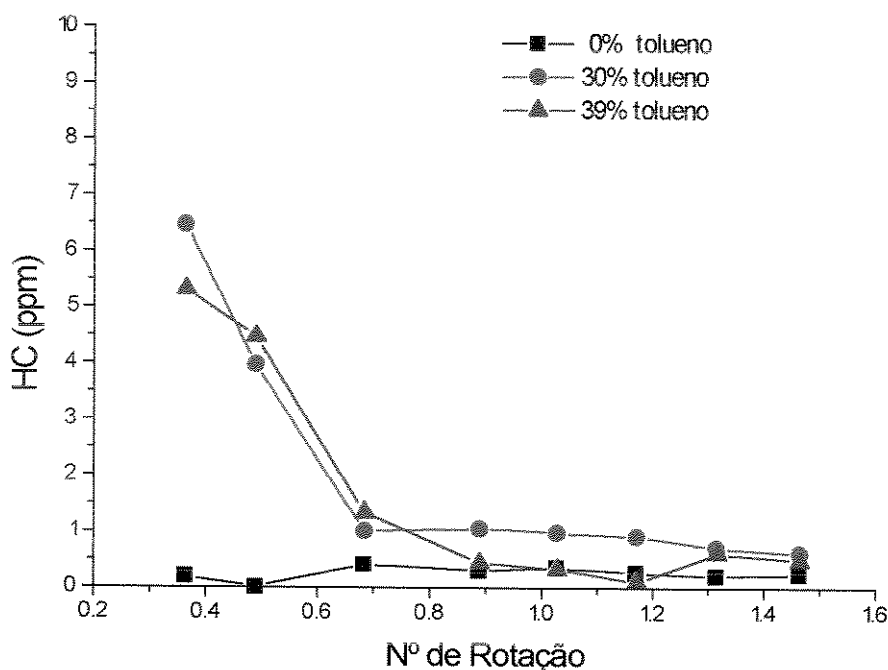


Figura 5. 5 Emissão de HC totais em função do número de rotação e composição do combustível.

A Figura 5.6 traz os resultados das emissões de CO e HC totais para a condição de testes com 19% de excesso de ar. Tanto as emissões de monóxido de carbono quanto as de hidrocarbonetos ficaram substancialmente maiores que na condição anterior. Além das emissões gasosas, foi observada significativa emissão de fuligem, sendo que as quantidades coletadas no filtro da linha de amostragem de gases indicaram concentrações da ordem de 100 mg/m^3 . As concentrações reais devido a emissão de fuligem são maiores que as estimadas, já que a coleta, realizada apenas para fins indicativos, não foi feita no modo isocinético, e parte da fuligem ficou retida tanto no tubo central da sonda de gases, provocando alguns entupimentos, como também na garrafa de coleta de água condensada localizada após o condensador.

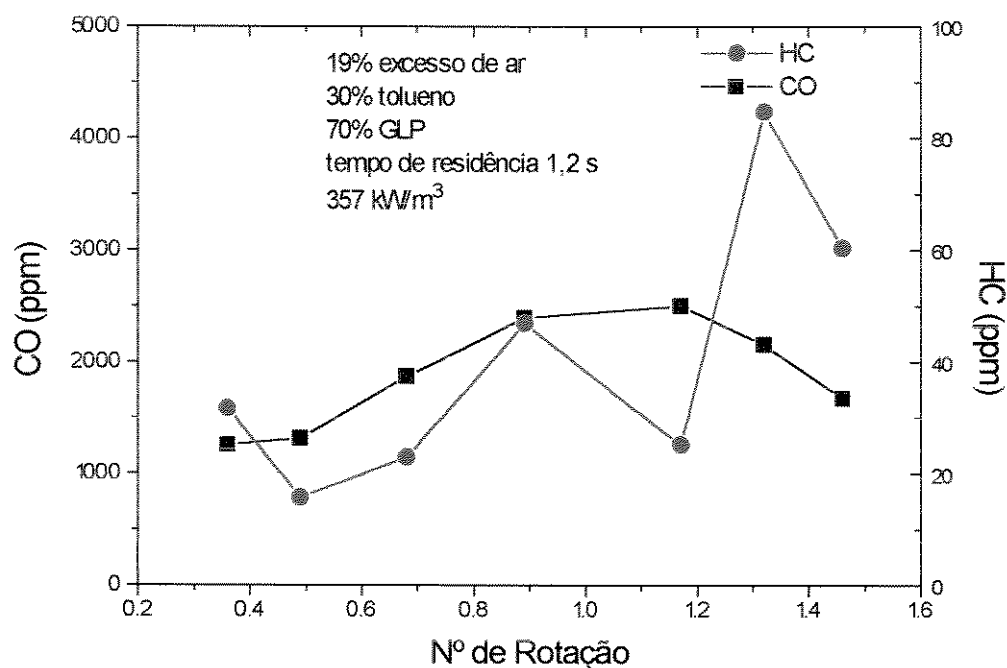


Figura 5.6 Emissão de CO e HC totais, resíduo com 30% de tolueno e 70% de GLP.

A Figura 5. 7 compara as emissões de CO para os testes realizados nas condições de 19% e 42% de excesso de ar, enquanto a Figura 5.8 compara os valores para HC totais. Observa-se que para o caso de menor excesso de ar a tendência das emissões é aumentar com o aumento do número de rotação da câmara, um comportamento inverso do observado com o maior excesso de ar. O contacto entre combustível e oxidante aparenta ser, portanto, mais importante na condição de maior excesso de ar, onde, a maior região de mistura, causada pelo aumento do número de rotação diminuiu a emissão de CO e HC.

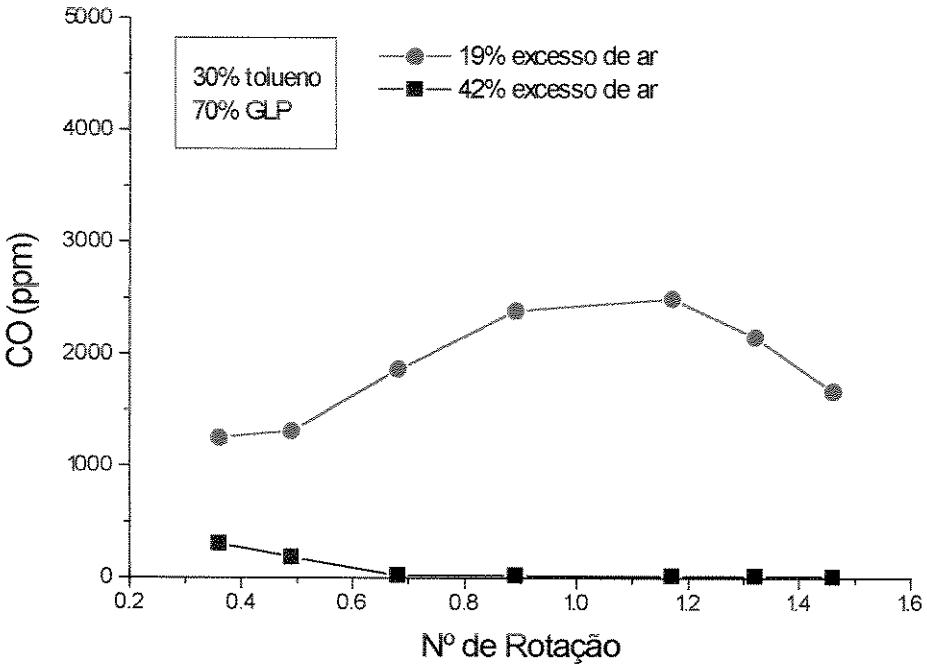


Figura 5. 7 Emissão de CO em função do número de rotação e excesso de ar.

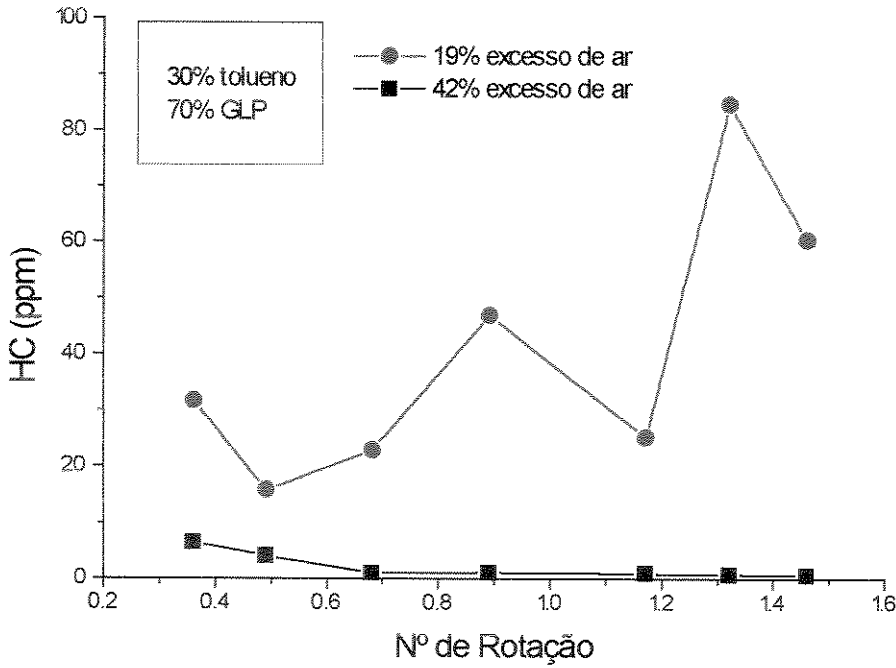


Figura 5. 8 Emissão de HC totais em função do número de rotação e excesso de ar.

5.3 Relação entre as emissões de CO e HC não queimado

A Figura 5. 9 apresenta a relação entre emissões HC/CO na saída da câmara, em função do número de rotação para excesso de ar de 19% e 42% , para o combustível com 30% de tolueno, enquanto a Figura 5. 10 apresenta a mesma relação para os combustíveis com 30% e 39% de tolueno mantido excesso de ar de 42%. Observa-se que a relação HC/CO mantém uma tendência constante em relação ao número de rotação, independente, neste caso, das condições de excesso de ar e composição do combustível.

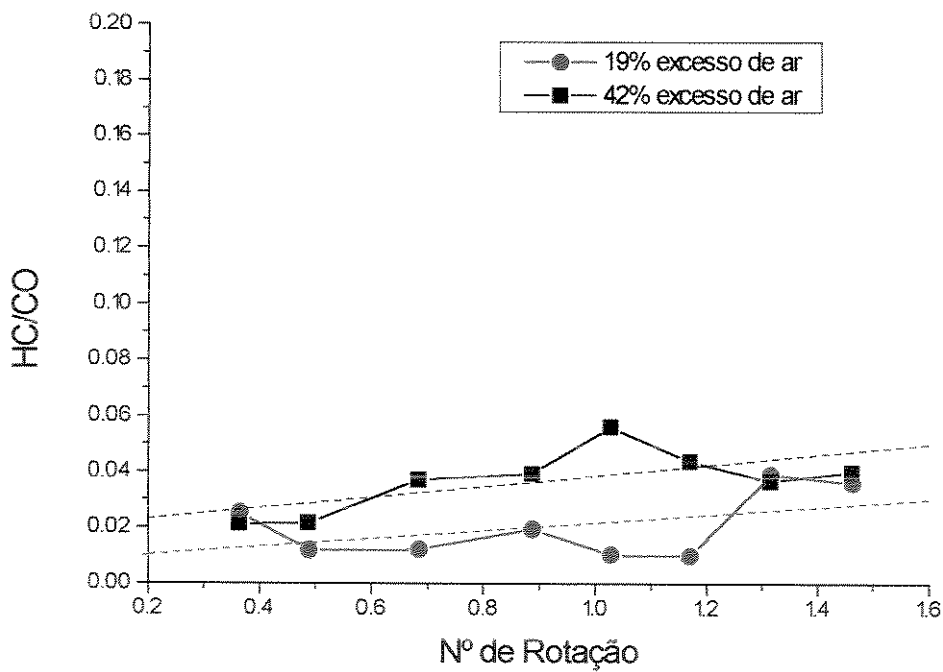


Figura 5. 9 Relação de emissão HC/CO em função do número de rotação e excesso de ar.

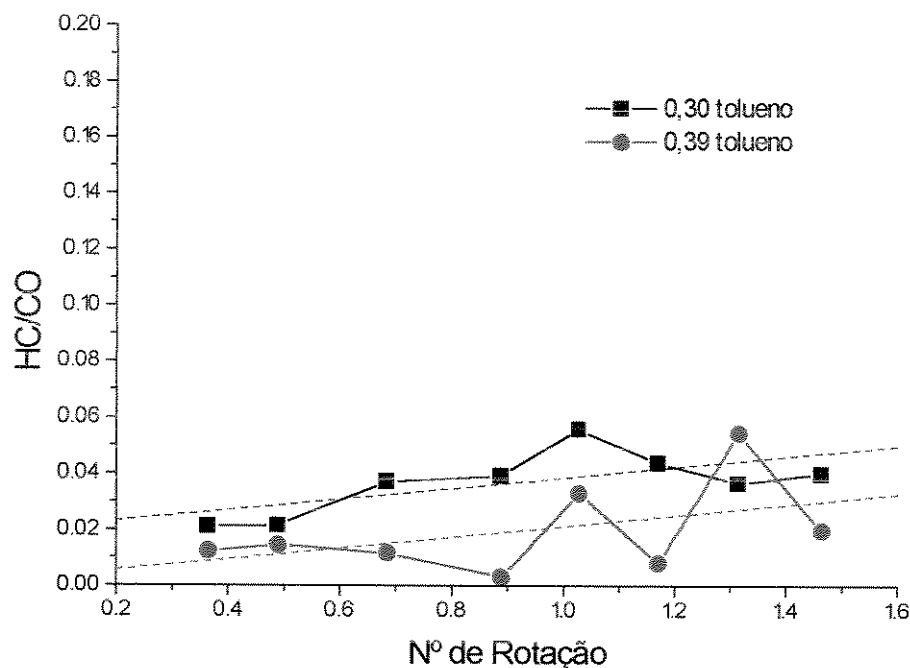


Figura 5. 10 Relação de emissão HC/CO em função do número de rotação e composição do combustível.

A emissão de CO mostra-se um bom indicativo das condições de incineração quando aplicada ao caso de hidrocarbonetos. La Fond et alii (1985) constataram que as emissões de CO e HC aumentam quando a eficiência de destruição do resíduo diminui. No caso, foi utilizada uma mistura de compostos que incluía orgânicos clorados e testadas várias condições de incineração: com excesso e falta de ar, vazões diferentes de combustível e deficiência de atomização, sendo que as condições fluidodinâmicas da câmara mantidas constantes, com número de rotação fixado em 1. Em algumas situações, a emissão de CO aumentou antes que a eficiência de destruição aumentasse significativamente. No estudo de La Fond, a comparação foi feita das emissões de CO e HC em relação a fração remanescente dos resíduos, identificados por amostragem acumulativa e análise química na saída do reator. A fração resmanescente inclui apenas os compostos identificados como PCOPs - Principais Compostos Orgânicos Perigosos - e não inclui produtos de combustão incompleta que não sejam PCOPs. Na observação dos gráficos de La Fond constata-se que o aumento da emissão de HCs

acompanha o aumento da emissão de CO, embora esta análise não tenha sido feita pelos pesquisadores. As diferenças principais entre o estudo de La Fond et alii e este trabalho são:

- o estudo de La Fond et alii manteve constante o número de rotação enquanto neste trabalho o número de rotação foi variado;
- as condições de incineração estudadas por La Fond et alii foram variadas no excesso de ar, na potência do reator e nas condições de atomização de líquido, enquanto que neste trabalho foi mantido constante a potência específica, o combustível foi introduzido vaporizado na câmara e foram utilizadas duas condições de excesso de ar.

As observações feitas por Wood et alii(1989) e Dempsey e Oppelt(1993) de que a taxa de emissão de CO pode aumentar sem uma diminuição significativa da eficiência de destruição foram baseadas em situações operacionais anômalas, de duração limitada, tais como uma eventual alimentação excessiva de resíduo em um forno rotativo ou defeito no sistema de nebulização. A medida da eficiência de destruição foi feita durante um intervalo de tempo longo o suficiente para, na prática, constituir um valor médio. As correlações de eficiência de destruição, a partir da fração de compostos remanescentes, comparadas às emissões de CO e/ou HC são efetivamente comparações de um valor médio obtido durante um período de tempo contra valores provenientes de um monitoramento contínuo de CO e/ou HC.

Neste trabalho, o tolueno representa o resíduo incinerado e a fração remanescente do tolueno está contida nas emissões de HC não queimados. A correlação entre as emissões de HC e CO sugere que ambos podem ser utilizados como um indicativo em tempo real da eficiência da incineração. Nas condições testadas, a emissão de CO é cerca de até 70 vezes maior que a emissão de HC não queimado, enquanto Strehlow (1985) afirma que a relação entre a emissão de CO e HC é da ordem de 10:1, independente de quão completo seja o processo de combustão.

5.3 Medidas no interior da câmara de combustão

Foi realizada uma série de medidas locais de velocidade, temperatura e concentração dos gases no interior da câmara, indicativas dos fenômenos que aí ocorrem.

5.3.1 Distribuição de velocidades

A Figura 5. 11 apresenta o campo de velocidades no interior da câmara para o número de rotação 1,17 enquanto a Figura 5.12 apresenta a distribuição da componente axial das velocidades para o mesmo caso. As Figura 5. 13 e 5.14 apresentam estas distribuições para o número de rotação 1,46. Neste último caso, uma menor quantidade de valores é apresentada, devido às restrições já descritas no Capítulo 4. A magnitude da velocidade dentro da câmara variou de 0,6 a 3,0 m/s para o número de rotação 1,17 e de 1,3 a 4,4 m/s para o número de rotação 1,46. Para a sonda utilizada, com 10 mm de diâmetro externo, e nas condições de medição em temperaturas da ordem de 1100 °C, estas velocidades correspondem a número de Reynolds de 30 a 215. Chedaille e Braud (1972) observam que para números de Reynolds abaixo de 100 os erros de medição são maiores que os previstos na calibração usual destas sondas, normalmente realizadas na faixa de número de Reynolds de 3500 a 5000.

As Figura 5. 11 e 5.12, para o número de rotação 1,17, mostra a existência de uma Zona Central de Recirculação - ZCR se estendendo até uma distância de cerca de 800 mm a partir do queimador, enquanto que as Figura 5. 13 e 5.14, para número de rotação 1,46, a ZCR ocupou praticamente toda a extensão da câmara de combustão confirmando o efeito significativo do número de rotação na fluidodinâmica da câmara. O aumento da região de mistura devido ao aumento do número de rotação influencia as emissões de CO e HC, sendo este fato mais importante no caso de menor excesso de ar, conforme se pode observar na Figura 5.6.

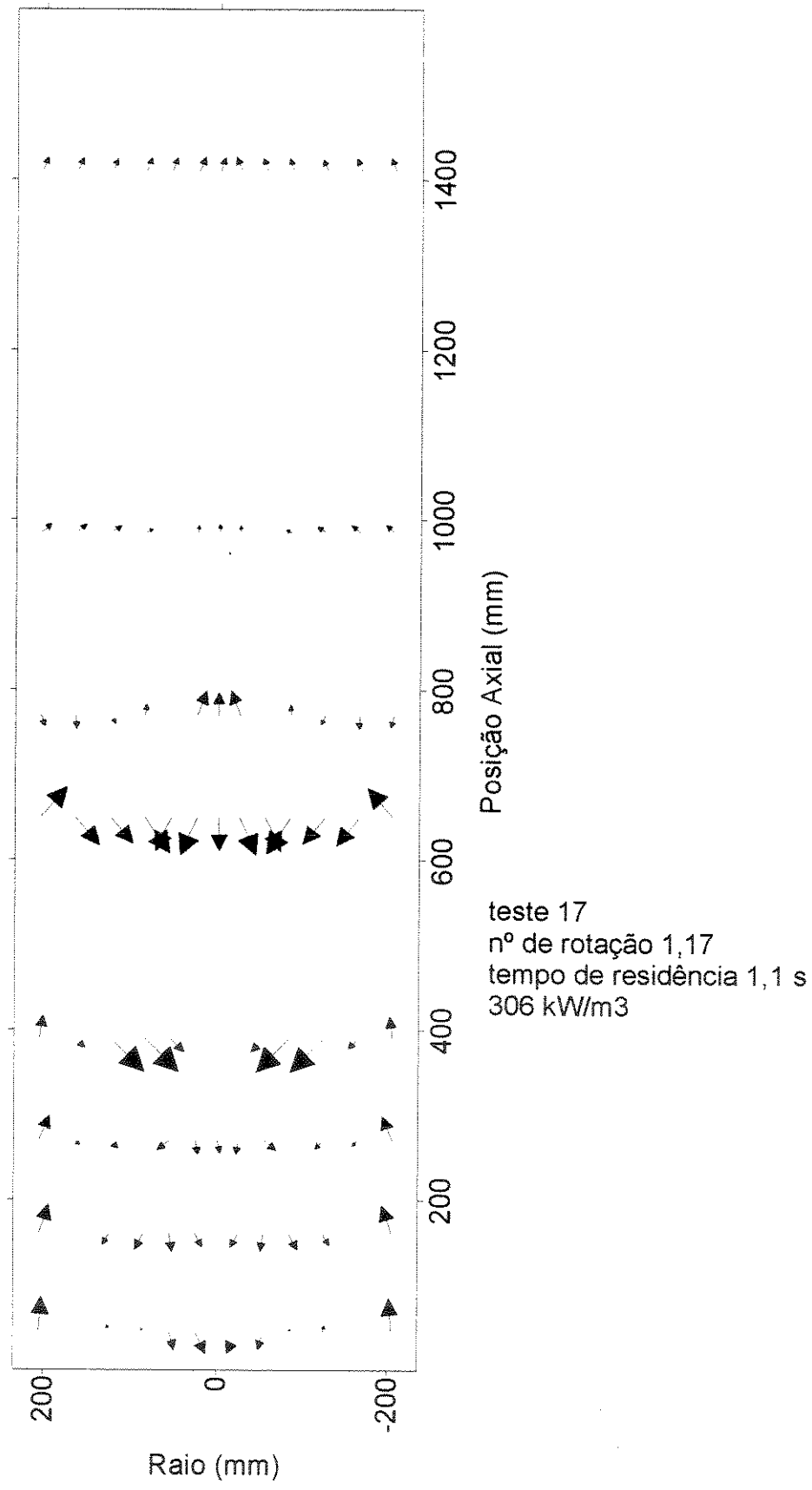


Figura 5. 11 Distribuição de velocidades no interior da câmara de combustão.

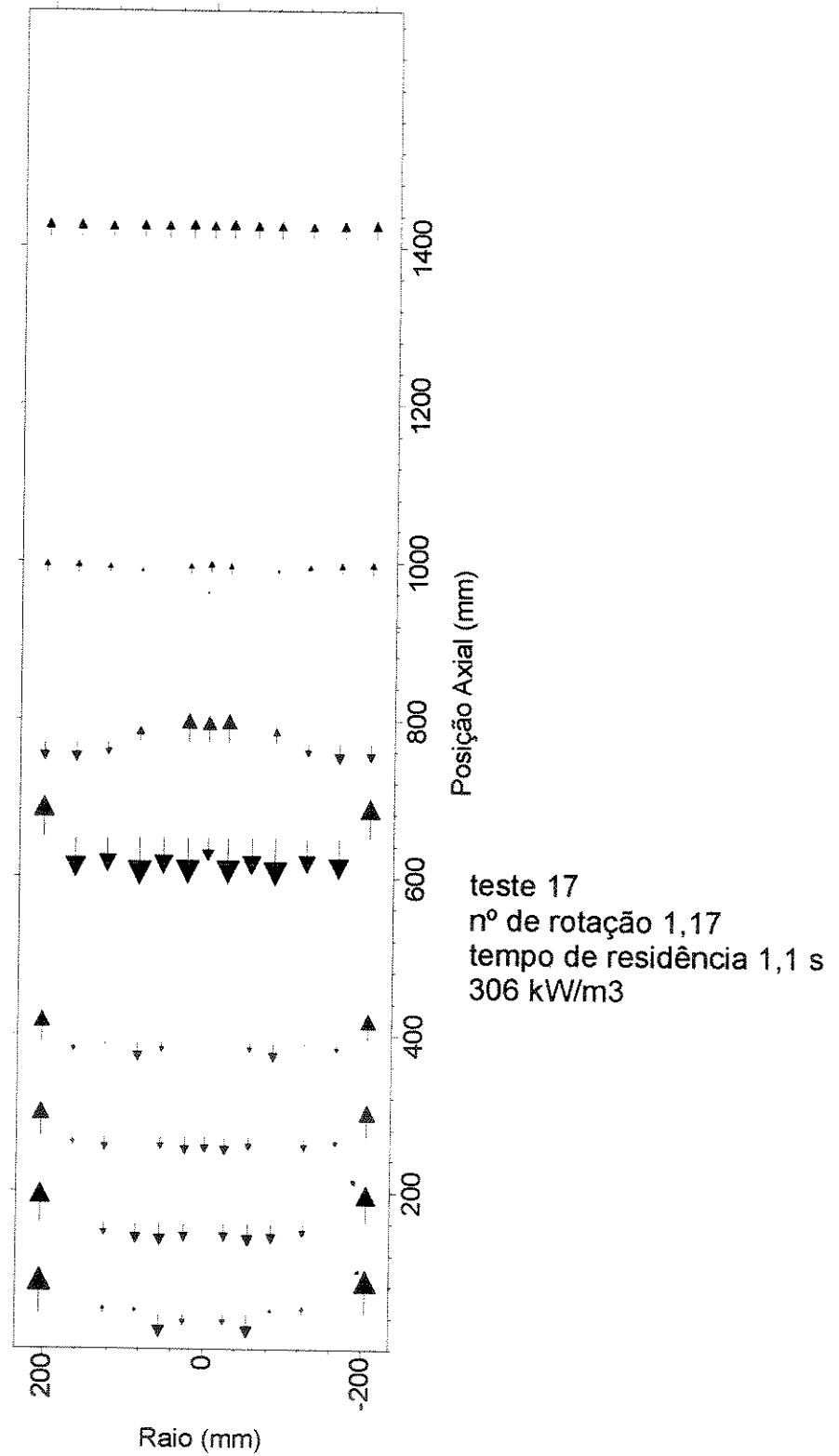


Figura 5. 12 Distribuição da componente axial das velocidades no interior da câmara.

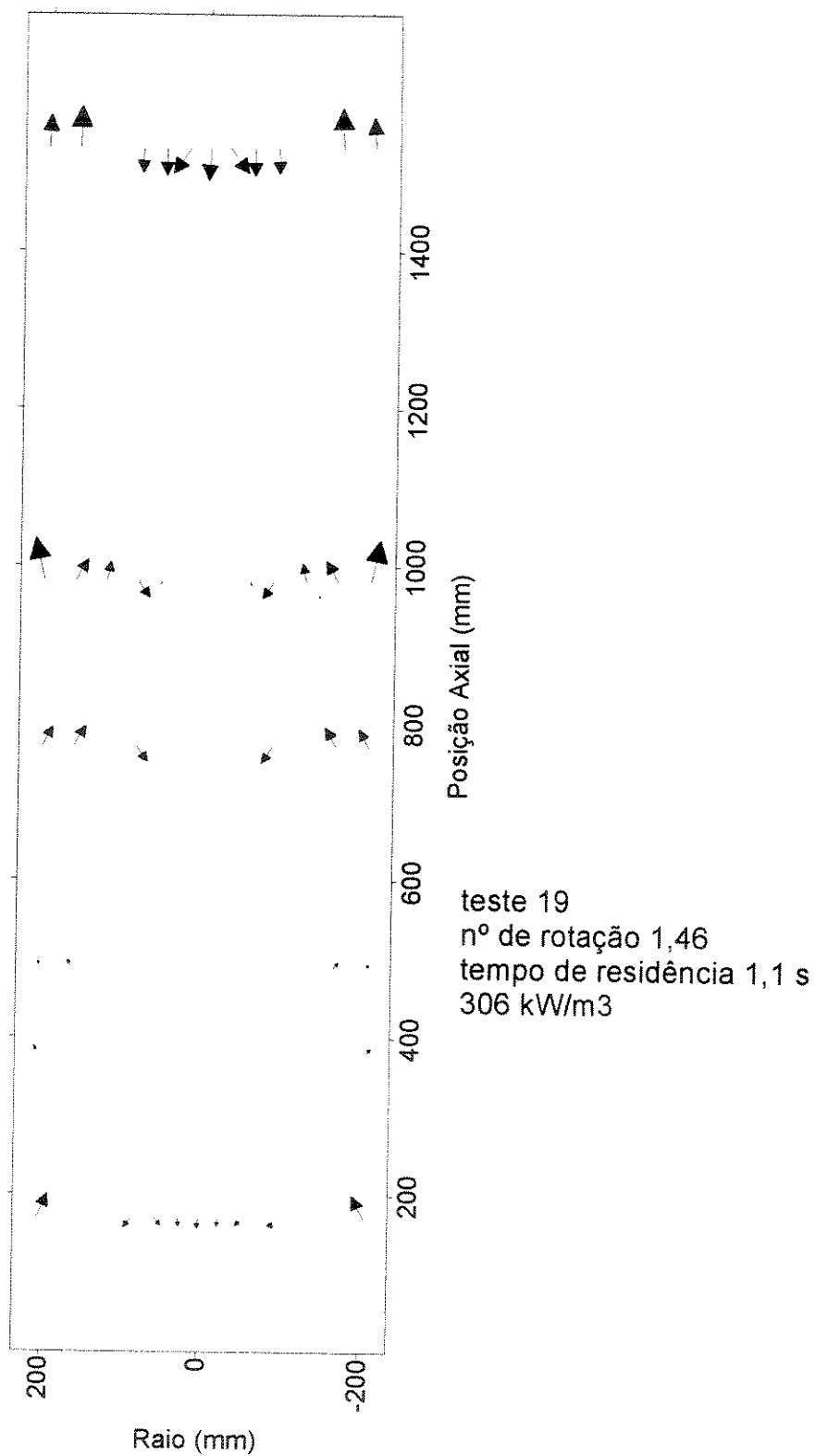


Figura 5. 13 Distribuição de velocidades no interior da câmara.

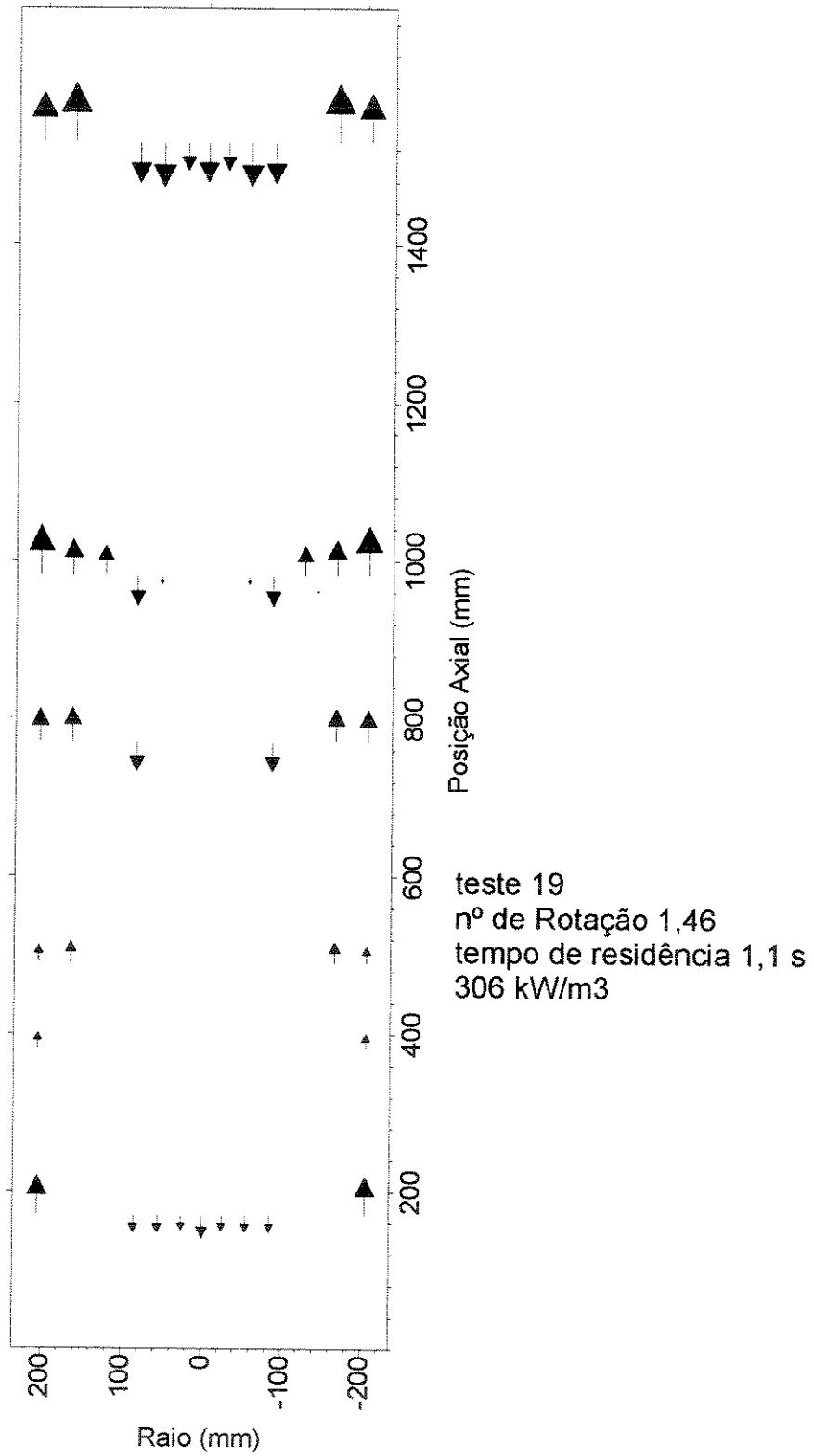


Figura 5. 14 Distribuição da componente axial das velocidades no interior da câmara.

5.3.2 Distribuição de temperaturas

As Figuras 5. 15, 5.16 e 5.17 apresentam a distribuição de temperatura dos gases no interior da câmara de combustão para testes com número de rotação 0,49, 0,68 e 1,17. Observa-se que as temperaturas no interior da câmara variaram de 800 a 1400 °C, sendo que no caso do número de rotação 0,68 as maiores variações de temperatura se encontram no início da câmara de combustão. Para número de rotação 0,49, o perfil de temperatura mostrou-se mais uniforme ao longo da câmara, sendo que as maiores variações ocorreram ao longo do raio no primeiro terço da câmara, com o máximo de temperatura na linha de centro da câmara. A Figura 5. 17 apresenta, além da distribuição de temperaturas para o número de rotação 1,17, uma delimitação aproximada da Zona Central de Recirculação, caracterizada a partir dos valores negativos do componente axial da velocidade. Os maiores valores de temperatura se encontram logo no início da câmara, fora da ZCR, onde tem início a combustão da mistura fresca e onde há retorno da corrente de produtos de combustão que deixam a ZCR. Não é possível, apenas através dos perfis de temperatura inferir os limites da ZCR, mas comparando os perfis de temperatura efetuados para os números de rotação 0,49 e 0,68 se observa que a maior rotação proporciona maiores variações radiais de temperatura. Beér e Chigier (1972) observaram que é a partir do número de rotação 0,6, classificado por eles como rotação forte (“strong swirl”), que o gradiente de pressão adverso ao longo do eixo axial da câmara de combustão inicia uma região de recirculação no centro do jato. Como observado na Figura 5. 17, onde é possível comparar os limites da ZCR, as inflexões do perfil de temperatura no início da câmara coincidem com os limites da ZCR. Mais à frente, ainda dentro da ZCR as variações radiais de temperatura tendem a se amenizar e fica difícil distinguir os limites da ZCR pelo exame dos perfis de temperatura.

Deve ser notado que o pulverizador de água está localizado no início da câmara de combustão, 20 mm à frente da lança de saída de GLP e Tolueno. A água, alimentada como um jato cônico cheio, com ângulo de abertura de 15 a 25°, ao vaporizar provoca uma menor temperatura dos gases nesta região.

A temperatura média na secção final da câmara variou entre 950 a 1000 °C, sendo que a temperatura de mistura no duto de saída dos gases foi mantida na faixa de 830 a 840 °C. O termopar no duto de saída de gases mediu a temperatura dos gases escoando a velocidade média de 16 m/s, sendo que o misturador estático localizado na entrada do duto impediu que a radiação direta da chama atingisse a ponta do termopar. Como a jusante do termopar estava montado o lavador resfriador de gases, é possível que a cortina de água, operando em temperatura relativamente menor, seja responsável pela diferença de 100 °C entre medida indicada pelo termopar existente no duto de saída e o valor indicado pelo pirômetro na secção da câmara próxima à saída.

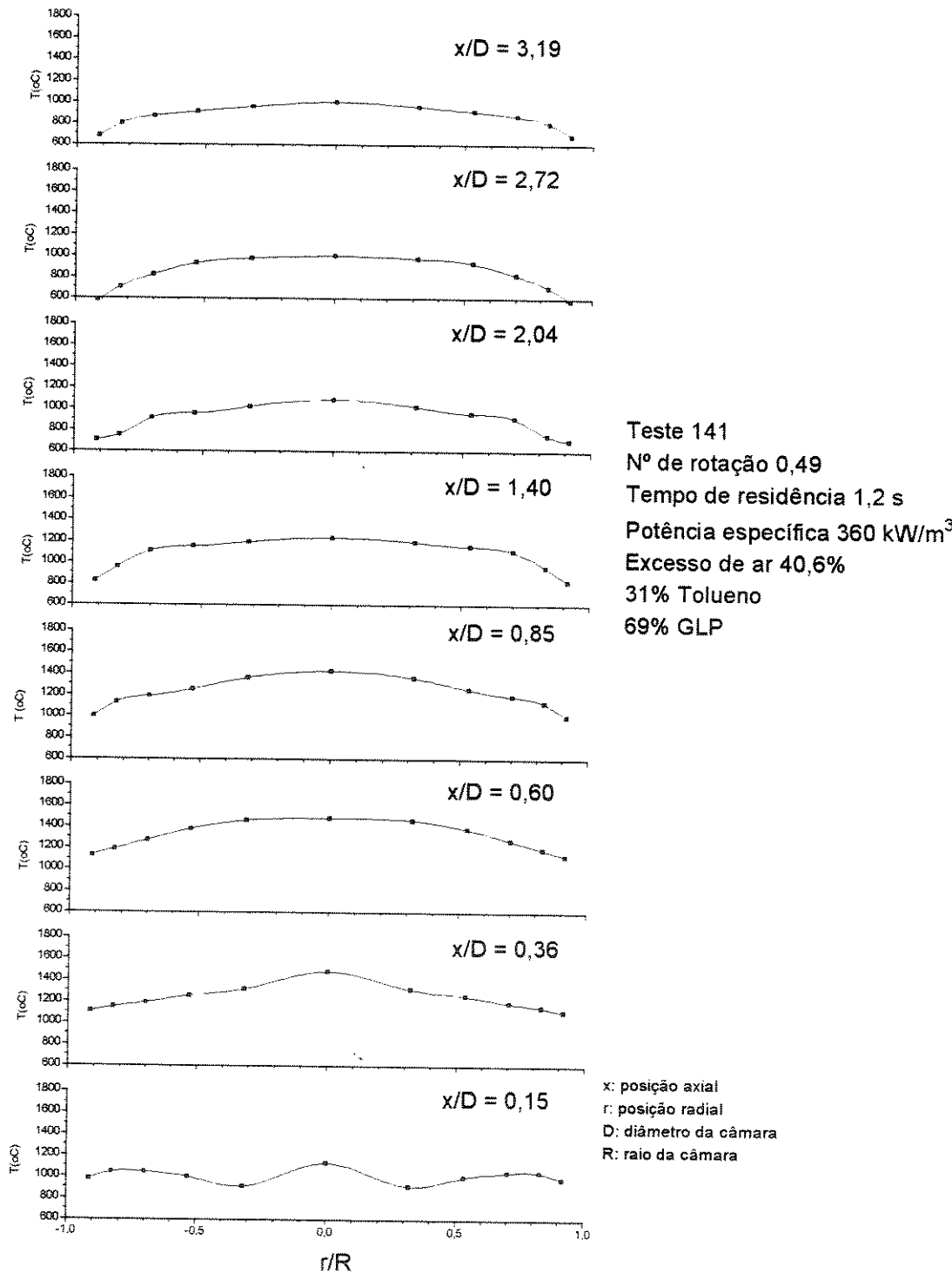


Figura 5. 15 Distribuição de temperatura dos gases no interior da câmara, para numero de rotação 0,49.

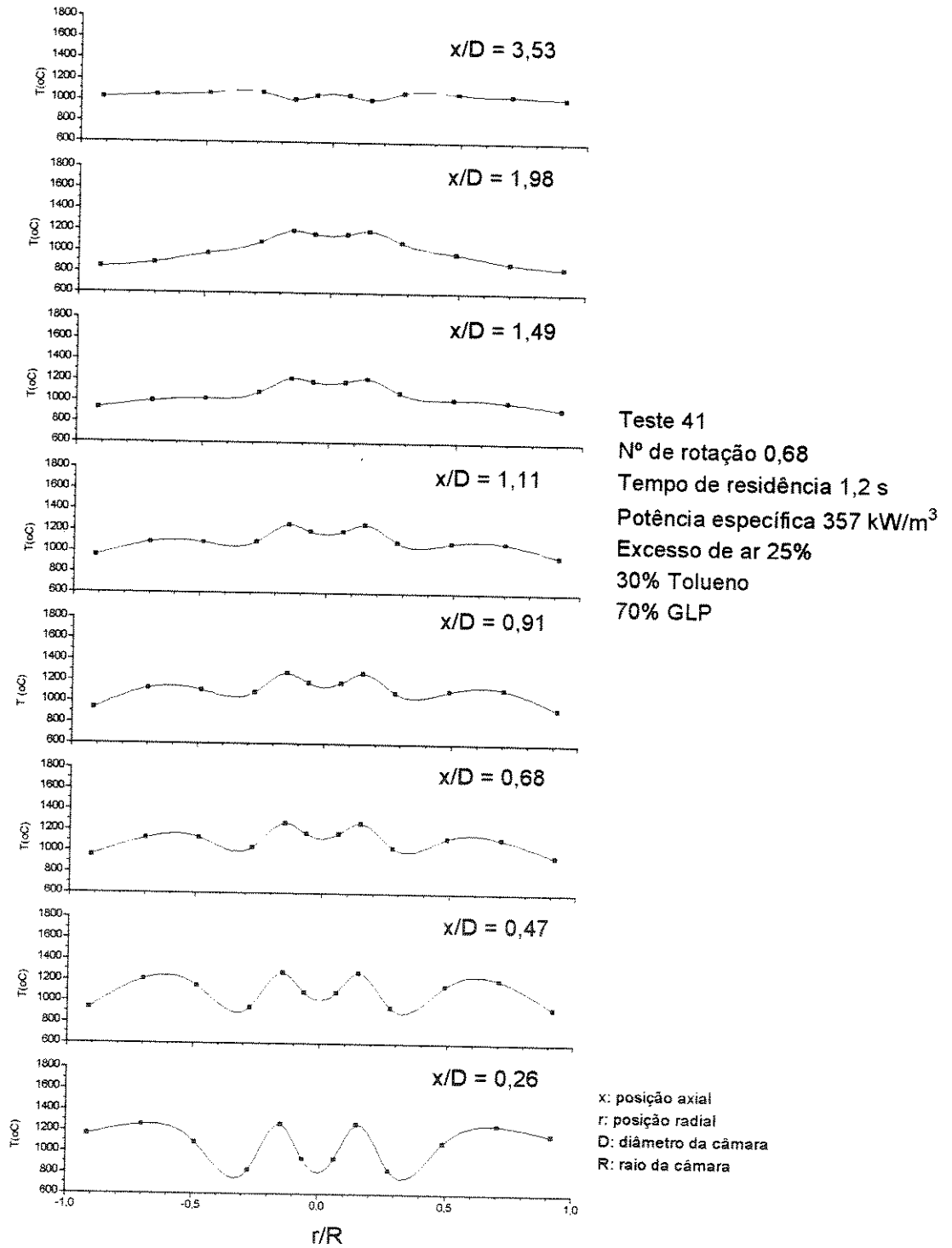


Figura 5. 16 Distribuição de temperatura dos gases no interior da câmara, para o número de rotação 0,68.

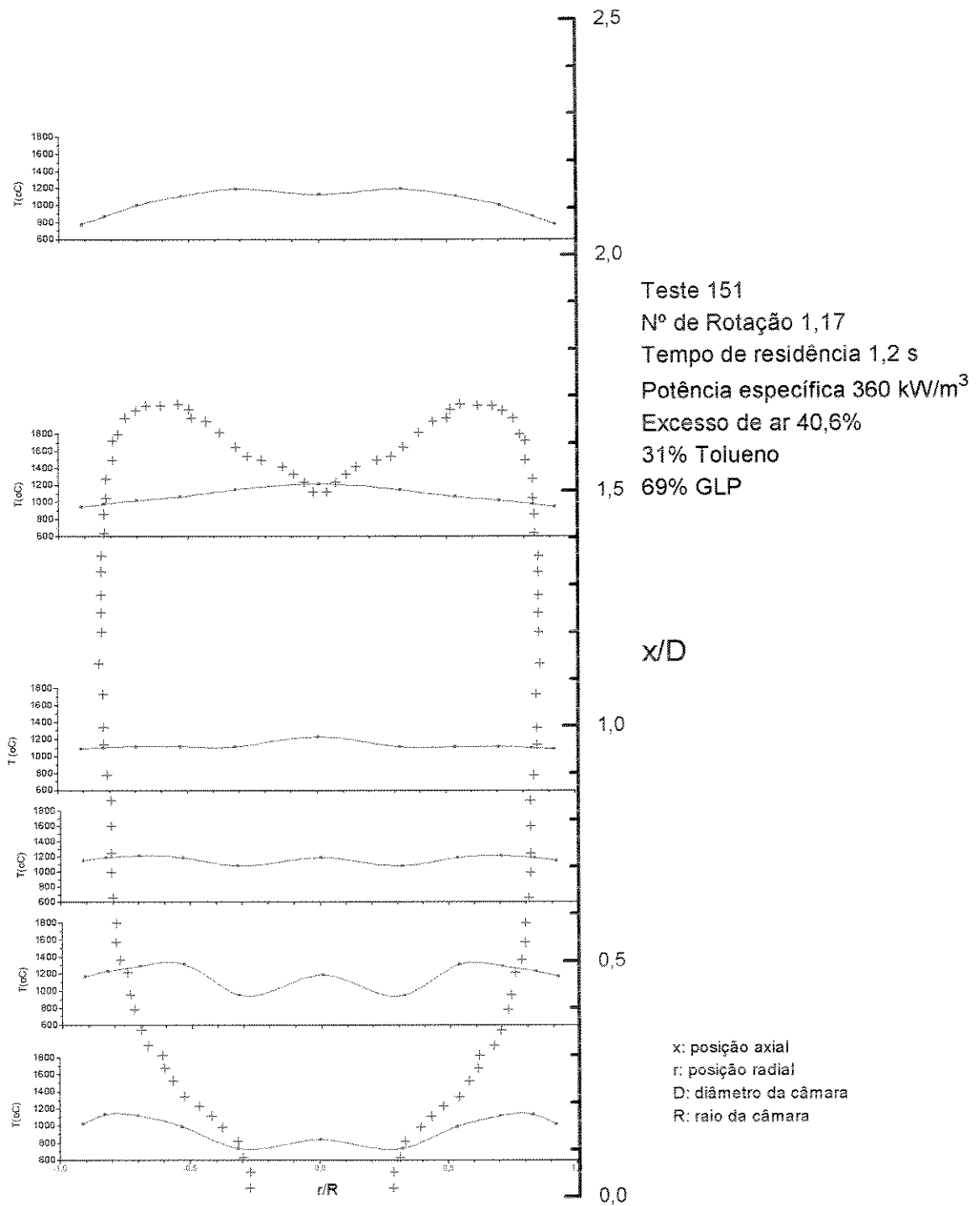


Figura 5. 17 Distribuição de temperaturas dos gases no interior da câmara, para número de rotação 1,17, com delimitação da Zona Central de Recirculação.

5.3.3 Distribuição da concentração de gases no interior da câmara

As Figura 5. 18 e 5.19 apresentam as distribuições de concentração de CO e HC no interior da câmara, para o número de rotação 0,49. As Figura 5. 20 e 5.21 apresentam as distribuições de CO e HC para o número de rotação 1,17 com a inclusão da Zona Central de Recirculação. Observa-se um maior gradiente de concentração para o maior número de rotação, com as maiores concentrações ocorrendo fora da ZCR, sendo que para o menor número de rotação os gradientes não são tão acentuados.

No caso do número de rotação 0,49, a concentração de CO apresenta um aumento na secção transversal da câmara a meio diâmetro distante do queimador, enquanto HC totais cai drasticamente nesta secção. Isto pode ser observado na Figura 5. 22 que traz as concentrações médias de CO e HC, ao longo da secção radial, distribuída no comprimento da câmara. A Figura 5. 23 apresenta a mesma distribuição para o número de rotação 1,17, onde se observa que a concentração de CO diminui já a partir da primeira posição axial medida, devido ao maior grau de mistura dos reagentes na região inicial da câmara. O teor de CO indica prosseguimento da reação na segunda posição medida. Nos dois casos estudados, a concentração de HC total já na posição axial equivalente a um diâmetro cai a valor muito próximo da concentração de saída. No caso de CO o mesmo acontece para o número de rotação 1,17, enquanto, para números de rotação mais baixo há necessidade de uma maior distância do queimador para que a concentração atinja valores próximos aos da saída. O comprimento da câmara de combustão, no caso do número de rotação maior poderia, portanto, ser menor do que o utilizado, produzindo, provavelmente as mesmas emissões. Assim, a distribuição de concentrações no interior da câmara mostrou que, para a condição de maior excesso de ar, a região de mistura mostra-se mais importante que a região de escoamento pistonado, e para o maior número de rotação o comprimento da câmara de combustão poderia ser menor que o utilizado.

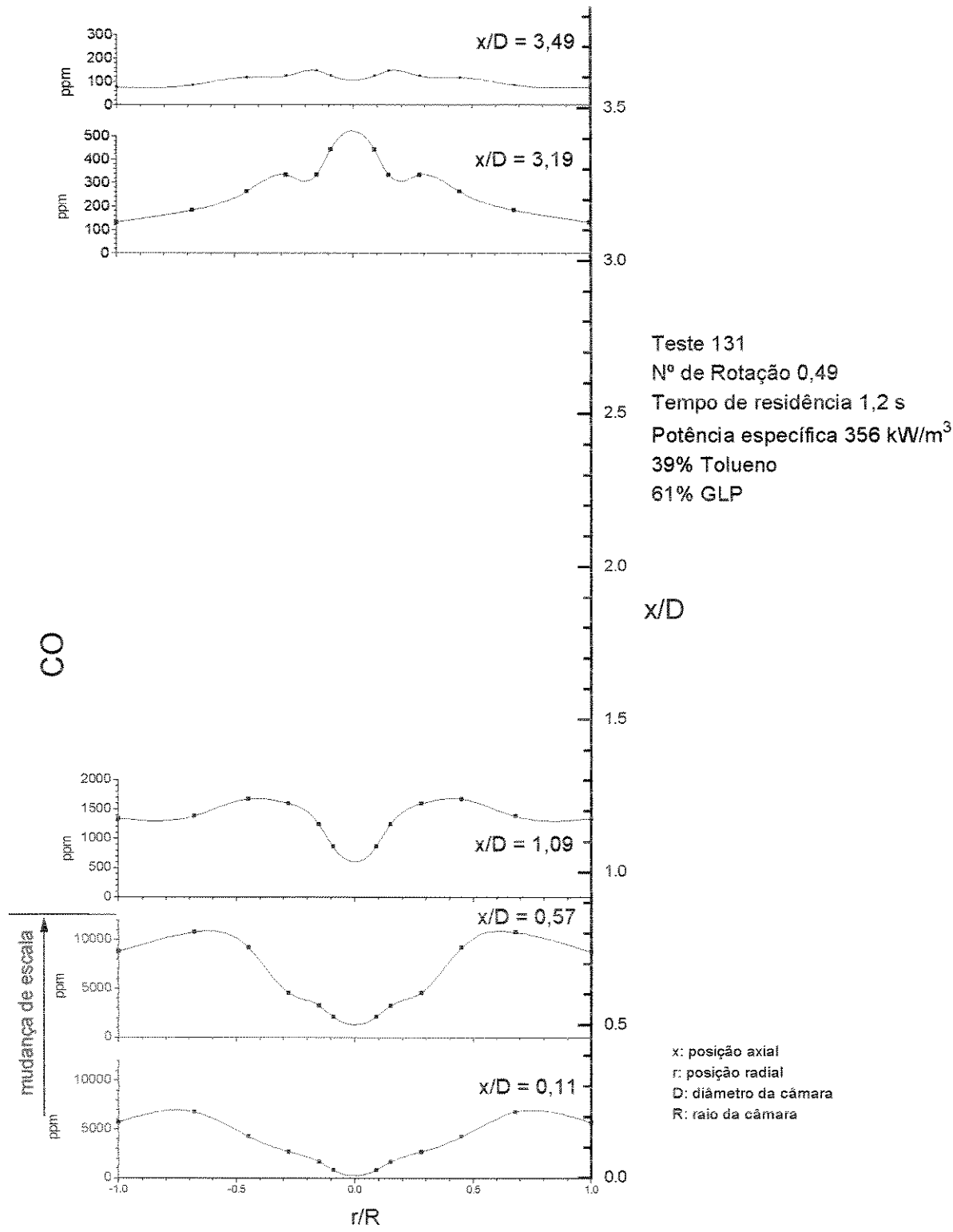


Figura 5. 18 Distribuição de concentração de CO no interior da câmara para número de rotação 0,49.

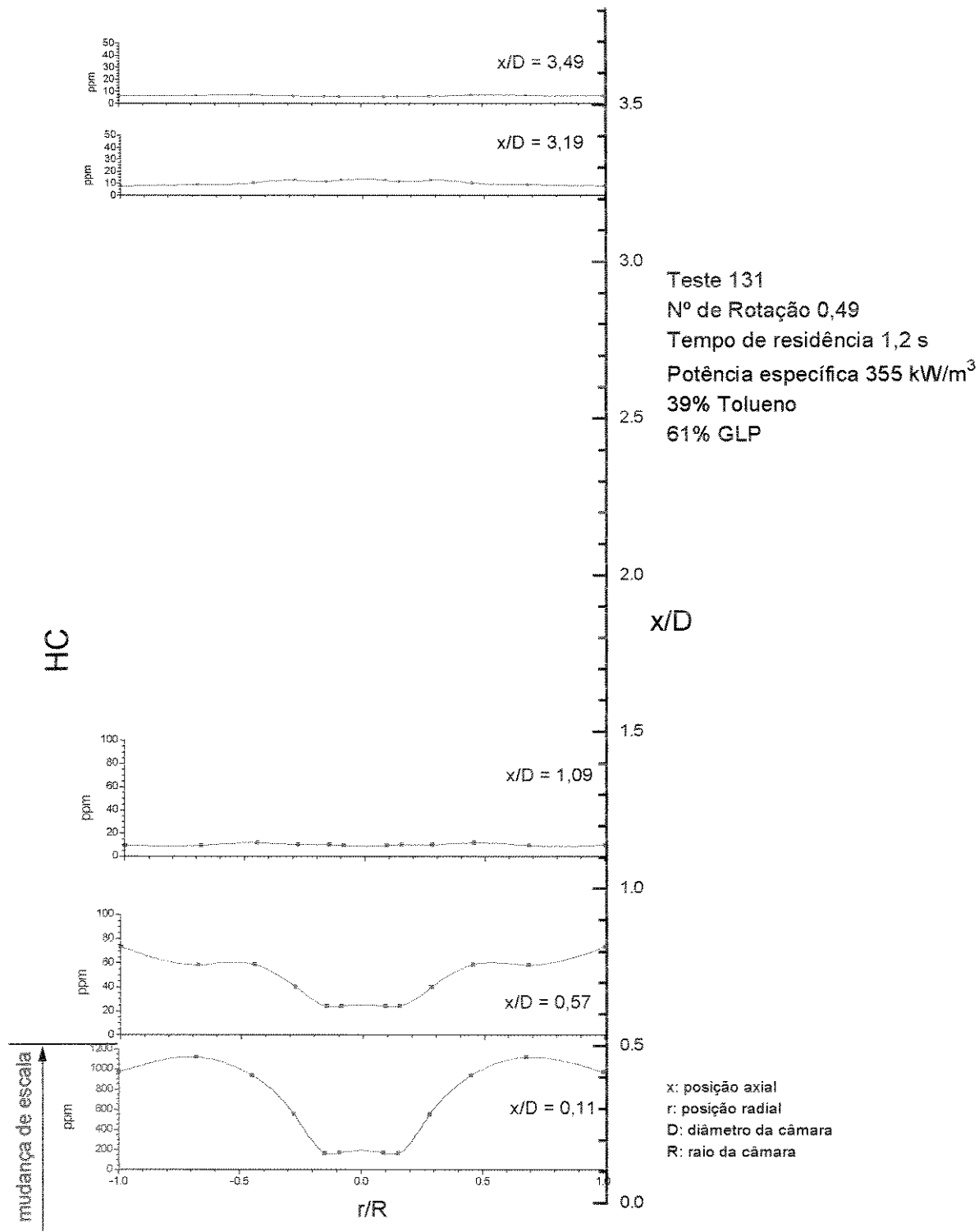
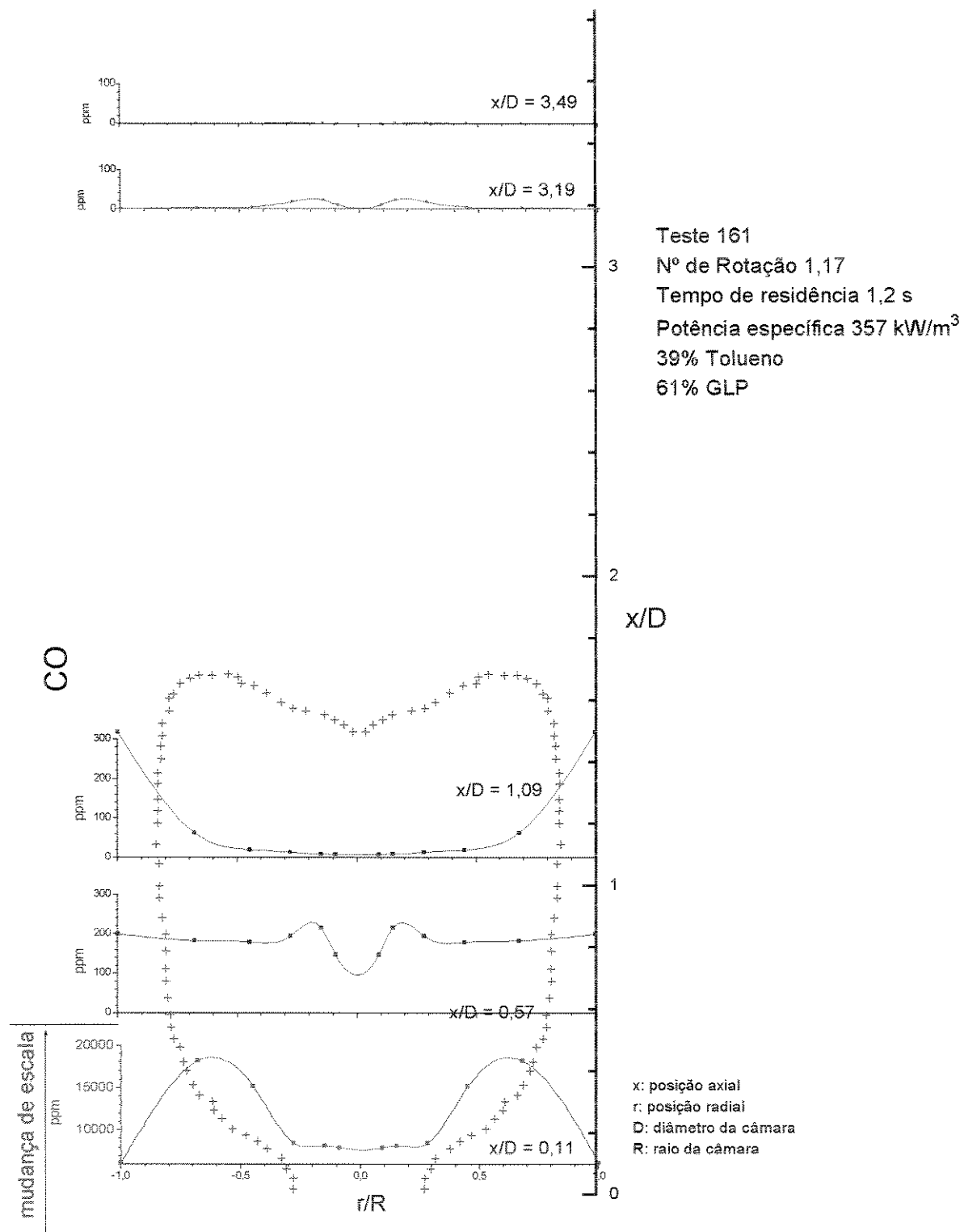


Figura 5. 19 Distribuição de concentração de HC totais no interior da câmara, para número de rotação 0,49.



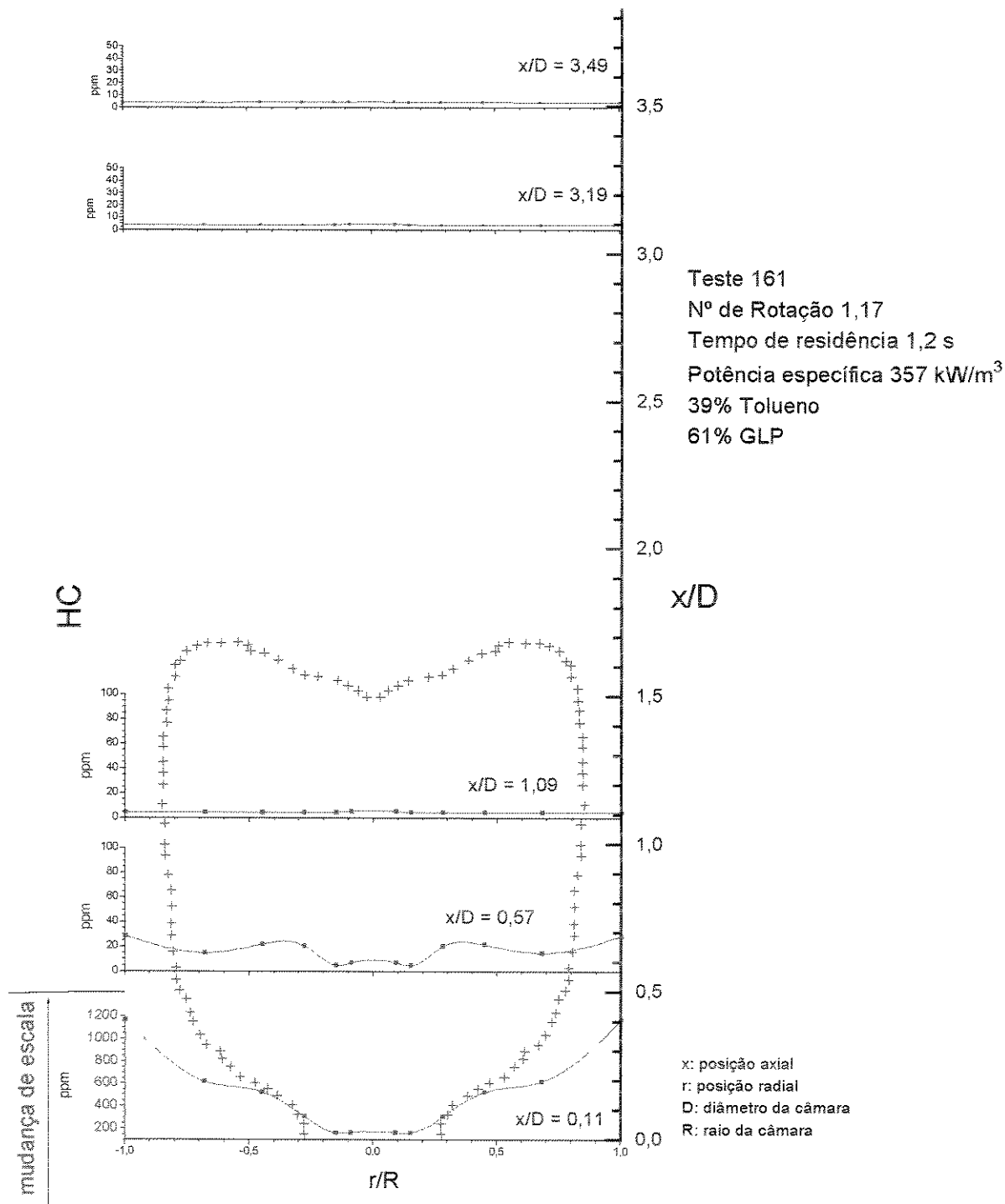


Figura 5. 21 Distribuição de concentração de HC totais no interior da câmara, com número de rotação 1,17, com delimitação da Zona Central de Recirculação.

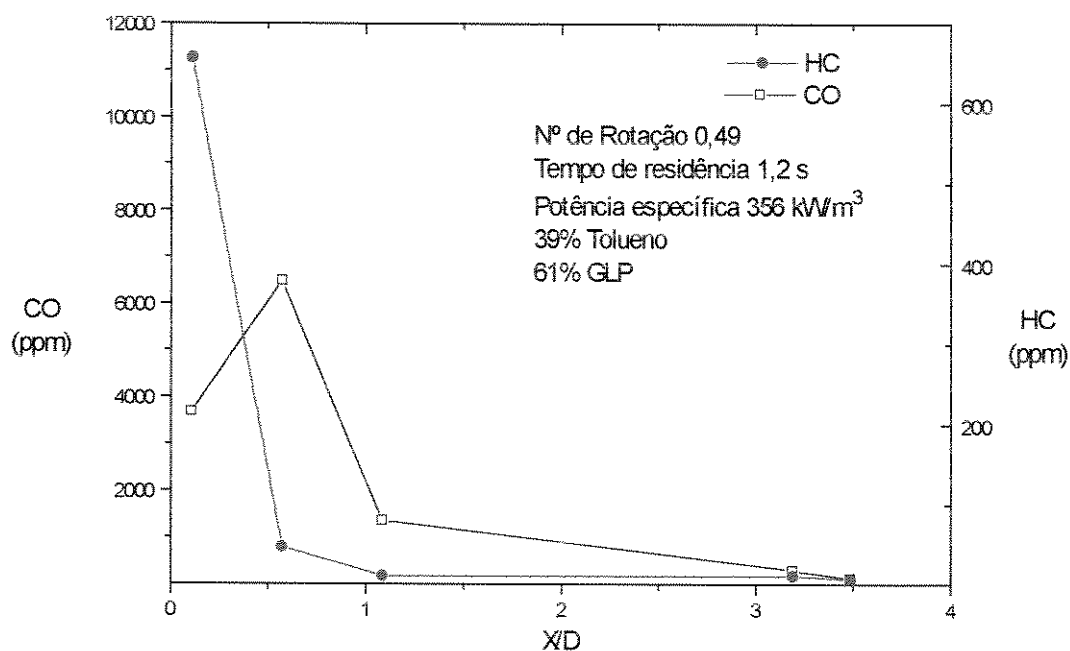


Figura 5. 22 Distribuição da concentração média de CO e HC na secção radial, ao longo da câmara de combustão, para número de rotação 0,49.

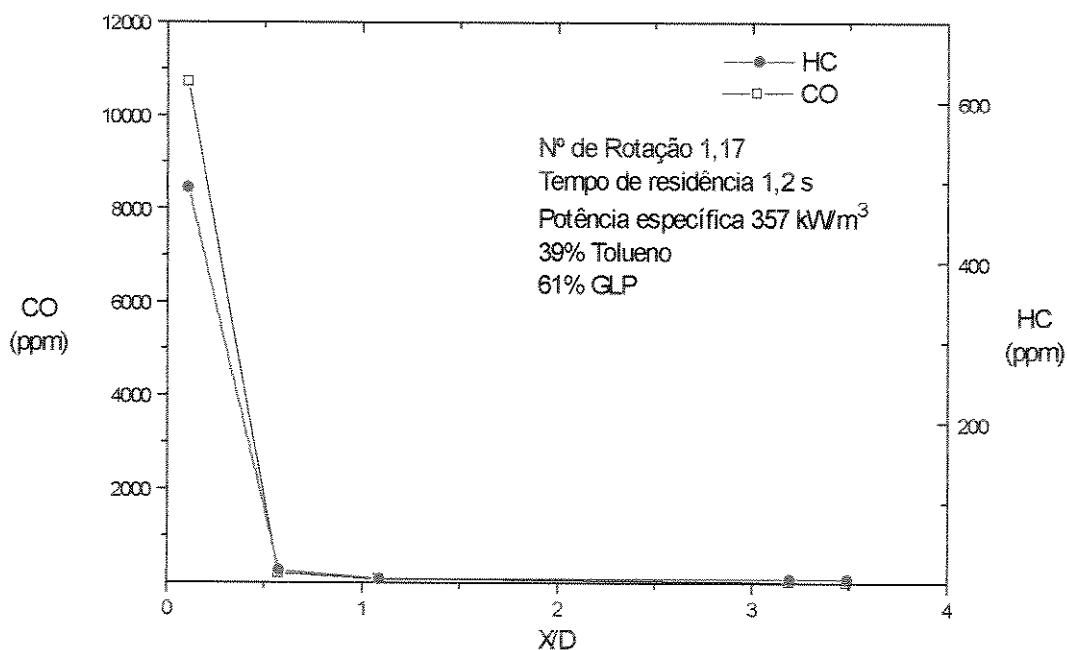


Figura 5. 23 Distribuição da concentração média de CO e HC na secção radial ao longo da câmara de combustão.

5.4 Distribuição do Tempo de Residência

Foram efetuadas medidas da distribuição do tempo de residência através da técnica de estímulo-resposta, com aplicação de um sinal de concentração de SO_2 tipo impulso unitário na entrada do ar, havendo combustão na câmara, sendo que o sinal de resposta foi fortemente afetado pelo sistema de amostragem e análise de gases. A resposta do sistema de amostragem e análise foi testada isoladamente e o resultado é mostrado na Figura 5. 24. Independente da magnitude do impulso, representado pela diferença entre a concentração de SO_2 aplicada e a concentração de linha base, o tempo de resposta do sistema de amostragem, foi de 100 segundos. A Figura 5. 25 apresenta as curvas de distribuição do tempo de residência do sistema de amostragem e analisador de SO_2 , obtidos a partir da derivada da diferença de concentração ($C-C_0$) em relação ao tempo, onde C é a concentração medida pelo analisador e C_0 é a concentração de linha base, medida antes de aplicar o sinal impulso unitário. A Tabela 5. 1 apresenta os valores da média e da variância normalizada da distribuição do tempo de residência, calculados a partir das curvas de resposta ao sinal impulso unitário. Observa-se que os tempos médios de residência do conjunto câmara-sistema de amostragem-analisador são da mesma ordem de grandeza dos tempos de residência médios do sistema de amostragem e análise, resultando em um tempo de residência da câmara de combustão da ordem de 20 a 24 segundos, quando o tempo médio de residência utilizado em operação foi 1,2 segundos. A Figura 5. 26 apresenta a variância da distribuição do tempo de residência calculada a partir da resposta da câmara de combustão ao sinal impulso unitário de concentração de SO_2 , obtida pela diferença entre a variância do conjunto e a variância do sistema de amostragem isolado. O exame da figura não mostra uma tendência precisa do comportamento da variância com o número de rotação, indicando um aparente decréscimo da variância e portanto, o combustor operando mais próximo do tipo escoamento pistonado a medida que aumenta o número de rotação, em oposição à constatação anterior do aumento da ZCR com o número de rotação. É possível que o longo tempo de resposta exibido pelo sistema de amostragem-analisador tenha influenciado nos cálculos, impedindo uma determinação definitiva da distribuição do tempo de residência da câmara isoladamente.

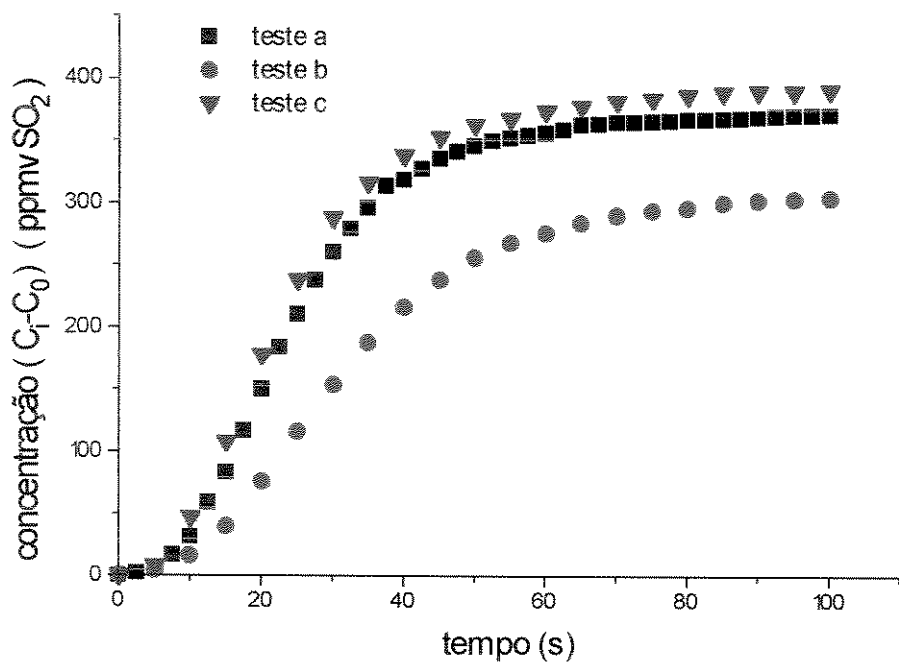


Figura 5. 24 Resposta do sistema de amostragem e analisador de SO_2 a um estímulo tipo impulso unitário de concentração de SO_2 .

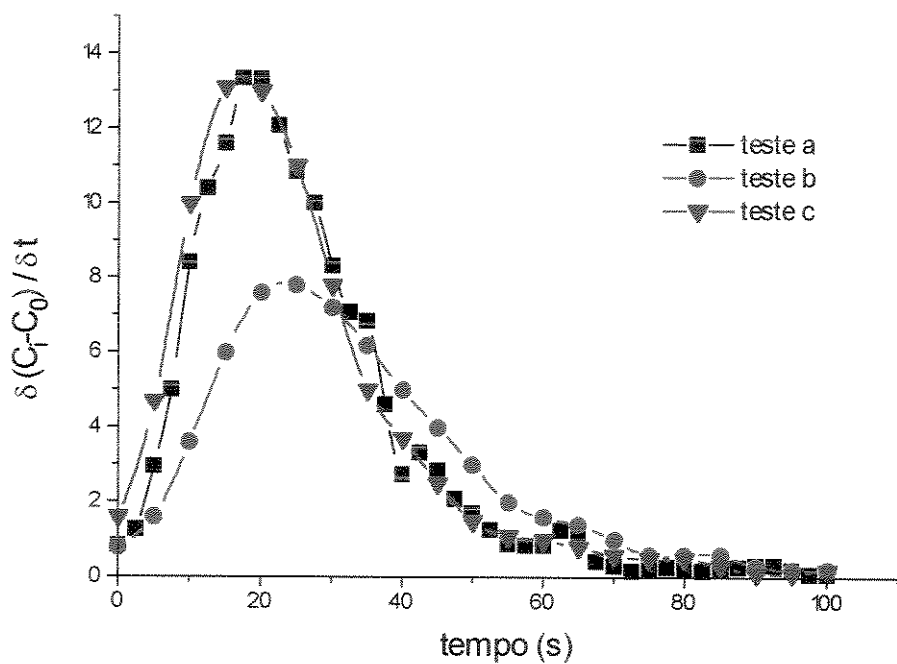


Figura 5. 25 Distribuição virtual do tempo de residência do sistema de amostragem e analisador de SO_2 .

Tabela 5. 1 Parâmetros das curvas de distribuição do tempo de residência obtidos em testes a partir de um impulso unitário.

Nº de Rotação	Sistema de Amostragem		Conjunto	
	Média (s)	Variancia	Média	Variancia
0,36	22.9	0.116	45.9	0.488
0.49	23.5	0.173	55.4	0.564
0.68	26.2	0.259	48.0	0.528
0.89	24.7	0.204	49.5	0.357
1.03	28.0	0.254	49.2	0.547
1.17	27.5	0.251	50.9	0.412
1.31	28.3	0.257	58.8	0.423
1.46	22.3	0.128	45.8	0.414

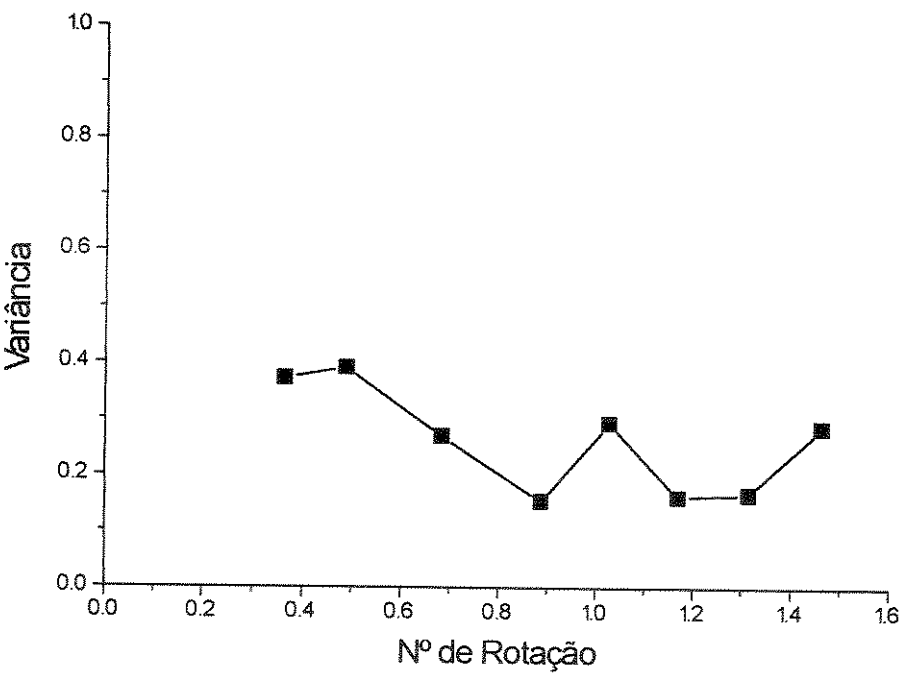


Figura 5. 26 Variancia da distribuição do tempo de residencia da câmara, calculada a partir das curvas de resposta do sinal impulso unitário.

5.5 Análise de Erro

O cálculo das incertezas representativas dos principais parâmetros utilizados neste trabalho foi baseado no método proposto por Kline e MacClintock (1953).

As incertezas estimadas para os principais parâmetros nesta pesquisa, conforme detalhado nos anexos A, B, E e F são:

- descarga do ar de combustão: 0,7%
- excesso de ar: 6%
- pirômetro de sucção: 1%
- concentração CO: 5% do valor medido ou 20 ppm, para medidas abaixo de 400 ppm
- concentração de SO₂: 5 ppm
- concentração O₂: 0,2% em volume
- concentração HC: 0,7 ppm, até medição de 4 ppm, 8 a 16% de erro de 4 a 40 ppm e 8% acima de 40 ppm.

Capítulo 6

Conclusões e Recomendações

6.1 Conclusões

O presente trabalho estudou experimentalmente o efeito do número de rotação do escoamento no interior de uma câmara secundária de incineração nas emissões de CO e HC totais para três concentrações de tolueno no combustível e dois valores do excesso de ar. Foram também realizadas medições locais no interior da câmara de combustão, compreendendo: dois campos de velocidades, três distribuições de temperatura e duas distribuições de concentração de CO e HC totais. A distribuição do tempo de residência foi avaliada através da resposta a um sinal de concentração de SO₂ tipo impulso unitário.

Os padrões de escoamento em câmaras secundárias de incineração, controlados pelo número de rotação do queimador, tem influência na emissão de poluentes gasosos e na eficiência de destruição de resíduos, como se verificou experimentalmente em testes sob diferentes condições de excesso de ar e composição do resíduo incinerado. O número de rotação, como já foi constatado em outros trabalhos (Beér e Chigier, 1972, Beltagui e Maccalum, 1976, Claypole e Syred, 1982) influencia no tamanho e intensidade da Zona Central de Recirculação afetando a distribuição do tempo de residência.

O aumento do número de rotação diminuiu as emissões de CO e HC na condição de maior excesso de ar (42%) e aumentou a emissão destes quando utilizado na condição de menor excesso de ar (19%). O aumento do número de rotação aumentou a região de mistura dentro da câmara e diminuiu a região onde o escoamento é mais próximo a um escoamento pistonado. O tamanho da região de fluxo pistonado mostrou-se mais importante no que diz respeito à diminuição da emissão de poluentes na condição de menor concentração de oxigênio (baixo excesso de ar).

O contacto entre combustível e oxidante mostrou-se mais importante na condição de maior excesso de ar, onde, a maior região de mistura, causada pelo aumento do número de rotação, diminuiu a emissão de CO e HC.

A relação entre as emissões, CO/HC, mostrou-se relativamente constante, da ordem de 70:1, em diversas condições de excesso de ar e composição do combustível. Com o aumento do número de rotação, aumenta a emissão de HC em relação a CO, indicando que uma menor região de escoamento pistonado traz como consequência o aumento da emissão de combustível não queimado em relação à emissão de CO.

O número de rotação não tem grande importância na distribuição de temperaturas no interior de uma câmara adiabática. A água injetada com o combustível teve efeito local, apenas nas temperaturas próximas ao queimador.

A distribuição de concentrações no interior da câmara mostrou que, para a condição de maior excesso de ar, a região de mistura mostra-se mais importante que a região de escoamento pistonado, onde, para maior número de rotação o comprimento da câmara de combustão poderia ser menor que o utilizado. O tempo de residência utilizado na região de mistura tem influência diferente conforme o excessos de ar

6.2 Recomendações para futuros trabalhos

- Estudar em mais detalhes a distribuição das regiões misturada e de escoamento pistonado dentro da câmara de combustão, já que se constatou uma influência significativa nas emissões. Para este estudo deve ser pesquisado a possibilidade de utilização de outros métodos de medição de velocidades, que apresentem maior sensibilidade às velocidades típicas encontradas em câmaras de incineração.
- Aperfeiçoar a técnica de medição da distribuição do tempo de residência para situações particulares de câmara de combustão. Estudar a possibilidade de utilização de uma ferramenta matemática mais adequada para modelar o comportamento do sistema de amostragem e analisador, já que, o tempo de resposta total resultou uma ordem de grandeza maior que o tempo de residência médio da câmara, o que impediu a obtenção de dados conclusivos.
- Estender o trabalho para outras formas geométricas de câmara de combustão, variando, por exemplo, a relação comprimento/diâmetro da câmara e utilizando de formas não axissimétricas, tais como as normalmente encontradas em câmaras secundárias de incineração.
- Estudar a emissão de produtos de combustão incompleta aplicados à câmaras de combustão não adiabáticas, tais como as utilizadas em caldeiras e fornos, estendendo a pesquisa à co-incineração de resíduos com geração de energia.

Referências Bibliográficas

Assoc. Brasileira de Normas Técnicas, 1987, “NBR 10004 - Resíduos Sólidos”, Rio de Janeiro, 63p.

Assoc. Brasileira de Normas Técnicas, 1989, “NBR 11175 - Incineração de Resíduos Sólidos Perigosos - Padrões de Desempenho”, Rio de Janeiro, 5 p.

Beér, J.M., e Chigier, N.A., 1972, “Combustion Aerodynamics”, Applied Sc. Publ., London, 264 pg.

Beltagui, S. A., Kenbar, A. M. A. e Maccallum, N. R. L., 1993, “Comparison of Measured Isothermal and Combusting Confined Swirling Flows: Peripheral Fuel Injection”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 6, pp. 147-156.

Beltagui, S.A., Maccallum, N.R.L., 1976, "The Modelling of Vane-Swirled Flames in Furnaces", *J.Inst. Fuel*, vol.69, pp.193-200.

Beltagui, S.A., Maccallum, N.R.L., 1976, "Aerodynamics of Vane-Swirled Flames in Furnaces", *J.Inst.Fuel*, vol. 69, pp.183-193.

- Bernardes Jr,C.;** 1990,"Industrial Solid Waste in São Paulo Metropolitan Region - Situation and Perspectives", *pre-prints of IAWPRC International Seminar On Industrial Residuals Management*, Salvador, BA, Brazil, nov 1990.
- Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N.,** 1960, "Fenómenos de Transporte", Ed. Reverté, Barcelona.
- Bizzo, W.A., Cardoso, A.L. e Goldstein Jr., L.,** 1996, "Construção e Calibração de Dois Modelos de Tubo de Pitot de 5 Furos para Aplicação em Câmaras de Combustão", *6º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas*, 11-14 novembro, Florianópolis
- Bonner,T. et alii;** 1981,"Hazardous Waste Incineration Engineering", Noyes Data, N.Jersey.
- Bose,D. and Senkan,S.M.;** 1983,"On the Combustion of Chlorinated Hydrocarbons, I.Trichloroethylene", *Combustion Sci. Technology*, vol.35.
- Bowman, C.T.,** 1975, "Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol.1,n.1,pp.33-45.
- Carroll, G.J. et alii,** 1992, "Pilot-Scale Evaluation of An Incinerability Ranking System for Hazardous Organic Compounds", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol.42, no. 11, p.1430-1436.
- Chang, D.P.Y. et alii,** 1989, "Relationships Between Laboratory and Pilot-Scale Combustion of Some Chlorinated Hydrocarbons", *Environ. Prog.*, Vol.8,nº3,pp.152-162.
- Chang, D.P.Y., Mournighan, R.E. e Huffman, G.L.,** 1991, "An Equilibrium Analysis of Some Chlorinated Hydrocarbons in Stoichiometric to Fuel-rich Post-flame Combustion Environments", *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 41, no.7, p.947-955.

- Chedaille, J., e Braud, Y.**, 1972, "Measurements in Flames", Edward Arnold(Publ.), London, 228 pg.
- Claypole, T.C., Syred, N.**, 1982, "The Stabilization of Flames in Swirl Combustors", *J. Inst. Energy*, march, pp.14-19.
- Cooper, C.D., Alley, F.C.e Overcamp, T.J.**, 1982, "Hydrocarbon Vapor Incineration Kinetics", *Environmental Progress*, vol.1, n.2, p.129-133.
- Cundy, V.A. et alli**, 1991, Rotary Kiln Incineration of Dichloromethane and Xylene: A Comparison of Incinerability Characteristics Under Various Operating Conditions, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 41, p. 1084-94.
- Dellinger, B. e Hall, D.L.**, 1986, "Surrogate Compounds for Monitoring the Effectiveness of Incineration Systems", *J. of the Air Poll. Control Assoc.*, vol.36, no. 2, p.179-183.
- Dellinger, B., Taylor, P.H. e Lee, C.C.**, 1993, Stability-Based Hazardous Organic Waste Incinerability Ranking, *Air&Waste*, vol. 43, p. 203-207.
- Dempsey, C.R. e Oppelt, E.T.**, 1993, Incineration of Hazardous Waste: A Critical Review Update, *Air&Waste*, vol. 43, p.25-73.
- El-Mahallawy, F.M. et allii**, 1977, "Effect of Combustion and Similarity Between Hot and Cold Flow Patterns in a Cylindrical Oil Fired Furnace", in Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnaces, K.H.Khalil(ed.), Pergamon Press, Oxford, 248 p.
- Field, M.A. et allii**, 1967, "Combustion of Pulverised Coal", The British Coal Utilisation Research Assoc., Surrey, England, 413 p.
- Gilges, K.**, 1991, "Europe's Hazardous Waste Dilemma, *Chemical Engineering*, agosto, p.30-39.

- Graham, J.L., Hall, D.L. and Dellinger, B.;** 1986, "Laboratory Investigation of Thermal Degradation of a Mixture of Hazardous Organic Compounds. 1.", *Env. Sci. Technology*, vol 20, n.7.
- Holman, J.P.;** 1994, "Experimental Methods for Engineers", McGraw Hill, New York, 616 p.
- Khalil, E.E.;** 1977, "Numerical Computations of Turbulent Swirling Flames in Axisymmetric Combustors", in *Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnaces*, K.H.Khalil(ed.), Pergamon Press, Oxford, 248 p.
- Khalil, E.E.;** 1982, "Modelling of Furnaces and Combustors", Abacus Press, Kent, UK, 260 p.
- Kline, S.J. e McClintock, F.A.;** 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments", *Mechanical Engineering*, vol. 75, jan., p.3-8.
- La Fond, R. et alii;** 1985, "Evaluation of Continuous Performance Monitoring Techniques for Hazardous Waste Incinerators", *JAPCA*, vol. 35, n. 6.
- Lee, J.C. e Ash, J.E.;** 1956, "A Three Dimensional Spherical Pitot Probe", *Transactions of the ASME*, pp.603-608.
- Lee, K.C.;** et alii, 1982, "Revised Predictive Models for Thermal Destruction of Dilute Organic Vapors and Some Theoretical Explanation", Paper n. 82-5.3, Air Pollution Control Association Annual Meeting, New Orleans.
- Lee, K.C.;** 1987, "Incineration of Hazardous Waste - Critical Review Discussion Papers", *JAPCA*, vol 37, n.9.
- Lee, K.C.;** 1988, "Research Areas for Improved Incineration System Performance", *JAPCA*, vol 38, n.12.

- Lester, T.W. et alii**, 1991, "Rotary Kiln Incineration. Comparison and Scaling of Field-Scale and Pilot-Scale Contaminant Evolution Rates from Sorbent Beds", *Env. Sci. Technology*, vol. 25, n. 6.
- Levenspiel, O.**, 1972, "Engenharia das Reações Químicas", Ed, Edgard Blucher, São Paulo, 481 p.
- Lewis W. E.**, 1966 "Thermodynamics and Fluid Mechanics Convention" London: Institute of Mechanical Engineers (citado em Wrigth, M. A., 1970)
- Liu, F., Garbett, E.S., Swithenbank, J.**, 1992, "The Effects of a Single High-Velocity Jet on The Combustion of Pulverised Coal in a Small-Scale Furnace", *J.Inst.Energy*, vol.65, pp.24-30.
- Moffat, R.J.**, 1982, "Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis", *J. of Fluids Engineering*, vol. 104, p.250-260.
- Moffat, R.J.**, 1988, "Describing the Uncertainties in Experimental Results", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 1, p.3-17.
- Moneib, H.A. et alii**, 1977, "Theoretical Investigation of the Effect of Combustion Air Swirl on The Characteristics of the Central Recirculation Zone in Furnaces", in Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnaces, K.H.Khalil(ed), Pergamon Press, Oxford, 248 p.
- Najim, S.E., Styles, A.C., Syred, N.**, 1982, "A Study of Modulatable Cyclone Combustors Using Gaseous Fuels. II. Premixed Combustion", *J. Inst.Energy*, March, pp.19-27.
- Nasserzadeh, V. et alii**, 1995, Measuring gas-residence times in large municipal incinerators, by means of a pseudo-random binary signal tracer technique; *J. of Inst. of Energy*, vol. 68, pp 106-120.

- Oppelt, E.T.**; 1987, "Incineration of Hazardous Waste - A Critical Review", *JAPCA*, vol 37, n.5.
- Plueneke, K.A.**; 1989, "Thermal Destruction of Hazardous Wastes", *Mechanical Eng.*, abril, p.55, .
- Pratt, D.T.**, 1976, "Mixing and Chemical Reaction in Continuous Combustion", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol.1, pp.73-86.
- Risk, N.H. e Mongia, H.C.**, 1993, "Semi-Analytical Correlations for NO_x , CO , and UHC Emissions", *J.of Eng. for Gas Turbines and Power*, vol.115, p.612-619
- Risk, N.H. e Mongia, H.C.**, 1993, "Three Dimensional Gas Turbine Combustor Emissions Modeling", *J.of Eng. for Gas Turbines and Power*, vol.115, p.603-611.
- Risk, N.H. e Mongia, H.C.**, 1995, "A Semi-Analytical Emission Model for Diffusion Flame, Rich/Lean and Premixed Lean Combustors", *J.of Eng. for Gas Turbines and Power*, vol.117, p.290-301.
- Roesler, J.F., Yetter, R. A. e Dryer, F.L.**, 1995, "Kinetic Interactions of CO , NO_x , and HCl Emissions in a Postcombustion Gases", *Combustion and Flame*, vol. 100, p. 495-504.
- Senkan, S.M.**; 1988, "Thermal Destruction of Hazardous Wastes", *Env. Sci. Techonology*, vol. 22, n. 4.
- Serag-Eldin, M.A., Spalding, D.B.**, 1977, "Validation of Three-Dimensional Cold-Flow Predictions Inside a Can Combustor", in *Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnaces*, K.H.Khalil(ed.), Pergamon Press, Oxford, 248 p.

- Sitaram, N., Lakshminarayana, B. e Ravindranath, A.**, 1981, "Conventional Probes for the Relative Flow Measurement in a Turbomachinery Rotor Blade Passage", *Journal of Engineering for Power*, Vol.103, pp.406-413.
- Staley, L.J. et alli**, 1989, "On the Relationships Between CO, POHC, and PIC Emissions from a Simulated Hazardous Waste Incinerator", *J. of Air Poll. Control Assoc.*, vol. 39, p.321-327.
- Strehlow, R.A.**, 1985, "Combustion Fundamentals", pg.470, McGraw Hill, N. York, 555 p.
- Styles, A.C., Syred, N., Najim, S.A.**, 1979, "A Study of Modulatable Cyclone Combustors Using Gaseous Fuel", *J. Inst. Energy*, december, pp. 159-168
- Taylor, P.H. e Dellinger, B.**, 1988, "Thermal Degradation Characteristics of Chloromethane Mixtures", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 22, n. 4, p.438-447.
- Taylor, P.H., Dellinger, B. and Lee, C.C.**, 1990, "Developement of a Thermal Stability Based Ranking of Hazardous Organic Compound Incinerability", *Env. Sci. Technology*, vol. 24, n.3.
- Tessitore, J.L. and Cross, F.L.**; 1988, "Incineration of Hospital Infectious Waste", *Pollution Eng.*, nov.
- The Chem. Engineer**, 1990, "Incinerating Hazardous Waste", , 12 Apr 1990.
- Theodore, L., Reynolds, J.**, 1987, "Introduction to Hazardous Waste Incineration", John Wiley & Sons, N.York, 463 p.
- Treaster, A.L. e Yocum, A.M.**, 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole Probes", *ISA Transactions*, Vol. 18, No. 3, pp.23-34.

- Trigo, F.C., Pereira, M.T. e Taira, N.M.**, 1989, "Tubo de Pitot de 5 Orifícios", *Anais, X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Rio de Janeiro, pp. 17-20.
- Weber, R., Dugué, J.**, 1992, "Combustion Accelerated Swirling Flows in High Confinements", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 18, n.4, pp. 349-367.
- Wen, C.Y. e Fan, L.T.**; 1975, *Models for Flow Systems and Chemical Reactors*; Marcel Dekker Inc., 570 p., New York
- Williams, J.D., Becker, A.R., Girovich, M.J.**, 1988, "3-D Flow Modeling of a Hazardous Waste Incinerator", *J. of Air Pollut. Control Assoc.*, Vol. 38 n. 8, pp. 1050-53.
- Wood, R.W. et alii**, 1989, "Rotary Kiln Incinerators: The Right Regime", *Mechanical Engineering*, setembro, p. 78-81.
- Wright M. A.**, 1970, "The Evaluation of a Simplified Form of Presentation for Five-Hole Spherical and Hemispherical Pitometer Calibration Data", *J. of Physics E: Sci. and Instrumentation*, vol. 3, p.356- 362.

ANEXO A

Calibração do pirômetro de sucção

A eficiência de um pirômetro de sucção, tal como relatado em Chedaille e Braud (1972) é definida pela equação:

$$E = \frac{T_M - T_0}{T_G - T_0}$$

onde:

T_M : temperatura medida

T_0 : temperatura sem sucção

T_G : temperatura real do gás

e é independente das condições do ambiente de medição, sendo dependente de suas características construtivas, da velocidade de sucção e da temperatura do gás.

A eficiência de um pirômetro pode ser estimada a partir de dois fatores de forma, f e f' , obtidos das curvas temperatura-velocidade e temperatura-tempo de resposta:

$$f = \frac{T_{vm} - T_0}{T_{vm} - \frac{T_{vm}}{4}}$$

onde:

T_{vm} : temperatura medida com velocidade V_m

T_0 : temperatura medida sem sucção

$T_{vm/4}$: temperatura medida com velocidade $V_m/4$

e

$$f' = \frac{\tau_0}{\tau_m}$$

sendo que τ_0 e τ_m são os tempos necessários para se atingir o equilíbrio sem sucção e com sucção, respectivamente. Determinados os fatores de forma, a eficiência pode ser obtida em dois gráficos fornecidos em Chedaille e Braud, 1972, pg. 19.

Neste trabalho, a eficiência do pirômetro foi obtida através do gráfico temperatura-tempo de resposta, operando o pirômetro a 1260 °C, obtendo-se os seguintes resultados:

- tempo para atingir o equilíbrio com sucção: 60 segundos
- tempo para atingir o equilíbrio sem sucção: 520 segundos.

O fator f' é calculado em 8,7 , e a eficiência do pirômetro obtida através dos gráficos citados é 99%.

ANEXO B

Calibração do Medidor de Hidrocarbonetos Totais

O detector de ionização de chama consiste de um pequeno queimador de H_2 com dois eletrodos, entre a base da chama e o topo. Quando compostos orgânicos são queimados na chama de hidrogênio, íons negativos e elétrons são gerados e coletados no anodo, produzindo uma corrente elétrica proporcional a quantidade de massa queimada. A corrente gerada é amplificada por um eletrômetro e transformada em um diferencial de potencial elétrico. No detector a chama é mantida por uma vazão contínua de hidrogênio e ar atmosférico. A resposta do detector depende, portanto, das vazões de hidrogênio, ar e gás de amostra.

O detector utilizado faz parte de um cromatógrafo a gás Varian, modelo 2440, onde a coluna de separação foi retirada fazendo-se com que o gás de amostra escoe continuamente pelo detector. A vazão de hidrogênio era regulada previamente através de uma válvula agulha de precisão e da regulação da pressão de hidrogênio, a qual era mantida constante por um redutor-regulador de pressão. A vazão de H_2 foi calibrada utilizando-se medidor de bôlha de sabão e foi regulada para 30 ml/min, valor recomendado pelo fabricante do cromatógrafo. A vazão de ar foi regulada para 350 ml/min e monitorada continuamente por um rotâmetro. A vazão de gás de amostra utilizada foi 27 ml/min e também monitorada por rotâmetro. A calibração do aparelho foi feita utilizando-se gás padrão propano, com 199 ppmv e nitrogênio como gás de calibração zero. Desde que a resposta do detector e do eletrômetro é linear, uma curva de calibração foi estabelecida através dos pontos de Zero e 199 ppmv. A resposta do detector é proporcional à massa e pode ser expressa em partes por milhão em massa ou em partes por milhão em volume equivalente de propano, que foi o gás de calibração utilizado.

Todos os resultados deste trabalho estão expressos numericamente em ppmv equivalente de propano. As características principais do instrumento utilizado estão apresentados na tabela b.1.

Tabela b.1 Características principais do detector e eletrômetro.

DETETOR	
menor quantidade detectável	$9 \times 10^{-13} \text{ g/s}$
faixa linear	3×10^7
maior quantidade detectável	$2,7 \times 10^{-5} \text{ g/s}$
sensibilidade	0,01 coulomb/g (0,01 Amp.s/g)
ELETRÔMETRO	
faixa dinâmica	1×10^5
máxima sensibilidade	10^{-12} Amp/mV
sensibilidade utilizada	10^{-9} Amp/mV
ruído	$< 10 \mu\text{V}$ à máxima sensibilidade

A calibração foi feita utilizando-se vazão constante do gás de amostra, sendo que esta mesma vazão foi utilizada nas medidas efetuadas. Em algumas ocasiões, a medida de hidrocarbonetos nesta vazão ultrapassava a faixa linear do aparelho, provocando a saturação do eletrômetro. Nesta situação, as medidas foram feitas diminuindo-se a vazão do gás de amostra e corrigindo-se o valor obtido para a vazão correspondente.

A equação de calibração do analisador é a seguinte:

$$HC = \frac{27}{vazao} (A \text{ mv} + B)$$

onde:

HC : concentração de hidrocarbonetos medida (ppm)

vazao : vazão do gás de amostragem (ml/min)

mv : voltagem obtida na saída do eletrômetro (mV)

A e *B* : coeficientes da curva de correlação obtida na calibração.

O cálculo da incerteza na medição de hidrocarbonetos fo feito de acôrdo com o anexo E, utilizando-se as seguintes incertezas de medidas:

vazão de amostra: 0,06 ml/min

padrão 199 ppm; 6 ppm

padrão Zero ppm: 0,5 ppm

voltímetro: 0,004 mV

coeficiente linear do detetor: 0,01

O resultado está apresentado na figura b.1.

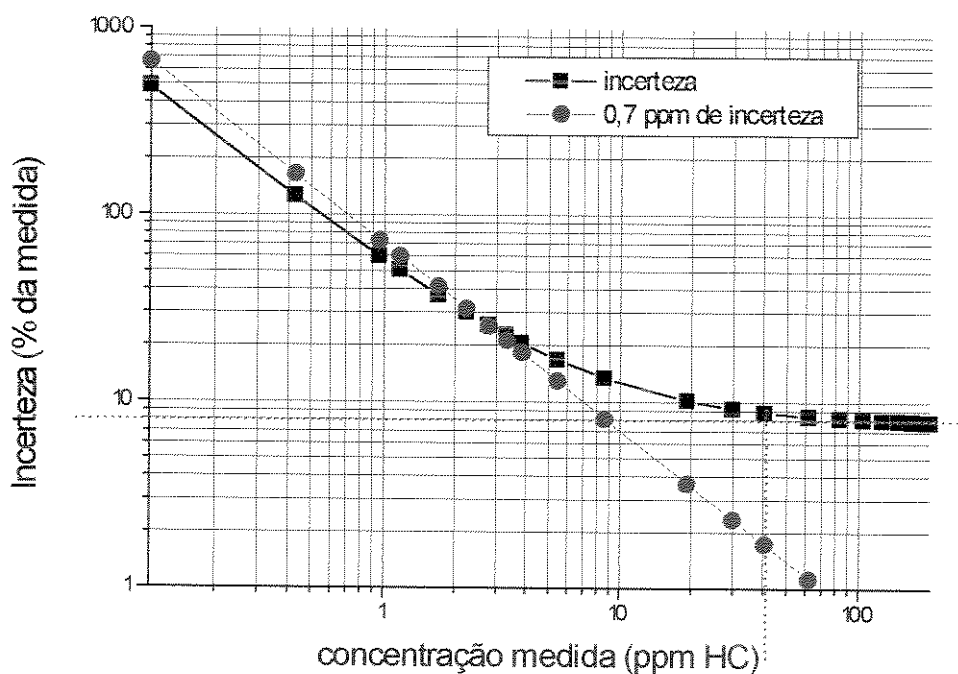


Figura b.1 Incerteza na medição de hidrocarbonetos totais em comparação com uma incerteza constante de 0,7 ppm.

Observa-se que a incerteza no início da escala, partindo de zero ppm, é muito alta, devido a incerteza da concentração de HC no gás padrão Zero. O gráfico permite comparar-se a incerteza calculada com uma curva que fornece incerteza constante de 0,7 ppm. Até o valor medido de 4 ppm, pode-se tomar a incerteza como 0,7 ppm, de 4 a 40 ppm de valor medido, a incerteza varia de 16 a 8% e acima de 40 ppm de leitura, a incerteza é 8% do valor medido.

ANEXO C

Calibração de três tubos de Pitot de 5 furos

INTRODUÇÃO

Tubos de Pitot de 5 furos são sondas que possuem em sua extremidade 5 tomadas de pressão, as quais, através de relacionamento conveniente de suas leituras permite determinar a direção e o módulo da velocidade dos fluidos no escoamento. O formato clássico da sonda, para aplicação em câmaras de combustão é a sonda de cabeça hemisférica, com refrigeração forçada por circulação de água. Esta sonda foi derivada da sonda de cabeça esferoidal, cujo desenvolvimento teórico e método de calibração foi descrito por Lee e Ash (1956), para determinação do escoamento no interior de rotores de máquinas rotativas. Chedaille e Braud (1972), descrevem as sondas para aplicação específica em câmaras de combustão e que foram utilizadas nas pesquisas realizadas no IFRF - International Flame Research Foundation.

Treaster e Yocum (1979), entre outros, descrevem a fabricação e o método de calibração de dois outros tipos de sondas: uma de formato prismático e outra composta por um feixe de 5 tubos cujas extremidades são cortadas por um ângulo de 45° em relação ao seu eixo. Ambas as sondas têm por finalidade a obtenção dos campos de velocidade em máquinas rotativas e não dispõem de refrigeração. Devido às geometrias externas de cada sonda,

hemisférica, prismática ou angular, os métodos de calibração adequados para cada uma delas são diferentes.

Neste trabalho foram construídas e calibradas três sondas para aplicação em câmaras de combustão: duas sondas de formato hemisférico e uma sonda de formato cônico, todas com refrigeração forçada por circulação de água. A sonda de formato cônico é uma derivação do modelo apresentado por Treaster e Yocum (1979), com modificações para permitir a refrigeração à água.

Dois sistemas de referência são comumente utilizados para determinação da direção da velocidade. No primeiro sistema o par de ângulos é constituído pelos ângulos cônico ϕ e diédrico δ , conforme Fig. 1. O segundo sistema é expresso em função dos ângulos horizontal α e vertical β , (em inglês, “yaw” e “pitch”), que são os ângulos formados pelas projeções do vetor velocidade nos planos horizontal e vertical com o eixo da sonda, conforme a Fig. 2. A sonda hemisférica pode utilizar os dois sistemas de referência, enquanto na sonda cônica somente é possível a utilização do par de ângulos horizontal e vertical.

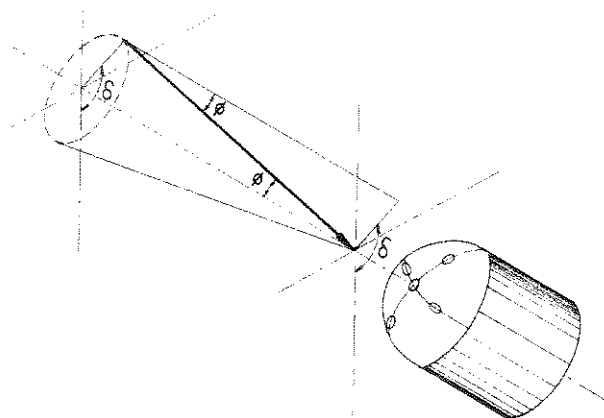


Figura 1 - Sistema de referência com ângulo cônico e ângulo diédrico.

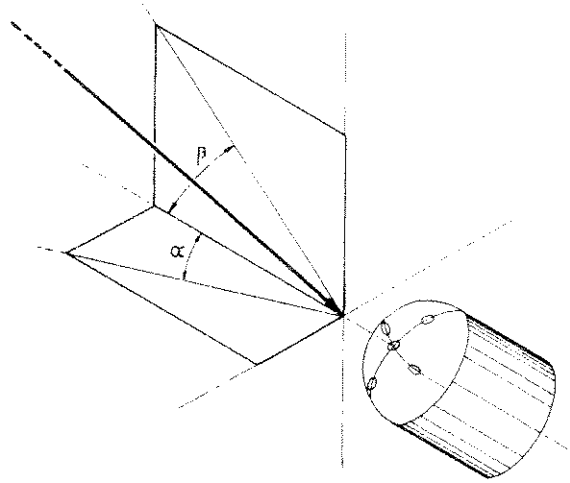


Figura 2 - Sistema de referência com ângulos horizontal e vertical.

c.1 Calibração das sondas hemisféricas

Calibração com o sistema de referência ϕ e δ . Com a aplicação da teoria do escoamento potencial numa esfera, como mostrado por Lee e Ash (1956), é possível calcular a distribuição de pressões sobre a sonda, em que a pressão p_n em um orifício genérico n , situado na superfície da sonda é dado por:

$$p_n = p_s + \frac{1}{2} \rho V^2 \left[1 - \left(\frac{V_n}{V} \right)^2 \right] \quad (1)$$

onde p_s é a pressão estática do escoamento longe da esfera, ρ é a densidade do fluido, V é a velocidade do escoamento longe da esfera e V_n é a velocidade do escoamento no orifício n .

Definindo o fator de recuperação de pressão k_n por:

$$k_n = \left[1 - \left(\frac{V_n}{V} \right)^2 \right] \quad (2)$$

a equação anterior pode ser escrita como:

$$p_n = p_s + k_n \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3)$$

O fator k_n é função do número de Reynolds e do ângulo formado entre o vetor velocidade e o orifício n da sonda. Chedaille e Braud (1972) relatam que, no intervalo onde a maioria das medições normalmente são feitas, para Reynolds entre 100 e 60000, foi verificado experimentalmente que o fator de recuperação de pressão varia muito pouco com o número de Reynolds; entretanto, na vizinhança do ponto de separação da camada limite e após este, k_n não obedece à teoria do escoamento potencial e seu valor precisa ser obtido através de calibração da sonda para cada posição em relação ao vetor velocidade. A rugosidade superficial e fatores construtivos também desviam o comportamento do escoamento em relação ao previsto para o escoamento sobre uma esfera perfeita e sua influência requer, em adição, a necessidade de uma calibração experimental. A calibração da sonda é feita orientando-se a mesma em diferentes posições em relação a um escoamento de velocidade e direção conhecidas, como o que pode ser obtido em um jato livre.

Neste trabalho, foram utilizados três métodos de interpretação dos dados: o método proposto por Lee e Ash (1956), o método utilizado pelo IFRF - International Flame Research Foundation, descrito por Wright (1970) e um terceiro método que utiliza procedimentos de cada um dos métodos anteriores.

Método de Lee e Ash. Combinando as equações que fornecem a pressão em cada um dos cinco orifícios, as seguintes relações podem ser obtidas:

$$\frac{p_1 - p_3}{p_0 - p_3} = \frac{k_1 - k_3}{k_0 - k_3} = X_{133}(\phi, \delta) \quad (4)$$

$$\frac{p_2 - p_4}{p_0 - p_3} = \frac{k_2 - k_4}{k_0 - k_2} = Y_{243}(\phi, \delta) \quad (5)$$

onde k_n é o fator de recuperação de pressão do orifício n , e X_{133} e Y_{243} são parâmetros de calibração em função dos ângulos ϕ e δ .

A determinação da magnitude da velocidade é feita aplicando a equação geral da distribuição de pressão entre o centro da sonda (orifício 0) e qualquer um dos outros quatro orifícios, como, por exemplo o orifício 3:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{p_0 - p_3}{k_0 - k_3}} \quad (6)$$

o fator do ângulo ϕ :

$$k_{\phi} = \sqrt{1 - \frac{\sum_1^4 (p_0 - p_n)}{2\sqrt{\sum_1^4 (p_0 - p_n)^2}}} \quad (7)$$

o fator de velocidade:

$$k_v = \sqrt{\frac{\rho V^2}{\sqrt{\sum_1^4 (p_0 - p_1)^2}}} \quad (8)$$

o fator de pressão estática:

$$k_p = 2 \frac{(p_0 - p_s)}{\rho V^2} \quad (9)$$

A determinação do ângulo δ é feita a partir da relação:

$$\tan \delta = \frac{(p_3 - p_1)}{(p_2 - p_4)} \quad (10)$$

A função tangente permite obtenção de ângulos entre 0 e 90°, sendo que, para determinação do quadrante do ângulo δ medido, deve ser feita uma verificação conveniente de quatro desigualdades, conforme descrito em Wright, 1970.

A análise matemática dos fatores acima, aplicada à teoria do escoamento potencial numa esfera, mostra que k_ϕ é função dos ângulos ϕ e δ , porém, é uma função fraca de δ , de maneira que a influência do ângulo δ na variação do fator k_ϕ pode ser negligenciada (Wright, 1970). O fator k_v é função também dos ângulos ϕ e δ , sendo que, para calibração de ϕ de 0 a 45°, a influência do ângulo δ no valor de k_v também pode ser desprezada, apresentando uma variação de cerca de 2%.

Maior importância tem o comportamento da sonda na determinação do ângulo diédrico δ . Se os dados obtidos para a sonda não apresentar uma correlação conveniente com a Eq. (10), o método em questão não pode ser utilizado. A correlação é mais facilmente obtida conforme a superfície da sonda mais se aproxima da forma geométrica de uma esfera perfeita. Neste trabalho, a primeira sonda hemisférica construída - a sonda nº 1 - não obteve correlação com a Eq. (10), e uma segunda sonda hemisférica - sonda nº 2 - foi construída. Esta segunda sonda, infelizmente foi danificada nos testes iniciais devido a uma falha provável de refrigeração. A cabeça usinada da sonda, bem como os tubos capilares inseridos nos orifícios das cabeças foram soldados por brazagem, com solda prata de ponto de fusão 680 °C. Nos testes iniciais esta solda derreteu-se, provocando o descolamento dos tubos capilares de seus respectivos orifícios e ocasionando protuberâncias na solda circunferencial que liga a cabeça ao corpo principal da sonda.

Para poder utilizar a sonda nº 1 inicial foi utilizado a correlação de Wright, 1970, para determinação do ângulo cônico ϕ o método de Lee e Ash, 1956, para determinação do ângulo diédrico δ .

c.2 Calibração da Sonda Cônica

Ao contrário da sonda de formato hemisférico, não são obtidas expressões analíticas a partir da teoria do escoamento potencial aplicadas a sonda de formato cônico. A geometria

cônica, com mudanças abruptas de contorno, que ocasionam descolamentos do escoamento e maior sensibilidade a efeitos de viscosidade, dificulta um modelamento teórico, que poderia ser utilizado como base para formatar os dados experimentais obtidos para calibração da sonda. Deste modo, a representação dos dados da velocidade e da direção do escoamento é feita a partir de 4 coeficientes adimensionais empíricos, descritos em Treaster e Yocum (1979). Os coeficientes são definidos conforme segue:

$$Cp_{\alpha} = \frac{(p_4 - p_2)}{(p_0 - \bar{P})} \quad (11)$$

$$Cp_{\beta} = \frac{(p_3 - p_1)}{(p_0 - \bar{P})} \quad (12)$$

$$Cp_{total} = \frac{(p_0 - p_{total})}{(p_0 - \bar{P})} \quad (13)$$

$$Cp_{estatica} = \frac{(\bar{P} - P_{estatica})}{(p_0 - \bar{P})} \quad (14)$$

onde:

$$\bar{P} = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4) / 4 \quad (15)$$

Cp_α e Cp_β são os coeficientes que representam as diferenças de pressão nos planos horizontal α e vertical β , Cp_{total} é o coeficiente de pressão total e $Cp_{estatica}$ é o coeficiente de pressão estática.

Devido à normalização das diferenças de pressão com o valor médio das quatro pressões estáticas medidas, estes coeficientes são independentes da velocidade e dependem apenas da direção do escoamento numa faixa limitada de ângulos. O procedimento de calibração é similar ao adotado para a sonda hemisférica, ou seja, num escoamento com direção e velocidade conhecida, posiciona-se a sonda em diversos pares de ângulos α e β , e mede-se a pressão em cada orifício.

c. 3 Descrição do Dispositivo e do Procedimento de Calibração

Um esquema da montagem para calibração é mostrado na Fig. 4. Um jato livre de ar é obtido pelo escoamento através de um duto. Uma calibração prévia do jato é feita relacionando-se a vazão de ar passando pelo duto com a velocidade do jato livre medida através de um tubo de Pitot convencional, em diversos pontos na extremidade do duto, determinando-se uma região onde a velocidade do jato é constante e função apenas da vazão no duto. Para que a direção do escoamento seja conhecida a medição é feita na extremidade de saída do duto onde é sabido que a direção do escoamento é paralela ao eixo axial. A sonda é posicionada em relação ao jato de ar, variando-se convenientemente os pares de ângulos ϕ e δ ou α e β conforme o sistema de referência utilizado. Dois dispositivos de posicionamento foram utilizados: para o sistema de referência ϕ e δ o dispositivo foi especialmente construído para esta finalidade, e para o sistema de referência α e β foi utilizado uma morsa esférica

convencional, normalmente usada como dispositivo de usinagem. Como o dispositivo especial para os ângulos ϕ e δ tinha limitação até 25° no ângulo ϕ , foi estabelecido uma relação matemática de equivalência entre os dois sistemas, permitindo a abrangência de ϕ até 45° com a utilização da morsa esférica. Em cada posição escolhida eram medidas as diferenças de pressão entre o orifício central (nº 0) e os outros quatro orifícios, e o orifício central e a pressão atmosférica. Na calibração com o sistema de referência de ângulo cônico e diédrico, o ângulo ϕ foi variado a cada 5° e o ângulo δ a cada 15° no caso da primeira sonda hemisférica, e 20° na segunda sonda hemisférica. Com o sistema de referência de ângulos horizontal e vertical, α e β foram variados a cada 10° .

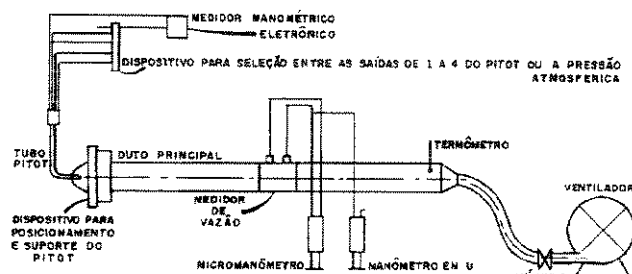


Figura 4 - Esquema da bancada de calibração.

c.4 Apresentação e Análise dos Resultados

São apresentados a seguir os resultados obtidos para as três sondas construídas, tendo-se optado, por facilidade, iniciar a apresentação pela sonda nº 2.

Calibração da Sonda hemisférica n° 2

As figuras 6 e 7 apresentam as curvas de calibração obtidas para a sonda n° 2, segundo o método descrito em Wright (1970), para o coeficiente k_ϕ em função do ângulo ϕ e pela correlação experimental entre o ângulo δ medido e o ângulo δ fornecido a partir da Eq. (10), para todos os pares de ângulos ϕ e δ utilizados. Observa-se que, para a sonda em questão, foi obtida correlação razoável de dados, possibilitando a utilização prática deste método de calibração. A Fig. 8 apresenta o comportamento do coeficiente de velocidade K_v , para cada ângulo δ medido. A dispersão do coeficiente K_v aumenta muito com o ângulo ϕ e não apresenta um comportamento muito homogêneo em relação ao ângulo δ . Mesmo assim, dentro de uma variação aproximada de 7%, é possível a utilização deste coeficiente para determinação da grandeza da velocidade, conhecido o ângulo ϕ .

A Fig. 9 apresenta os valores obtidos para os coeficientes Cp_α e Cp_β para a sonda hemisférica no intervalo de -30 a $+30^\circ$ dos ângulos α e β . A aplicação deste método também apresenta boa correlação, diminuindo a precisão quando os ângulos se aproximam dos limites de -30 e $+30^\circ$. As Fig. 10 e Fig. 11 apresentam as curvas dos coeficientes de pressão total e estática em função dos ângulos α e β .

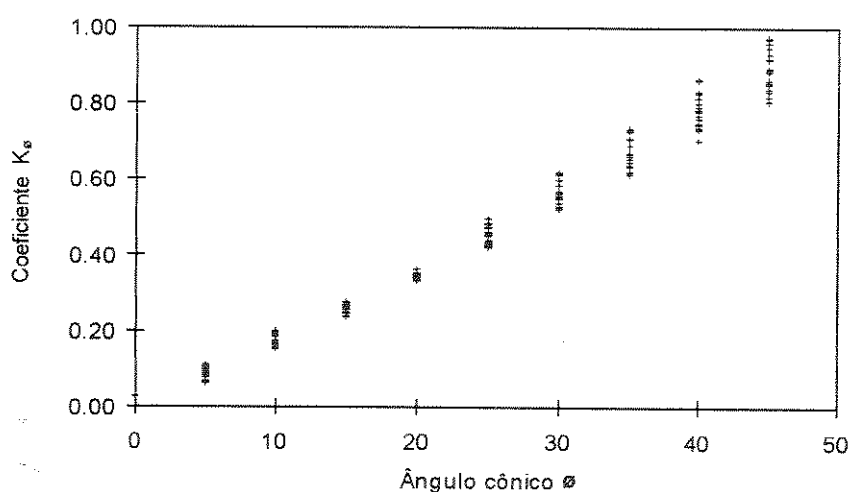


Figura 6 - Coeficiente k_ϕ em função do ângulo cônico ϕ , para a sonda hemisférica n° 2.

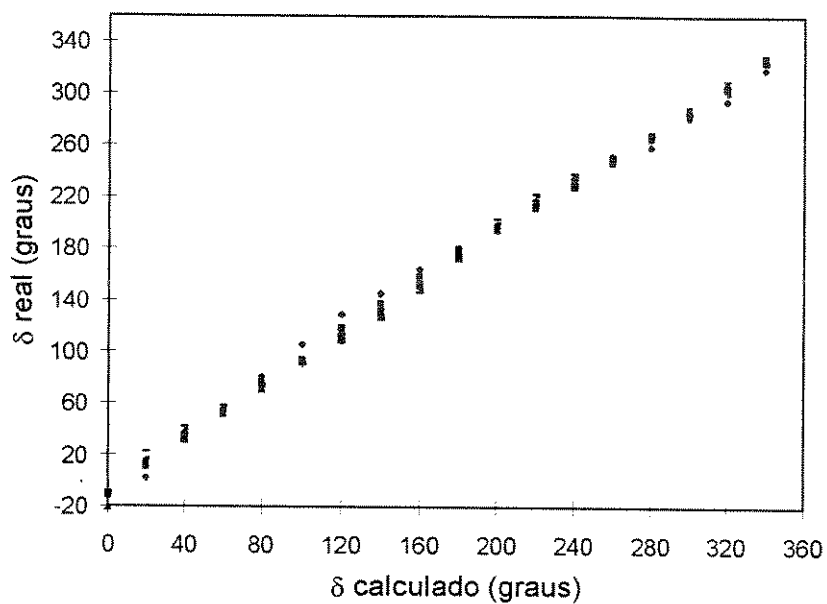


Figura 7 - Correlação experimental entre o ângulo δ real e o ângulo δ determinado pela relação teórica.

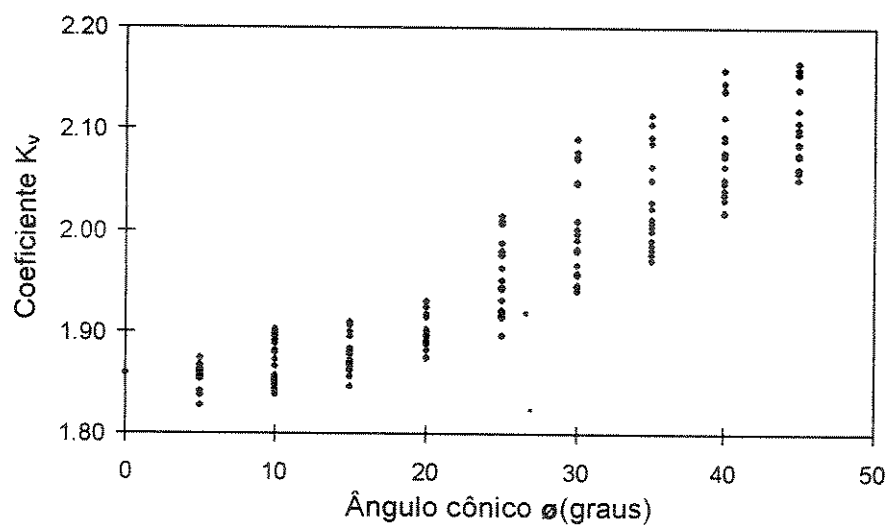


Figura 8 - Correlação experimental do coeficiente de velocidade K_v , para a sonda hemisférica.

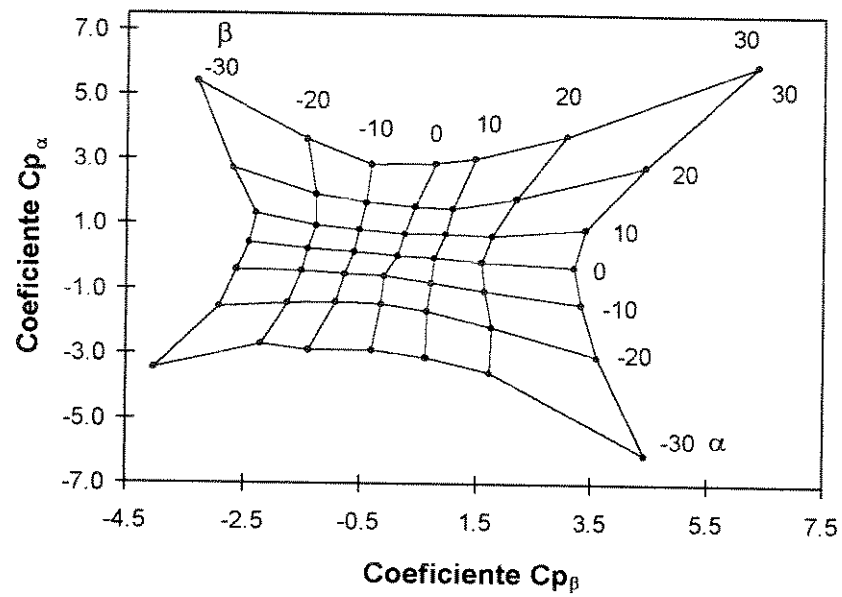


Figura 9 - Gráfico de correlação dos coeficientes Cp_α e Cp_β para determinação dos ângulos α e β , para a sonda hemisférica.

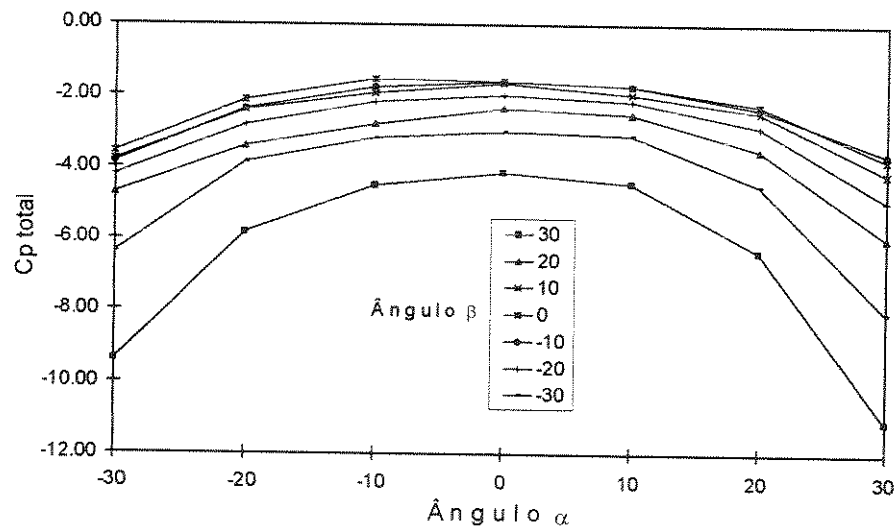


Figura 10 - Coeficientes de pressão total para a sonda hemisférica.

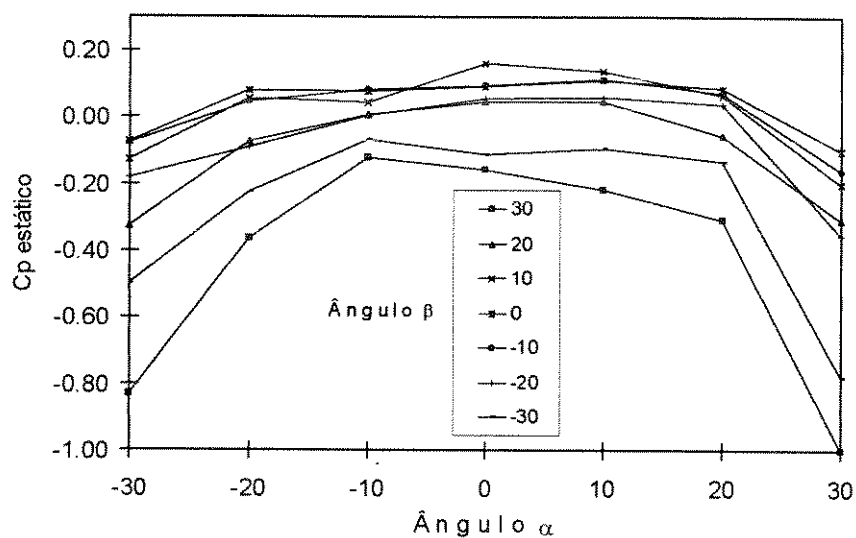


Figura 11 - Coeficientes de pressão estática para a sonda hemisférica.

Calibração da sonda cônica

A Fig. 12, apresenta os resultados da calibração da sonda cônica, no intervalo de -20 a +20°. Embora tenham sido feitas medições até o intervalo de -40 a +40° para esta sonda, os resultados obtidos acima de 20° apresentaram grande dispersão de valores, impossibilitando a utilização da sonda em ângulos maiores do que 20°. As Fig. 13 e Fig. 14 apresentam as curvas de calibração para os coeficientes de pressão total e pressão estática para a sonda cônica.

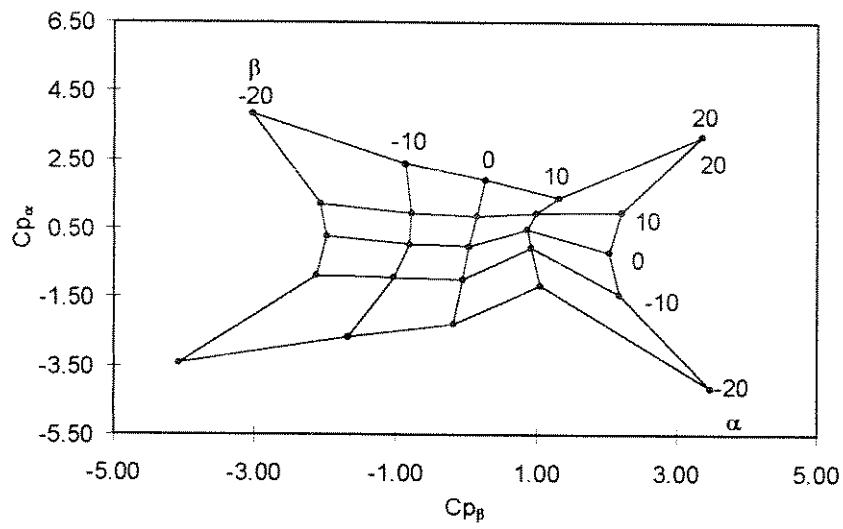


Figura 12 - Correlação dos coeficientes de pressão em relação aos ângulos α e β para a sonda cônica.

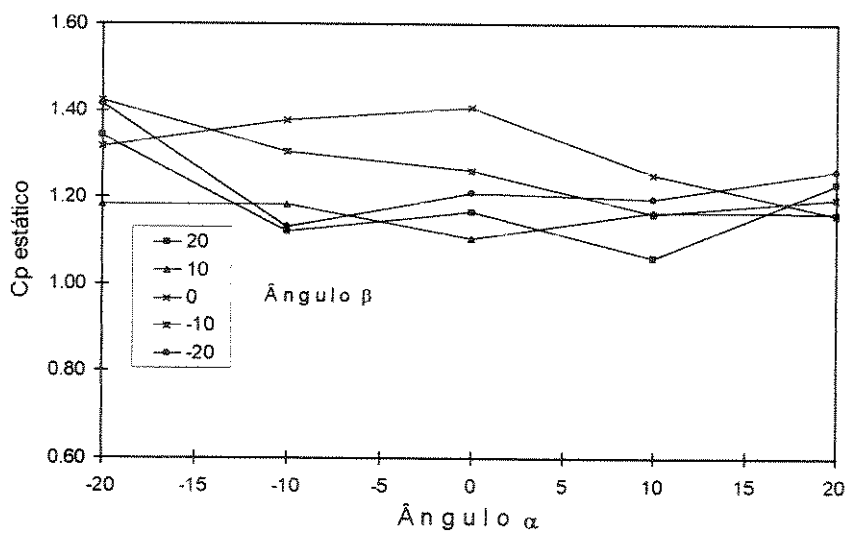


Figura 13 - Coeficientes de pressão estática para a sonda cônica.

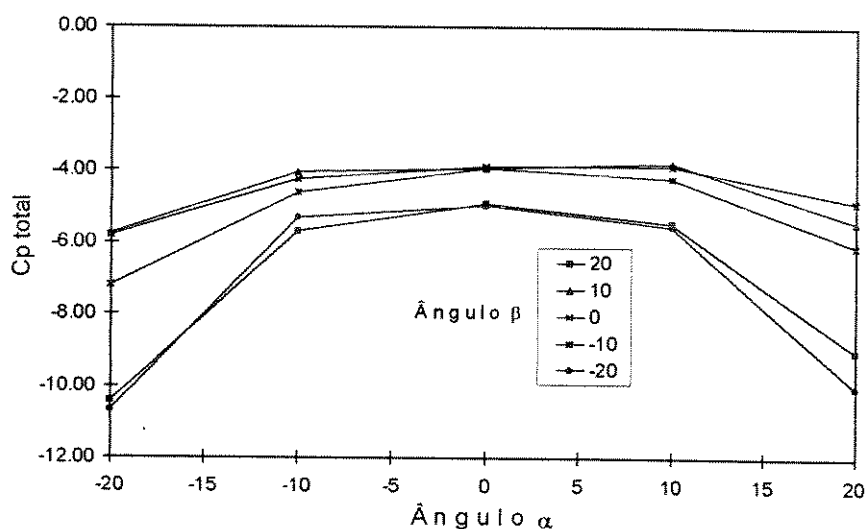


Figura 14 - Correlação para os coeficientes de pressão total, para a sonda cônica.

Calibração da Sonda Hemisférica nº 1

A sonda nº 1 tinha inicialmente tido sua utilização descartada pois não apresentou boa correlação entre os dados obtidos em bancada e a equação 10. Devido à inutilização acidental da sonda nº 2, a sonda anterior foi aproveitada pela utilização alternativa do método de Lee e Ash para determinação do ângulo δ . O ângulo ϕ foi calibrado, por sua vez, utilizando-se a equação 7 proposta por Wright. A Figura 15 apresenta a correlação para o ângulo ϕ , e a Figura 16 apresenta a correlação para o coeficiente de velocidade k_v . As Figuras 17 e 18 apresentam os gráficos para determinação do ângulo δ .

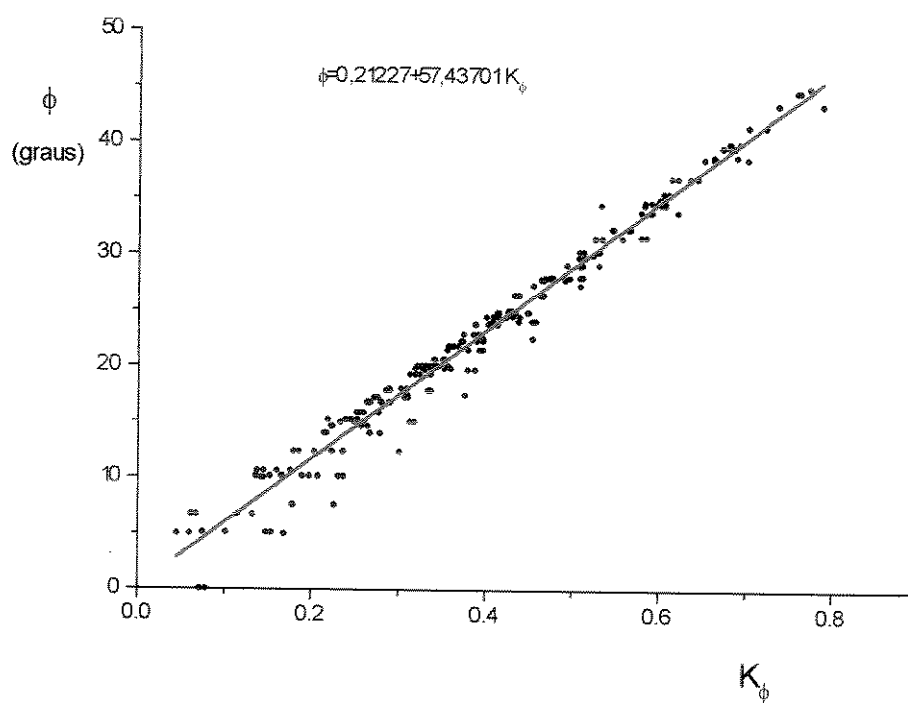


Figura 15. Correlação para determinação do angulo ϕ para a sonda n° 1.

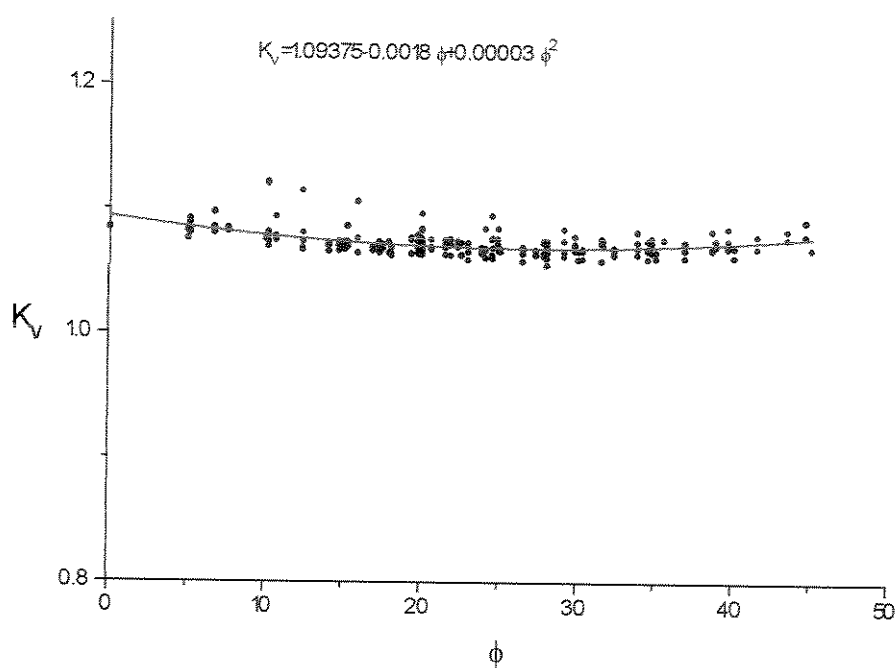


Figura 16. Correlação para determinação do coeficiente k_v para a sonda n° 1

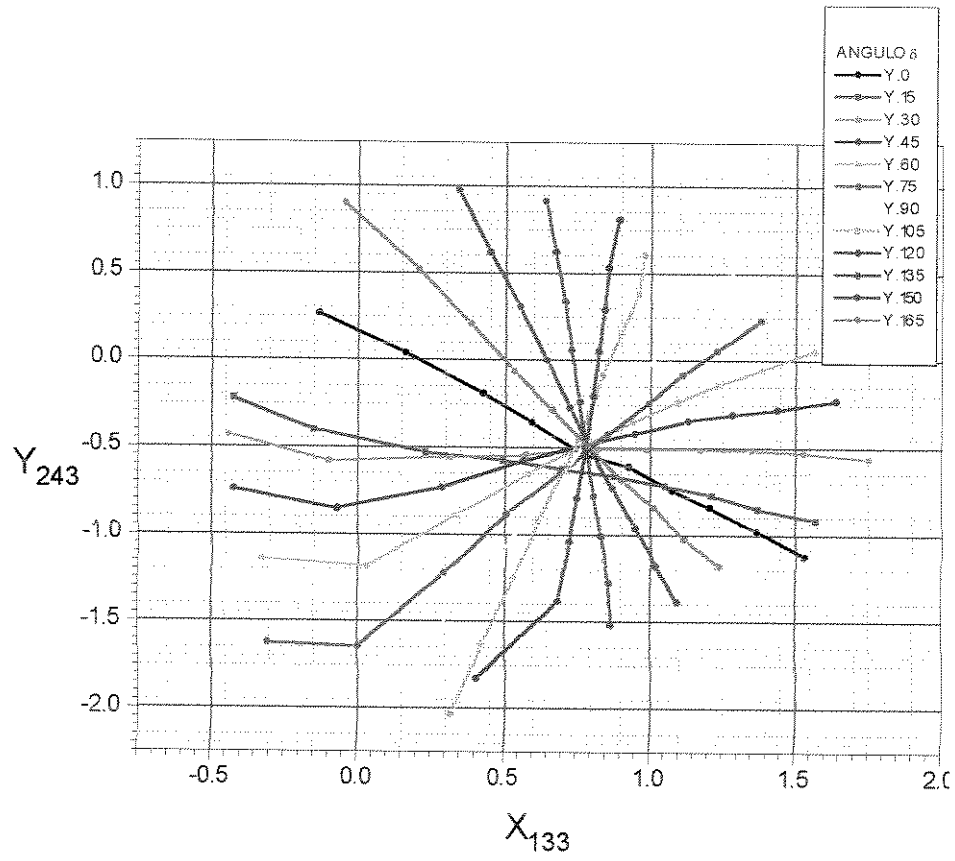


Figura 17. Gráfico para determinação do ângulo δ para a sonda n° 1, na faixa de 0 a 180°.

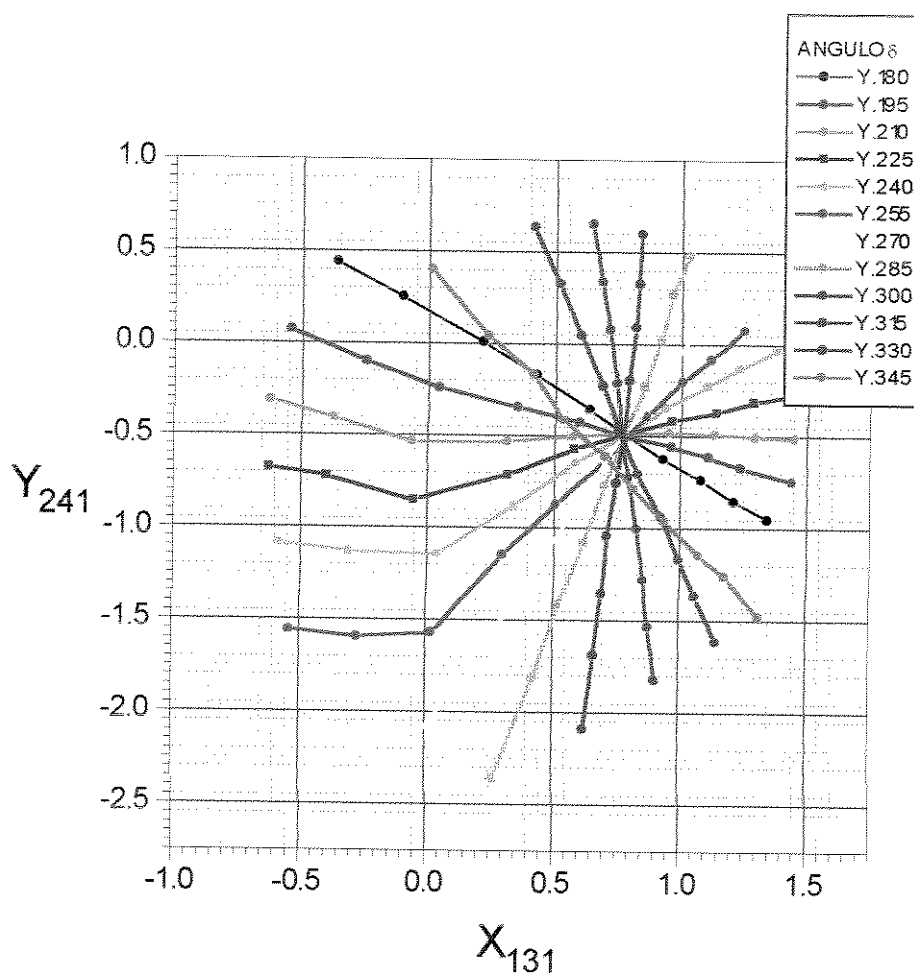


Figura 18. Gráfico para determinação do ângulo δ para a sonda nº 1, na faixa de 180 a 360°.

ANEXO D

Dados Experimentais

Neste anexo estão apresentados os dados experimentais obtidos. Cada conjunto de dados, referente a uma condição de operação, compõe-se de três ou mais tabelas.

A primeira tabela do conjunto apresenta os dados de operação da câmara de combustão: vazões de ar, GLP e tolueno, temperaturas, etc. A segunda tabela apresenta os resultados dos cálculos estequiométricos: excesso de ar, composição dos gases de saída, tempo de residência médio e potência específica da câmara. A terceira tabela do conjunto apresenta os dados experimentais das variáveis medidas na respectiva condição de operação. As tabelas estão apresentadas na mesma ordem da apresentação de dados do cap. 5 e estão referenciadas às respectivas figuras deste capítulo. Estão apresentados somente os dados que foram aproveitados neste trabalho.

Os seguintes conjuntos de dados estão a seguir:

- medidas de concentração de CO e HC na saída da câmara, para 4 condições de operação;
- medidas do campo de velocidades para dois números de rotação;
- distribuição de temperaturas no interior da câmara para três números de rotação;
- distribuição da concentração de HC e CO no interior da câmara para dois números de rotação

Condição de testes nº 10

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				condição nº: 10						
	Unidade									
Teste	[n°]		101	102	103	104	105	106	107	108
		MÉDIA								
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]		100	100	100	100	100	100	100	100
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	302.37	302.37	302.37	302.37	302.37	302.37	302.37	302.37	302.37
Vazão de GLP	[Nm³/h]		6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
Vazão de GLP	[kg/h]	12.98	12.98	12.98	12.98	12.98	12.98	12.98	12.98	12.98
Vazão de Tolueno	[escala]		-	-	-	-	-	-	-	-
Vazão de Tolueno	[kg/h]	0.00	0	0	0	0	0	0	0	0
N° Rotação da Mistura	[posição]		7	9	12	15	17	19	21	23
N° Rotação da Mistura	[valor]		0.364	0.488	0.684	0.887	1.027	1.170	1.315	1.463
Vazão de água	[mmHg]		475	560	440	440	455	450	450	440
Vazão de água	[kg/h]	70.27	71.12	76.94	68.58	68.58	69.68	69.32	69.32	68.58
Temperaturas										
Gases na saída da câmara	[°C]	848.13	855	845	850	845	845	850	850	845
Ar de combustão	[°C]		42	42	42	42	42	42	42	42
Pressão GLP	[mmCA]		605	605	605	605	605	605	605	605
Pressão GLP	[kPa]		5.92	5.92	5.92	5.92	5.92	5.92	5.92	5.92

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Específica			
					ao PCS	ao PCI	
GLP (kg/h)	12.98	Tsaída	848.13	GLP	165.437776	165.437776	
Tolueno(kg/h)	0.00	T resid. (s)	1.10	Tolueno	0	0	
Água(kg/h)	70.27	O2 medido	6.91 %	Água	-60.6909264		
Ar(kg/h)	302.37	conc. Toluer	0.00	kW	165.437776	104.74685	
total	385.61	Excesso de ar:	00.533	kW/m3	477.591732	302.386979	
Ar estequiométrico(kg/h):	197.2656				ao PCS	ao PCI	
Composição do gases							
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)	Calibração HC totais			
O2	00.077	00.051	0.3478506	Zero ppm	0,019 mV		
CO2	00.091	00.060	0.47829457	199 ppm	1.896 mV		
H2O	00.000	00.333	0.19566596				
N2	00.832	00.555	0.30436927				
	1	1	0.28089779				

Condição de testes nº 10 - Dados experimentais referentes à Fig. 5.1.
Medidas de Concentração de CO (ppm) na saída da câmara

Teste nº	Nº Rotação	Tempo (s)						Média
		0	10	20	30	40	50	[ppm]
101	0,36	2	2	1	2	2	1	1,67
102	0,49	18	20	21	18	18	20	19,17
103	0,68	33	32	35	35	32	35	33,67
104	0,89	17	16	16	17	17	16	16,50
105	1,03	13	13	13	15	15	15	14,00
106	1,17	12	12	13	13	13	12	12,50
107	1,32	8	8	8	10	10	10	9,00
108	1,46	8	8	7	7	7	7	7,33

Medidas de Concentração de HC totais (mV) na saída da câmara

	Nº Rotação	Tempo (s)						Média	Média
		0	10	20	30	40	50	[mV]	[ppm]
101	0,36	0,018	0,019	0,019	0,018	0,019	0,019	0,019	0,198
102	0,49	0,016	0,016	0,017	0,017	0,017	0,018	0,017	0,003
103	0,68	0,020	0,021	0,021	0,020	0,021	0,021	0,021	0,409
104	0,89	0,020	0,021	0,020	0,019	0,018	0,020	0,020	0,304
105	1,03	0,021	0,019	0,020	0,020	0,021	0,020	0,020	0,356
106	1,17	0,020	0,019	0,018	0,019	0,020	0,020	0,019	0,268
107	1,32	0,019	0,018	0,019	0,019	0,018	0,020	0,019	0,215
108	1,46	0,019	0,019	0,020	0,019	0,018	0,020	0,019	0,251

Condição de testes nº 11

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS					Condição nº		11			
	Unidade									
Teste	[n°]		111	112	113	114	115	116	117	118
		MÉDIA								
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]		115	115	115	115	115	115	115	115
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94
Vazão de GLP	[Nm³/h]		5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3
Vazão de GLP	[kg/h]	10.92	10.92	10.92	10.92	10.92	10.92	10.92	10.92	10.92
Vazão de Tolueno	[escala]		30	30	30	30	30	30	30	30
Vazão de Tolueno	[kg/h]	4.65	4.65							
N° Rotação da Mistura	[posição]		7	9	12	15	17	19	21	23
N° Rotação da Mistura	[valor]		0.364	0.488	0.684	0.887	1.027	1.170	1.315	1.463
Vazão de água	[mmHg]		650	650	650	650	650	650	650	650
Vazão de água	[kg/h]	82.88	82.88	82.88	82.88	82.88	82.88	82.88	82.88	82.88
Temperaturas										
Gases na saída da câmara	[°C]	844.75	845	845	843	843	850	845	847	840
Ar de combustão	[°C]		42	42	42	42	42	42	42	42
Pressão GLP	[mmCA]		630	630	630	630	630	630	630	630
Pressão GLP	[kPa]		6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17	6.17

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Especifica		
				ao PCS		ao PCI
GLP (kg/h)	10.92	Tsaída	844.75	GLP	139.177812	139.177812
Tolueno(kg/h)	4.65	T resid. (s)	1.21	Tolueno	55.3347417	55.3347417
água(kg/h)	82.88	O2 medido	6.38 %	Água		-69.6292471
Ar(kg/h)	323.94	conc. Toluer	0.30	kW	194.512553	124.883306
total	422.38	Excesso de ar:	00.418	kW/m3	561.525846	360.517627
Ar estequiométrico(kg/h):	228.4031			ao PCS		ao PCI
Composição do gases						
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)	Calibração HC totais		
O2	00.065	00.042	0.34890092	Zero ppm	0,019 mV	
CO2	00.104	00.068	0.47973876	199 ppm	1,896 mV	
H2O	00.000	00.348	0.19625677			
N2	00.831	00.542	0.3052883			
	1	1	0.28102923			

Condição de testes nº 11 - Dados experimentais referentes à Fig. 5.2.
Medidas de Concentração de CO (ppm) na saída da câmara

Teste nº	Nº Rotação	Tempo (s)						Média
		0	10	20	30	40	50	
111	0,36	345	362	375	380	368	374	305,00
112	0,49	136	160	187	194	205	227	184,83
113	0,68	26	26	27	27	30	27	27,17
114	0,89	22	31	29	27	27	26	27,00
115	1,03	16	16	16	18	20	20	17,67
116	1,17	17	20	22	20	22	25	21,00
117	1,32	17	17	19	21	21	21	19,33
118	1,46	15	15	15	16	16	16	15,50

Medidas de Concentração de HC totais (mV) na saída da câmara

Teste nº	Nº Rotação	Tempo (s)						Média	Média
		0	10	20	30	40	50	[mV]	[ppm]
111	0,36	0,080	0,081	0,084	0,082	0,078	0,075	0,08	6,4676
112	0,49	0,055	0,056	0,056	0,056	0,058	0,058	0,06	3,97613
113	0,68	0,027	0,028	0,030	0,028	0,028	0,030	0,03	1,00757
114	0,89	0,028	0,030	0,028	0,029	0,030	0,029	0,03	1,06058
115	1,03	0,027	0,026	0,030	0,027	0,030	0,030	0,03	0,9899
116	1,17	0,025	0,030	0,027	0,026	0,030	0,028	0,03	0,91922
117	1,32	0,024	0,025	0,026	0,027	0,027	0,025	0,03	0,70718
118	1,46	0,025	0,025	0,024	0,023	0,026	0,026	0,02	0,61883

Condição de testes nº 12

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				Condição nº 12						
	Unidade									
Teste	[nº]		121	122	123	124	125	126	127	128
		MÉDIA								
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]		115	115	115	115	115	115	115	115
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94	323.94
Vazão de GLP	[Nm³/h]		4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6
Vazão de GLP	[kg/h]	9.48	9.48	9.48	9.48	9.48	9.48	9.48	9.48	9.48
Vazão de Tolueno	[escala]		40	40	40	40	40	40	40	40
Vazão de Tolueno	[kg/h]	6.18	6.18							
Nº Rotação da Mistura	[posição]		7	9	12	15	17	19	21	23
Nº Rotação da Mistura	[valor]		0.364	0.488	0.684	0.887	1.027	1.170	1.315	1.463
Vazão de água	[mmHg]		700	700	700	700	700	700	700	700
Vazão de água	[kg/h]	86.16	86.16	86.16	86.16	86.16	86.16	86.16	86.16	86.16
Temperaturas										
Gases na saída da câmara	[°C]	842.50	840	845	850	840	840	845	840	840
Ar de combustão	[°C]		42	42	42	42	42	42	42	42
Pressão GLP	[mmCA]		645	645	645	645	645	645	645	645
Pressão GLP	[kPa]		6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31	6.31

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Especifica	
				ao PCS	ao PCI
GLP (kg/h)	9.48	Tsaída	842.50	GLP	120.795836
Tolueno(kg/h)	6.18	T resid. (s)	1.21	Tolueno	73.5416567
água(kg/h)	86.16	O2 medido	6.34 %	Água	-71.2143206
Ar(kg/h)	323.94	conc. Toluer	0.39	kW	194.337493
total	425.76	Excesso de ar:	00.427	kW/m3	561.020477
Ar estequiométrico(kg/h):	227.0326				
				ao PCS	ao PCI
Composição do gases					
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)	Calibração HC totais	
O2	00.066	00.043	0.34960466	Zero ppm	0,019 mV
CO2	00.105	00.068	0.48070641	199 ppm	1,895 mV
H2O	00.000	00.353	0.19665262		
N2	00.829	00.536	0.30590408		
	1	1	0.28116282		

Condição de Testes nº 12 - Dados experimentais referentes à Fig. 5.3.

Medidas de Concentração de CO (ppm) na saída da câmara

Teste nº	Nº Rotação	Tempo (s)						Média
		0	10	20	30	40	50	
121	0,36	508	515	512	511	510	507	426,00
122	0,49	287	294	299	311	325	320	306,00
123	0,68	122	114	111	112	105	121	114,17
124	0,89	140	139	138	137	140	145	139,83
125	1,03	15	11	9	9	8	9	10,17
126	1,17	12	13	13	14	14	13	13,17
127	1,32	11	12	11	11	12	11	11,33
128	1,46	21	26	27	25	26	26	25,17

Medidas de Concentração de HC totais (mV) na saída da câmara

Teste nº	Nº Rotação	Tempo (s)						Média	
		0	10	20	30	40	50	[mV]	[ppm]
121	0,36	0,073	0,067	0,067	0,067	0,070	0,071	0,07	5,32
122	0,49	0,057	0,059	0,060	0,060	0,069	0,062	0,06	4,47
123	0,68	0,030	0,031	0,031	0,033	0,032	0,033	0,03	1,34
124	0,89	0,023	0,023	0,024	0,025	0,021	0,023	0,02	0,44
125	1,03	0,021	0,021	0,023	0,024	0,023	0,021	0,02	0,34
126	1,17	0,019	0,019	0,020	0,021	0,020	0,021	0,02	0,11
127	1,32	0,023	0,023	0,025	0,026	0,027	0,025	0,02	0,62
128	1,46	0,023	0,023	0,023	0,025	0,023	0,025	0,02	0,50

Condição de testes nº 7

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				Condição nº 7						
	Unidade									
Teste	[n°]		71	72	73	74	75	76	77	78
		MÉDIA								
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]		95	95	95	95	95	95	95	95
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	294.82	294.82	294.82	294.82	294.82	294.82	294.82	294.82	294.82
Vazão de GLP	[Nm³/h]		6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
Vazão de GLP	[kg/h]	11.82	12.36	11.74	11.74	11.74	11.74	11.74	11.74	11.74
Vazão de Tolueno	[escala]		32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	32.5
Vazão de Tolueno	[kg/h]	5.00	0							
N° Rotação da Mistura	[posição]		7	9	12	15	17	19	21	23
N° Rotação da Mistura	[valor]		0.364	0.488	0.684	0.887	1.027	1.170	1.315	1.463
Vazão de água	[mmHg]		1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010	1010
Vazão de água	[kg/h]	106.19	106.19	106.19	106.19	106.19	106.19	106.19	106.19	106.19
Temperaturas										
Gases na saída da câmara	[°C]	846.88	865	835	845	855	850	845	830	850
Ar de combustão	[°C]		38	38	38	38	38	38	38	38
Pressão GLP	[mmCA]		630	620	620	620	620	620	620	620
Pressão GLP	[kPa]		6.17	6.07	6.07	6.07	6.07	6.07	6.07	6.07

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Especifica		
				ao PCS	ao PCI	
GLP (kg/h)	11.82	Tsaída	846.88	GLP	150.666546	150.666546
Tolueno(kg/h)	5.00	T resid. (s)	1.23	Tolueno	59.4997222	59.4997222
água(kg/h)	106.19	O2 medido	2.43	Água		-86.5236143
Ar(kg/h)	294.82	conc. Tolueno	0.30	kW	210.166268	123.642654
total	417.82	Excesso de ar:	00.195	kW/m3	606.715555	356.936068
Ar estequiométrico(kg/h):	246.8026			ao PCS		ao PCI
Composição do gases						
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)	Calibração HC totais		
O2	00.036	00.021	0.348238866	Zero ppm	0,019 mV	
CO2	00.125	00.072	0.478828441	199 ppm	1,893 mV	
H2O	00.000	00.424	0.195884362			
N2	00.839	00.483	0.304709008			
	1	1	0.271993243			

Condição de Teste nº 7 - Dados experimentais referentes à Fig. 5.6.
Medidas de Concentração de CO (ppm)

Teste nº	Nº Rotação	Tempo (s)						Média
		0	10	20	30	40	50	
71	0,36	1496	1531	1644	1441	1419	1373	1255,17
72	0,49	1592	1457	1199	1010	799	1842	1316,50
73	0,68	1806	1614	1797	2068	2000	1925	1868,33
74	0,89	2299	2261	2489	2082	2816	2408	2392,50
75	1,03	1077	1153	705	705	855	1007	917,00
76	1,17	2829	1986	1735	862	3474	4100	2497,67
77	1,32	2274	2056	1232	857	2176	4350	2157,50
78	1,46	803	829	1519	1669	1876	3357	1675,50

Medidas de Concentração de HC totais (mV) na saída da câmara

Teste nº	Nº Rotação	Tempo (s)						Média	
		0	10	20	30	40	50	[mV]	[ppm]
71	0,36	0,297	0,303	0,296	0,321	0,362	0,330	0,32	31,72
72	0,49	0,164	0,151	0,152	0,159	0,177	0,204	0,17	15,78
73	0,68	0,258	0,264	0,243	0,234	0,211	0,200	0,24	22,90
74	0,89	0,401	0,477	0,456	0,410	0,563	0,461	0,46	46,90
75	1,03	0,159	0,151	0,127	0,090	0,069	0,063	0,11	9,63
76	1,17	0,212	0,276	0,346	0,232	0,227	0,247	0,26	25,20
77	1,32	0,603	0,510	0,906	1,251	0,771	0,868	0,82	84,73
78	1,46	0,396	0,570	0,454	0,770	0,770	0,573	0,59	60,41

Condição de testes nº 17

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				Condição nº 17	
	Unidade				
Teste	[n°]	171			
	MÉDIA				
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]	115			
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	323.94	323.94		
Vazão de GLP	[Nm³/h]	6.3			
Vazão de GLP	[kg/h]	12.98	12.98		
Vazão de Tolueno:	[escala]	0			
Vazão de Tolueno:	[kg/h]	0.00	0		
N° Rotação da Mistura	[posição]	19			
N° Rotação da Mistura	[valor]	1.170			
Vazão de água	[mmHg]	440			
Vazão de água	[kg/h]	68.58	68.58		
Temperaturas					
Gases na saída da câmara	[°C]	845.00	845		
Ar de combustão	[°C]	41			
Pressão GLP	[mmCA]	620			
Pressão GLP	[kPa]	6.07			

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Especifica	
				ao PCS	ao PCI
GLP (kg/h)	12.98	Tsaída	845.00	GLP	165.437776
Tolueno(kg/h)	0.00	T resid. (s)	1.15	Tolueno	0
água(kg/h)	68.58	O2 medido		Água	-59.5506711
Ar(kg/h)	323.94	conc. Toluer	0.00	kW	165.437776
total	405.50	Excesso de ar:	00.642	kW/m3	477.591732
Ar estequiométrico(kg/h):	197.2656			ao PCS	ao PCI
Composição do gases					
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)		
O2	00.086	00.059	0.3488229		
CO2	00.084	00.058	0.47963148		
H2O	00.000	00.313	0.19621288		
N2	00.829	00.570	0.30522004		
	1	1	0.2837647		

Condição de Teste nº 17 - Dados experimentais referentes à Fig. 5.11.
Distribuição de velocidades no interior da câmara.

X(mm)	R(mm)	angulo (graus)	P0-P1 (mmCA)	P0-P2 (mmCA)	P0-P3 (mmCA)	P0-P4 (mmCA)	Kfi	Fi(graus)	T(°C)	dens. (kg/m3)	Kv	V(m/s)
2610	30	0	0.18	0.18	0.05	0.02	0.417	24.150	1000.00	0.24	1.051	1.094
2610	70	0	0.18	0.18	0.03	0.02	0.450	26.068	1000.00	0.24	1.048	1.084
2610	110	0	0.12	0.18	0.03	0.03	0.428	24.817	1000.00	0.24	1.050	1.006
2610	150	0	0.18	0.15	0.02	0.03	0.446	25.805	1000.00	0.24	1.048	1.042
2610	180	0	0.17	0.17	-0.01	0.07	0.449	26.021	1000.00	0.24	1.048	1.071
2610	210	0	0.23	0.18	0	0.02	0.515	29.812	1000.00	0.24	1.041	1.150
2610	235	0	0.2	0.15	-0.04	0.07	0.526	30.424	1000.00	0.24	1.040	1.088
2185	30	0	0.1	0.17	-0.03	-0.1	0.828	47.796	1000.00	0.24	1.009	0.973
2185	70	0	0.12	0.15	-0.07	-0.1	0.883	50.949	1000.00	0.24	1.004	0.977
2185	110	0	0.1	0.1	-0.1	-0.09	0.987	56.909	1000.00	0.24	0.993	0.896
2185	150	0	0.04	0.02	-0.06	-0.06	1.146	66.021	1000.00	0.24	0.977	0.618
2185	210	0	0.08	0.02	0.02	0.02	0.444	25.708	1000.00	0.24	1.048	0.632
2185	235	0	0.08	0.05	0.02	0.05	0.282	16.399	1000.00	0.24	1.065	0.716
1970	30	170	0.06	0.16	0.05	0.09	0.313	18.169	1000.00	0.24	1.062	0.968
1970	70	170	0.15	0.14	0.08	0.09	0.182	10.684	1000.00	0.24	1.075	1.070
1970	110	180	0.1	0.1	0.03	-0.02	0.530	30.635	1000.00	0.24	1.040	0.811
1970	150	0	0.12	0.07	0.02	0.08	0.320	18.599	1000.00	0.24	1.061	0.870
1970	210	0	0.12	0.03	0.06	0.8	0.615	35.519	1000.00	0.24	1.031	1.896
1970	235	0	0.11	0.06	0.09	0.6	0.553	31.980	1000.00	0.24	1.037	1.666
1850	30	0	0.2	1.75	-0.1	-0.11	0.713	41.143	1000.00	0.24	1.021	2.771
1850	70	170	0.02	1.5	-0.09	-0.09	0.745	43.001	1000.00	0.24	1.018	2.549
1850	110	180	0.21	1.3	-0.06	-0.06	0.688	39.728	1000.00	0.24	1.023	2.400
1850	150	180	1.01	1.83	-0.05	-0.08	0.594	34.309	1000.00	0.24	1.033	3.050
1850	180	180	-0.07	1.6	-0.04	-0.06	0.744	42.963	1000.00	0.24	1.018	2.630
1850	210	180	-0.05	1.7	0.75	0.1	0.573	33.131	1000.00	0.24	1.035	2.883
1850	235	180	1.04	-0.9	-0.15	-0.08	1.016	58.574	1000.00	0.24	0.990	2.379
1590	30	0	0.25	0.4	0.1	0.3	0.275	15.997	1000.00	0.24	1.065	1.639
1590	70	90	-0.12	0.02	0.08	0.25	0.776	44.795	1000.00	0.24	1.014	1.114
1590	110	90	1.72	0.11	0.11	1.7	0.499	28.872	1000.00	0.24	1.043	3.313
1590	150	90	0.13	0.17	0	2.5	0.665	38.400	1000.00	0.24	1.026	3.317
1590	180	90	0.02	0.05	-0.13	0.47	0.763	44.036	1000.00	0.24	1.016	1.452
1470	30	0	0.38	0.6	0.31	0.02	0.394	22.828	1000.00	0.24	1.053	1.893
1470	70	90	0.05	0.05	0.05	-0.05	0.707	40.826	1000.00	0.24	1.021	0.659
1470	110	90	0.15	0.1	-0.13	-0.05	0.920	53.053	1000.00	0.24	1.000	0.974
1470	180	180	0	-0.24	0.08	0.23	0.947	54.630	1000.00	0.24	0.997	1.190
1470	210	180	0.15	-0.04	0.06	0.23	0.544	31.437	1000.00	0.24	1.038	1.129
1470	235	180	0.22	0.03	-0.06	0.09	0.658	38.014	1000.00	0.24	1.026	1.041
1360	30	0	0.49	0.75	0.43	0.1	0.337	19.596	1000.00	0.24	1.059	2.160
1360	110	180	0.06	-0.15	0.1	0.15	0.818	47.210	1000.00	0.24	1.010	1.015
1360	150	180	0.08	-0.12	0.18	0.35	0.645	37.236	1000.00	0.24	1.028	1.358
1360	180	180	0.23	0	0.04	0.33	0.508	29.378	1000.00	0.24	1.042	1.352
1360	210	180	0.24	-0.01	-0.02	0.19	0.590	34.113	1000.00	0.24	1.033	1.169
1245	30	0	0.65	0.73	0.55	0.4	0.147	8.660	1000.00	0.24	1.078	2.402
1245	110	0	-0.06	0.04	0.05	0.02	0.850	49.024	1000.00	0.24	1.007	0.617
1245	150	0	0.01	0.01	0.03	-0.01	0.650	37.553	1000.00	0.24	1.027	0.390
1245	180	180	0.24	0.29	-0.03	0.19	0.429	24.842	1000.00	0.24	1.050	1.393
1245	210	180	0.12	-0.8	-0.05	-0.08	1.224	70.494	1000.00	0.24	0.969	1.785

Condição de testes nº 19

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				Condição nº	19
	Unidade				
Teste	[n°]	191			
		MÉDIA			
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]	115			
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	323.94	323.94		
Vazão de GLP	[Nm³/h]	6.3			
Vazão de GLP	[kg/h]	12.98	12.98		
Vazão de Tolueno	[escala]	0			
Vazão de Tolueno	[kg/h]	0.00	0		
N° Rotação da Mistura	[posição]	23			
N° Rotação da Mistura	[valor]	1.463			
Vazão de água	[mmHg]	440			
Vazão de água	[kg/h]	68.58	68.58		
Temperaturas					
Gases na saída da câmara	[°C]	845.00	845		
Ar de combustão	[°C]	38			
Pressão GLP	[mmCA]	620			
Pressão GLP	[kPa]	6.07			

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Especifica	
				ao PCS	ao PCI
GLP (kg/h)	12.98	T saída	845.00	GLP	165.437776
Tolueno(kg/h)	0.00	T resid. (s)	1.15	Tolueno	0
água(kg/h)	68.58	O2 medido		Água	-59.5506711
Ar(kg/h)	323.94	conc. Toluen	0.00	kW	165.437776
total	405.50	Excesso de ar:	00.642	kW/m3	477.591732
Ar estequiométrico(kg/h):	197.2656			ao PCS	ao PCI
Composição do gases					
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)		
O2	00.086	00.059	0.3488229		
CO2	00.084	00.058	0.47963148		
H2O	00.000	00.313	0.19621288		
N2	00.829	00.570	0.30522004		
	1	1	0.2837647		

Condição de Teste nº 19 - Dados experimentais referentes à Fig. 5.13.
Distribuição de velocidades no interior da câmara.

X(mm)	R(mm)	angulo (graus)	P0-P1 (mmCA)	P0-P2 (mmCA)	P0-P3 (mmCA)	P0-P4 (mmCA)	Kfi	Fi(graus)	T(°C)	dens. (kg/m3)	Kv	V(m/s)
1970	30	0	0.18	1.4	-0.04	1	0.516	29.837	1000.00	0.24	1.041	2.795
1970	70	0	0.2	1.68	-0.04	0.9	0.534	30.889	1000.00	0.24	1.039	2.936
1970	150	180	0.6	1.4	0.1	-0.1	0.588	34.011	1000.00	0.24	1.034	2.609
2730	30	0	1.3	1.2	1.1	1.9	0.157	9.235	1000.00	0.24	1.077	3.693
2730	70	0	2.5	1.81	1.3	2.27	0.162	9.503	1000.00	0.24	1.077	4.422
2730	150	180	1.1	0.8	1.34	0.56	0.212	12.412	1000.00	0.24	1.072	3.086
2730	180	180	1.2	0.9	1.42	0.92	0.135	7.961	1000.00	0.24	1.080	3.314
2730	210	180	-2.3	0.31	1.11	1.61	0.938	54.085	1000.00	0.24	0.998	3.549
2730	235	180	-1.1	1.1	2.3	1.3	0.643	37.120	1000.00	0.24	1.028	3.674
2180	30	45	1.67	3.2	2.1	1.5	0.213	12.474	1000.00	0.24	1.072	4.608
2180	70	0	0.22	1.68	-0.04	1.3	0.510	29.516	1000.00	0.24	1.042	3.107
2180	110	0	0.5	0.5	-0.1	1.4	0.518	29.962	1000.00	0.24	1.041	2.663
2180	150	180	0.5	1.5	0.1	-0.1	0.608	35.153	1000.00	0.24	1.032	2.653
2180	180	180	-0.4	0.2	-0.06	0	1.135	65.400	1000.00	0.24	0.978	1.341
1690	30	45	0.08	0.2	0.4	-0.08	0.591	34.176	1000.00	0.24	1.033	1.433
1690	70	45	0.16	0.4	0.28	-0.32	0.755	43.594	1000.00	0.24	1.017	1.614
1580	30	0	0.17	0.54	0.17	-0.34	0.777	44.853	1000.00	0.24	1.014	1.710
1370	30	0	0.96	1.8	0.8	0	0.433	25.095	1000.00	0.24	1.049	3.171
1370	150	180	0.09	-0.52	0.3	0.68	0.836	48.210	1000.00	0.24	1.008	1.965
1370	180	180	0.39	-0.32	0	0.6	0.757	43.677	1000.00	0.24	1.016	1.837
1370	210	180	0.45	-0.13	-0.22	0.42	0.781	45.068	1000.00	0.24	1.014	1.690
1370	235	180	0.45	0.03	0.53	0.3	0.368	21.369	1000.00	0.24	1.056	1.876

Condição de testes nº 14

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				Condição nº	14
	Unidade				
Teste	[n°]		141		
		MÉDIA			
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]		115		
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	323.94	323.9408		
Vazão de GLP	[Nm³/h]		5.3		
Vazão de GLP	[kg/h]	10.92	10.918		
Vazão de Tolueno	[escala]		30		
Vazão de Tolueno	[kg/h]	4.80			
N° Rotação da Mistura	[posição]		9		
N° Rotação da Mistura	[valor]		0.488278		
Vazão de água	[mmHg]		690		
Vazão de água	[kg/h]	85.50	85.50087		
Temperaturas					
Gases na saída da câmara	[°C]	842.00	842		
Ar de combustão	[°C]		39		
Pressão GLP	[mmCA]		640		
Pressão GLP	[kPa]		6.265843		

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Especifica	
				ao PCS	ao PCI
GLP (kg/h)	10.92	Tsaída	842.00	GLP	139.177812 139.177812
Tolueno(kg/h)	4.80	T resid. (s)	1.21	Tolueno	57.1197333 57.1197333
água(kg/h)	85.50	O2 medido	7.30 %	Água	-71.4883845
Ar(kg/h)	323.94	conc. Tolueno	0.31	kW	196.297545 124.80916
total	425.16	Excesso de ar:	00.406	kW/m3	566.678825 360.303581
Ar estequiométrico(kg/h):	230.4176			ao PCS	ao PCI
Composição do gases					
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)		
O2	00.064	00.041	0.349761435		
CO2	00.105	00.068	0.480921973		
H2O	00.000	00.354	0.196740807		
N2	00.831	00.537	0.306041256		
	1	1	0.281016616		

Condição de Teste nº 14 - Dados experimentais referentes à Fig. 5.15.
Distribuição de temperaturas no interior da câmara

X (mm)	R (mm)	dTemp. (mV)	dTemp.(°C)	Temp.(°C)
1270	235	10.75	1100.44	1130.44
1270	160	8.25	883.14	913.14
1270	110	9.25	971.40	1001.40
1270	70	9.75	1014.81	1044.81
1270	40	9.75	1014.81	1044.81
1270	20	9	949.52	979.52
1370	235	15	1455.50	1485.50
1370	160	13	1289.21	1319.21
1370	110	12.25	1226.70	1256.70
1370	70	11.5	1163.83	1193.83
1370	40	11	1121.64	1151.64
1370	20	10.5	1079.16	1109.16
1480	235	15	1455.50	1485.50
1480	160	14.75	1434.67	1464.67
1480	110	13.75	1351.54	1381.54
1480	70	12.5	1247.57	1277.57
1480	40	11.5	1163.83	1193.83
1480	20	10.75	1100.44	1130.44
1600	235	14.25	1393.08	1423.08
1600	160	13.5	1330.78	1360.78
1600	110	12.25	1226.70	1256.70
1600	70	11.5	1163.83	1193.83
1600	40	10.75	1100.44	1130.44
1600	20	9.25	971.40	1001.40
1860	235	12	1205.79	1235.79
1860	160	11.5	1163.83	1193.83
1860	110	11	1121.64	1151.64
1860	70	10.5	1079.16	1109.16
1860	40	8.75	927.52	957.52
1860	20	7.25	792.62	822.62
2160	235	10.25	1057.80	1087.80
2160	160	9.5	993.16	1023.16
2160	110	8.75	927.52	957.52
2160	70	8.25	883.14	913.14
2160	40	6.5	723.01	753.01
2160	20	6	675.68	705.68
2480	235	9.25	971.40	1001.40
2480	160	9	949.52	979.52
2480	110	8.5	905.40	935.40
2480	70	7.25	792.62	822.62
2480	40	6	675.68	705.68
2480	20	4.75	553.77	583.77
2700	235	9.25	971.40	1001.40
2700	160	8.75	927.52	957.52
2700	110	8.25	883.14	913.14
2700	70	7.75	838.19	868.19
2700	40	7	769.59	799.59
2700	20	5.75	651.72	681.72

Condição de testes nº 4

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				Condição nº	4
Teste	Unidade				
	[n°]		41	42	
		MÉDIA			
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]		95	95	
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	294.82	294.816	294.816	
Vazão de GLP	[Nm³/h]		5.5	5.5	
Vazão de GLP	[kg/h]	11.33	11.33	11.33	
Vazão de Tolueno	[escala]		32.5	32.5	
Vazão de Tolueno	[kg/h]	4.80	0		
N° Rotação da Mistura	[posição]		12	12	
N° Rotação da Mistura	[valor]		0.683531	0.683531	
Vazão de água	[mmHg]		820	820	
Vazão de água	[kg/h]	94.10	94.09662	94.09662	
Temperaturas					
Gases na saída da câmara	[°C]	820.00	820	820	
Ar de combustão	[°C]		42	44	
Pressão GLP	[mmCA]		600	600	
Pressão GLP	[kPa]		5.874228	5.874228	

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Específica	
				ao PCS	ao PCI
GLP (kg/h)	11.33	Tsáida	820.00	GLP	144.429804
Tolueno(kg/h)	4.80	T resid. (s)	1.15	Tolueno	57.1197333
água(kg/h)	94.10	O2 medido	5.50 %	Água	-77.7291733
Ar(kg/h)	294.82	conc. Tolueno	0.30	kW	201.549538
total	405.04	Excesso de ar:	00.246	kW/m3	581.840467
Ar estequiométrico(kg/h):	236.68				357.449089
Composição do gases				ao PCS	ao PCI
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)		
O2	00.044	00.026	0.356801464		
CO2	00.119	00.072	0.490602013		
H2O	00.000	00.398	0.200700823		
N2	00.837	00.504	0.312201281		
	1	1	0.281895899		

Condição de Teste nº 4 - Dados experimentais referentes à Fig. 5.16.
Distribuição de temperaturas no interior da câmara.

X (mm)	R (mm)	dTemp.(°C)	Temp.(°C)
1320	270	1239.22	1269.22
1320	220	905.39	935.39
1320	170	797.20	827.20
1320	120	1062.08	1092.08
1320	70	1230.87	1260.87
1320	20	1138.54	1168.54
1420	270	1247.56	1277.56
1420	220	1062.08	1092.08
1420	170	914.26	944.26
1420	120	1121.64	1151.64
1420	70	1180.64	1210.64
1420	20	905.39	935.39
1520	270	1247.56	1277.56
1520	220	1145.00	1175.00
1520	170	1010.48	1040.48
1520	120	1104.68	1134.68
1520	70	1096.19	1126.19
1520	20	931.93	961.93
1630	270	1247.56	1277.56
1630	220	1155.41	1185.41
1630	170	1062.08	1092.08
1630	120	1079.16	1109.16
1630	70	1096.19	1126.19
1630	20	905.39	935.39
1720	270	1230.87	1260.87
1720	220	1163.83	1193.83
1720	170	1062.08	1092.08
1720	120	1053.52	1083.52
1720	70	1053.52	1083.52
1720	20	923.11	953.11
1900	270	1189.03	1219.03
1900	220	1155.41	1185.41
1900	170	1053.52	1083.52
1900	120	993.15	1023.15
1900	70	967.03	997.03
1900	20	905.39	935.39
2130	270	1163.83	1193.83
2130	220	1130.09	1160.09
2130	170	1053.52	1083.52
2130	120	949.52	979.52
2130	70	860.73	890.73
2130	20	815.48	845.48
2320	270	1104.68	1134.68
2320	220	1087.68	1117.68
2320	170	1019.12	1049.12
2320	120	923.11	953.11
2320	70	815.48	845.48
2320	20	769.59	799.59
2560	270	1053.52	1083.52
2560	220	1062.08	1092.08
2560	170	1062.08	1092.08
2560	120	1019.12	1049.12
2560	70	975.75	1005.75
2560	20	923.11	953.11
2760	270	984.46	1014.46
2760	220	1010.48	1040.48
2760	170	1027.74	1057.74
2760	120	1036.35	1066.35
2760	70	1036.35	1066.35
2760	20	1019.12	1049.12
2860	270	975.75	1005.75
2860	220	1019.12	1049.12
2860	170	1044.94	1074.94
2860	120	1036.35	1066.35
2860	70	1019.12	1049.12
2860	20	993.15	1023.15

Condição de testes nº 15

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				Condição nº	15
	Unidade				
Teste	[n°]	151			
	MÉDIA				
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]	115			
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	323.94	323.9408		
Vazão de GLP	[Nm³/h]	5.3			
Vazão de GLP	[kg/h]	10.92	10.918		
Vazão de Tolueno	[escala]	30			
Vazão de Tolueno	[kg/h]	4.80			
N° Rotação da Mistura	[posição]	19			
N° Rotação da Mistura	[valor]	1.169818			
Vazão de água	[mmHg]	690			
Vazão de água	[kg/h]	85.50	85.50087		
Temperaturas					
Gases na saída da câmara	[°C]	842.00	842		
Ar de combustão	[°C]	39			
Pressão GLP	[mmCA]	640			
Pressão GLP	[kPa]	6.265843			

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Especifica	
				ao PCS	ao PCI
GLP (kg/h)	10.92	Tsaída	842.00	GLP	139.177812 139.177812
Tolueno(kg/h)	4.80	T resid. (s)	1.21	Tolueno	57.1197333 57.1197333
água(kg/h)	85.50	O2 medido	7.30	Água	-71.4883845
Ar(kg/h)	323.94	conc. Tolueno	0.31	kW	196.297545 124.80916
total	425.16	Excesso de ar:	00.406	kW/m3	566.678825 360.303581
Ar estequiométrico(kg/h):	230.4176			ao PCS	ao PCI
Composição do gases					
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)		
O2	00.064	00.041	0.349761435		
CO2	00.105	00.068	0.480921973		
H2O	00.000	00.354	0.196740807		
N2	00.831	00.537	0.306041256		
	1	1	0.281016616		

Condição de Teste nº 15 - Dados experimentais referentes à Fig. 5.17.
Distribuição de temperaturas no interior da câmara.

X (mm)	R (mm)	dTemp. (mV)	dTemp.(°C)	Temp.(°C)
1270	235	7.5	815.48	845.48
1270	160	6.38	711.72	741.72
1270	110	9.19	966.16	996.16
1270	70	10.69	1095.34	1125.34
1270	40	10.88	1111.47	1141.47
1270	20	9.56	998.36	1028.36
1370	235	11.5	1163.83	1193.83
1370	160	8.75	927.52	957.52
1370	110	13	1289.21	1319.21
1370	70	12.75	1268.40	1298.40
1370	40	12	1205.79	1235.79
1370	20	11.25	1142.77	1172.77
1480	235	11.5	1163.83	1193.83
1480	160	10.25	1057.80	1087.80
1480	110	11.5	1163.83	1193.83
1480	70	11.75	1184.84	1214.84
1480	40	11.5	1163.83	1193.83
1480	20	11	1121.64	1151.64
1600	235	12	1205.79	1235.79
1600	160	10.6	1087.68	1117.68
1600	110	10.6	1087.68	1117.68
1600	70	10.6	1087.68	1117.68
1600	40	10.5	1079.16	1109.16
1600	20	10.3	1062.08	1092.08
1860	235	11.75	1184.84	1214.84
1860	160	11	1121.64	1151.64
1860	110	10	1036.35	1066.35
1860	70	9.5	993.16	1023.16
1860	40	9	949.52	979.52
1860	20	8.6	914.26	944.26
2160	235	10.75	1100.44	1130.44
2160	160	11.5	1163.83	1193.83
2160	110	10.5	1079.16	1109.16
2160	70	9.25	971.40	1001.40
2160	40	7.75	838.19	868.19
2160	20	6.75	746.39	776.39
2480	235	10.5	1079.16	1109.16
2480	160	10.4	1070.63	1100.63
2480	110	10.25	1057.80	1087.80
2480	70	10	1036.35	1066.35
2480	40	9	949.52	979.52
2480	20	6.8	751.04	781.04
2700	235	10.5	1079.16	1109.16
2700	160	10.25	1057.80	1087.80
2700	110	9.9	1027.75	1057.75
2700	70	9.5	993.16	1023.16
2700	40	9	949.52	979.52
2700	20	8	860.74	890.74

Condição de testes nº 13

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				Condição nº	13
	Unidade				
Teste	[n°]		131		
		MÉDIA			
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]		115		
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	323.94	323.94		
Vazão de GLP	[Nm³/h]		4.6		
Vazão de GLP	[kg/h]	9.48	9.48		
Vazão de Tolueno	[escala]		40		
Vazão de Tolueno	[kg/h]	6.18	6.18		
N° Rotação da Mistura	[posição]		9		
N° Rotação da Mistura	[valor]		0.488		
Vazão de água	[mmHg]		700		
Vazão de água	[kg/h]	86.16	86.16		
Temperaturas					
Gases na saída da câmara	[°C]	840.00	840		
Ar de combustão	[°C]		42		
Pressão GLP	[mmCA]		645		
Pressão GLP	[kPa]		6.31		
O2	[%]	6.5			
CO2	[%]	9.9			

ESTEQUIOMETRIA				Potencia Especifica	
				ao PCS	ao PCI
GLP (kg/h)	9.48	Tsaída	840.00	120.795836	120.795836
tolueno(kg/h)	6.18	T resid. (s)	1.21	73.5416567	73.5416567
água(kg/h)	86.16	O2 medido	6.5 %		-71.2143206
Ar(kg/h)	323.94	conc. Toluen	0.39	kW	194.337493
total	425.76	Excesso de ar:	00.427	kW/m3	561.020477
Ar estequiometrico(kg/h):	227.0326			ao PCS	ao PCI
Composição do gases					
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)	Calibração HC totais	
O2	00.066	00.043	0.35038994	Zero ppm	0.019 mV
CO2	00.105	00.068	0.48178616	199 ppm	1.896 mV
H2O	00.000	00.353	0.19709434		
N2	00.829	00.536	0.30659119		
	1	1	0.28179436		

Condição de Teste nº 13 - Dados experimentais referentes às Figs. 5.18 e 5.19.
Distribuição da concentração de gases no interior da câmara.

X(mm)	R(mm)	CO (ppm)			Média
2840	215	117	127	132	125.33
2840	200	132	155	153	146.67
2840	170	126	127	125	126.00
2840	130	118	120	115	117.67
2840	75	74	94	89	85.67
2840	0	76	72	84	77.33
2700	215	426	452	450	442.67
2700	200	300	334	370	334.67
2700	170	353	323	325	333.67
2700	130	290	258	242	263.33
2700	75	211	175	165	183.67
2700	0	134	129		131.50
1710	215	778	844	987	869.67
1710	200	1030	1224	1490	1248.00
1710	170	1343	1742	1717	1600.67
1710	130	1481	1739	1817	1679.00
1710	75	1247	1429	1473	1383.00
1710	0	1350	1429	1250	1343.00
1470	215	1719	2302	2400	2140.33
1470	200	2820	3486	3538	3281.33
1470	170	4300	5900	3600	4600.00
1470	130	9200	9300		9250.00
1470	75	11100	10500		10800.00
1470	0	8900	8700		8800.00
1250	215	800	900		850.00
1250	200	1700			1700.00
1250	170	2700			2700.00
1250	130	4300			4300.00
1250	75	6800			6800.00
1250	0	5700			5700.00

X(mm)	R(mm)	HC(mV)				Media	HC(ppm)
2840	215	0.037	0.038	0.038		0.03766667	6.01
2840	200	0.039	0.039	0.04		0.03933333	6.18
2840	170	0.041	0.043	0.043		0.04233333	6.50
2840	130	0.051	0.048	0.05		0.04966667	7.28
2840	75	0.047	0.05	0.048		0.04833333	7.14
2840	0	0.04	0.04	0.04		0.04	6.25
2700	215	0.102	0.109	0.109		0.10666667	13.32
2700	200	0.097	0.092	0.087		0.092	11.77
2700	170	0.103	0.106	0.104		0.10433333	13.08
2700	130	0.081	0.082	0.083		0.082	10.71
2700	75	0.067	0.067	0.067		0.067	9.12
2700	0	0.057	0.057	0.057		0.057	8.06
1710	215	0.072	0.077	0.075		0.07466667	9.93
1710	200	0.083	0.078	0.077		0.07933333	10.42
1710	170	0.082	0.08	0.08		0.08066667	10.57
1710	130	0.098	0.098	0.096		0.09733333	12.33
1710	75	0.073	0.071	0.075		0.073	9.75
1710	0	0.073	0.073	0.075		0.07366667	9.82
1470	215	0.2	0.208	0.23		0.21266667	24.56
1470	200	0.22	0.21	0.209		0.213	24.60
1470	170	0.36	0.358	0.36		0.35933333	40.11
1470	130	0.53	0.54	0.545		0.53833333	59.09
1470	75	0.571	0.52	0.516		0.53566667	58.81
1470	0	0.657	0.675	0.697		0.67633333	73.72
1250	215	1.61	1.62			1.615	173.24
1250	200	1.62	1.57			1.595	171.12
1250	170	5.22	5.25		correção	5.235	557.03
1250	130	3.6	rotâmetro:	10.5	2.45699469	8.84518088	939.78
1250	75	2.74	rotâmetro:	7.5	3.86230595	10.5827183	1123.99
1250	0	2.6	rotâmetro:	8	3.52616623	9.16803219	974.01

Condição de testes nº 16

Câmara de Combustão - DADOS EXPERIMENTAIS				Condição nº	16
	Unidade				
Teste	[n°]		161		
		MÉDIA			
Vazão do ar de Combustão	[mmCA]		115		
Vazão do ar de Combustão	[kg/h]	323.94	323.94		
Vazão de GLP	[Nm³/h]		4.6		
Vazão de GLP	[kg/h]	9.48	9.48		
Vazão de Tolueno	[escala]		40		
Vazão de Tolueno	[kg/h]	6.18	6.18		
N° Rotação da Mistura	[posição]		19		
N° Rotação da Mistura	[valor]		1.170		
Vazão de água	[mmHg]		690		
Vazão de água	[kg/h]	85.50	85.50		
Temperaturas					
Gases na saída da câmara	[°C]	840.00	840		
Ar de combustão	[°C]		42		
Pressão GLP	[mmCA]		645		
Pressão GLP	[kPa]		6.31		

ESTEQUIOMETRIA							
GLP (kg/h)	9.48		Tsáida	840.00		Potencia Especifica	
tolueno(kg/h)	6.18		T resid. (s)	1.21		ao PCS	ao PCI
água(kg/h)	85.50		O2 medido			120.795836	120.795836
Ar(kg/h)	323.94		conc. Toluén	0.39		73.5416567	73.5416567
total	425.10		Excesso de ar:	00.427			-70.7686496
Ar estequiométrico(kg/h):	227.0326					kW	194.337493
						kW/m3	561.020477
Composição do gases						ao PCS	ao PCI
	base seca	base úmida	densidade(kg/m3)			Calibração HC totais	
O2	00.066	00.043	0.35038994			Zero ppm	0.019 mV
CO2	00.105	00.068	0.48178616			199 ppm	1.896 mV
H2O	00.000	00.351	0.19709434				
N2	00.829	00.538	0.30659119				
	1	1	0.28198174				

Condição de Teste nº 16 - Dados experimentais referentes às Figs. 5.20 e 5.21.
Distribuição da concentração de gases no interior da câmara

X(mm)	R(mm)	CO(ppm)			MEDIA
2840	215	1			1.00
2840	200	2			2.00
2840	170	3			3.00
2840	130	1	2		1.50
2840	75	0	1		0.50
2840	0	0			0.00
2700	215	13	9	14	12.00
2700	200	18	31	26	25.00
2700	170	20	18	21	19.67
2700	130	8	5	5	6.00
2700	75	4	4		4.00
2700	0	1	1		1.00
1710	215	7	8	10	8.33
1710	200	9	9		9.00
1710	170	14	15		14.50
1710	130	13	21	28	20.67
1710	75	66	65	59	63.33
1710	0	350	322	282	318.00
1470	215	174	150	120	148.00
1470	200	251	188	210	216.33
1470	170	232	180	173	195.00
1470	130	174	180	185	179.67
1470	75	230	166	154	183.33
1470	0	155	193	252	200.00
1250	215	8000			8000.00
1250	200	8200			8200.00
1250	170	8500			8500.00
1250	130	15200			15200.00
1250	75	18200			18200.00
1250	0	6200			6200.00

X(mm)	R(mm)	HC(mV)				Media	HC(ppm)
2840	215	0.031	0.029	0.03		0.03	5.19
2840	200	0.027	0.027	0.027		0.027	4.88
2840	170	0.025	0.025	0.025		0.025	4.66
2840	130	0.025	0.025	0.025		0.025	4.66
2840	75	0.024	0.024	0.024		0.024	4.56
2840	0	0.024	0.024	0.024		0.024	4.56
2700	215	0.028	0.028	0.028		0.028	4.98
2700	200	0.025	0.025	0.025		0.025	4.66
2700	170	0.024	0.024	0.024		0.024	4.56
2700	130	0.023	0.023	0.023		0.023	4.45
2700	75	0.023	0.023	0.023		0.023	4.45
2700	0	0.023	0.023	0.023		0.023	4.45
1710	215	0.032	0.032	0.032		0.032	5.41
1710	200	0.027	0.027	0.027		0.027	4.88
1710	170	0.026	0.026	0.026		0.026	4.77
1710	130	0.025	0.025	0.025		0.025	4.66
1710	75	0.025	0.025	0.025		0.025	4.66
1710	0	0.024	0.024	0.024		0.024	4.56
1470	215	0.048	0.048	0.048		0.048	7.10
1470	200	0.03	0.03	0.03		0.03	5.19
1470	170	0.117	0.25	0.16		0.17566667	20.64
1470	130	0.203	0.176			0.1895	22.10
1470	75	0.12	0.128			0.124	15.16
1470	0	0.24	0.322	0.191		0.251	28.63
1250	215	1.55				1.55	166.35
1250	200	1.53				1.53	164.22
1250	170	2.88			correção	2.88	307.35
1250	130	1.53	rotâmetro:	8.5	3.24387435	4.96312776	528.20
1250	75	1.65	rotâmetro:	8	3.52619366	5.81821953	618.86
1250	0	3.4	rotâmetro:	8.5	3.24387435	11.0291728	1171.33

ANEXO E

Análise de Erros

A incerteza de cálculo dos principais parâmetros utilizados neste trabalho foi estimada baseado em método proposto inicialmente por Kline e McClintock (1953). Proposições posteriores, de Moffat (1982 e 1988) permitiram a utilização de métodos computacionais para cálculo das incertezas. Uma compilação dos métodos encontra-se em Holman (1994).

Seja R o resultado de cálculo em função das variáveis independentes $x_1, x_2, \dots, x_n$.

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

e $(w_1, w_2, \dots, w_n)$ as incertezas nas medidas das variáveis independentes.

A incerteza do resultado R é calculada a seguir:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2}$$

Em medidas que envolvem um grande número de variáveis ou quando a derivada parcial da função resultado é difícil de ser obtida analiticamente, as derivadas parciais podem ser substituídas por cálculo numérico da derivada em diversos pontos de medição, resultando em uma tabela discreta de incertezas.

O cálculo discreto da derivada parcial é feito pela aproximação:

$$\frac{\partial R}{\partial x_n} \cong \frac{R(x_n + \Delta x_n) - R(x_n)}{\Delta x_n}$$

Esta aproximação é útil quando se dispõe de uma rotina de cálculo por computador e foi utilizada neste trabalho. Os resultados do cálculo de incerteza para a descarga do ar de combustão e para o excesso de ar são apresentados nas tabelas e.1 e e.2 a seguir.

Tabela e.1 Incerteza no cálculo da descarga do ar de combustão.

<i>Descarga do ar de combustão</i>	
Variáveis independentes da medida	
coeficiente de descarga da placa de orifício	0,8%
densidade do ar, baseada na temperatura	1° C
diferença de pressão na placa	1 mmCA
Incerteza resultante, calculada a 321 kg/h de ar	2,23 kg/h

Tabela e.2 Incerteza no cálculo do excesso de ar.

<i>Excesso de ar</i>	
Variáveis independentes da medida	
descarga de GLP, a 9,5 kg/h	0,51 kg/h
descarga de tolueno a 6,2 kg/h	0,12 kg/h
descarga de ar, a 321 kg/h	2,23 kg/h
Incerteza resultante	6%

ANEXO F

Medidores de Vazão

Descarga de Ar

A descarga do ar de combustão foi medida com uma placa de orifício construída de acordo com a norma ISO 5167 - “Medição de Vazão em Tubos com Secção Circular, Completamente Cheios, Com o Uso de Placas de Orifício, Bocais e Tubos Venturi”, ed. 1980, com as seguintes características:

- tipo de placa: com tomadas de canto.
- diâmetro do tubo: 71 mm
- diâmetro do orifício: 54,9mm.

O comprimento reto antes da placa foi maior que 20 diâmetros e, depois da placa, maior que 8 diâmetros, e nestas condições a incerteza do cálculo do coeficiente de descarga é menor que 0,8%. A diferença de pressão foi medida com manômetro de coluna de água. A curva de descarga calculada de acordo com a norma está apresentada na Figura f.1.

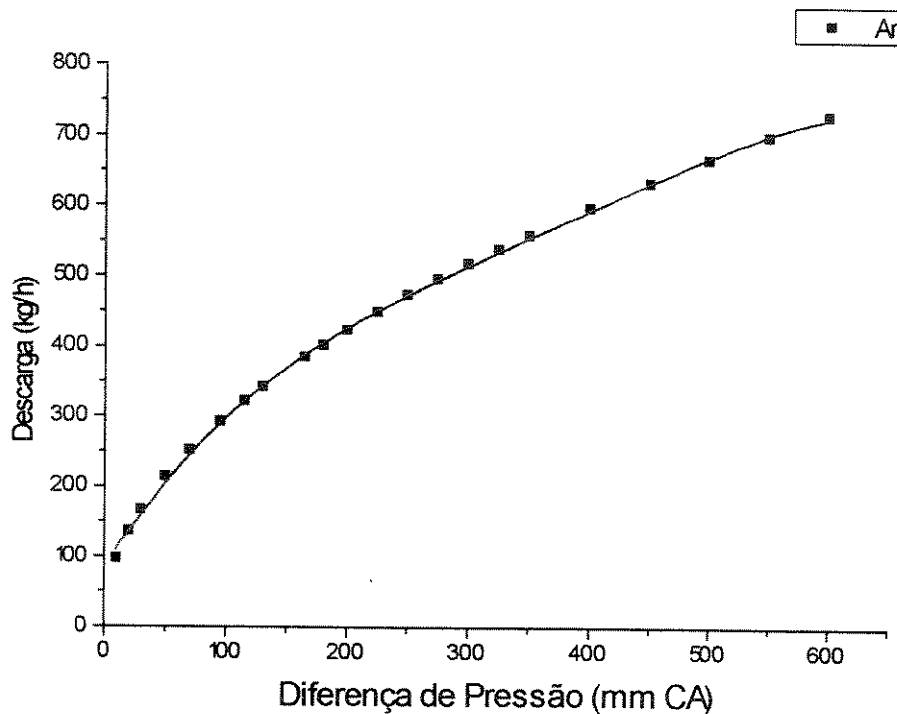


Figura f.1 Curva de descarga da placa de orifício para medição do ar de combustão.

Descarga de Água do Nebulizador

A descarga do nebulizador de água foi medida por um medidor de tubo capilar, construído com 2 tubos de cobre de diâmetro interno 2 mm e com 400 mm de comprimento e foi calibrada em função da diferença de pressão entre a entrada e saída do medidor. A calibração foi efetuada por medição de volume e tempo, com proveta graduada e cronômetro. A medida de pressão foi tomada com manômetro de coluna de mercúrio. A curva de calibração do medidor de tubo capilar está apresentada na Figura f.2.

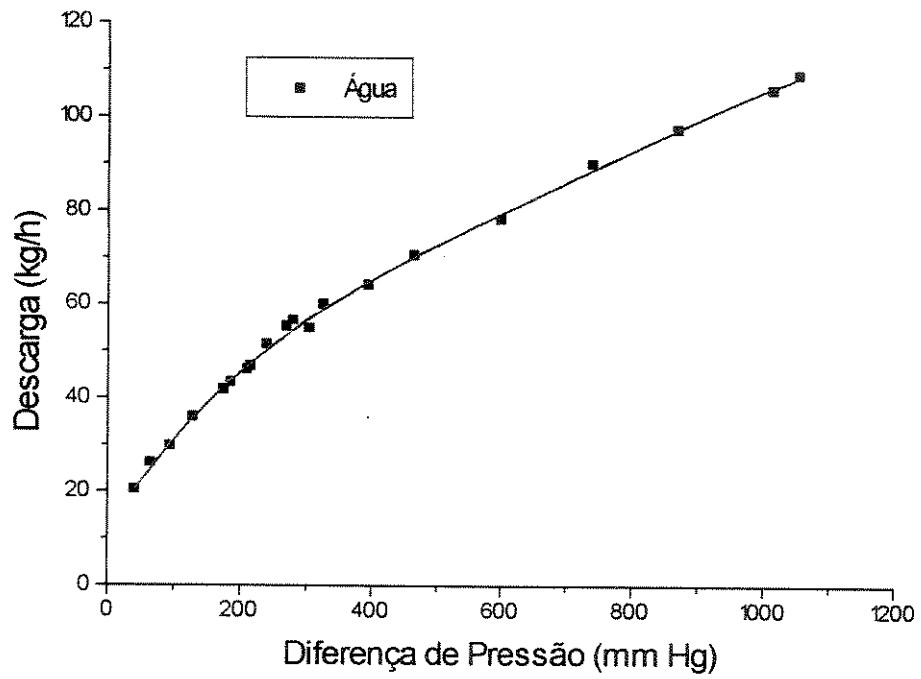


Figura f.2 Curva de calibração do medidor de tubo capilar para medição da descarga de água no nebulizador.