

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR MARCOS ROGÉRIO
MAFRA E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 24 / 02 / 2000


ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Estudo da Influência do Número de Rotação
na Formação de NO_x em uma
Câmara de Combustão Cilíndrica**

Autor: **Marcos Rogério Mafra**

Orientador: **Waldir Antonio Bizzo**

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

**Estudo da Influência do Número de Rotação
na Formação de NO_x em uma
Câmara de Combustão Cilíndrica**

Autor: **Marcos Rogério Mafra**

Orientador: **Waldir Antonio Bizzo**

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmicas e Fluidos

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

Campinas, 2000
SP - Brasil

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE



UNIDADE 3C
 N.º CHAMADA:
T/UNICAMP
M269e
 V. Ex.
 TOMBO BC/ 42096
 PROC. 16-278100
 C ☐ D ☒
 PREÇO R\$ 11,00
 DATA 8/10/81
 N.º CPD

→ 42016/BC

CM-00145813-0

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

M269e

Mafra, Marcos Rogério

Estudo da influência do número de rotação na formação de NO_x
 em uma câmara de combustão cilíndrica / Marcos Rogério Mafra.-
 -Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Waldir Antonio Bizzo
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,
 Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Câmaras de combustão. 2. Poluição. 3. Óxidos de nitrogênio.
 4. Escoamento. I. Bizzo, Waldir Antonio. II. Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
 Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

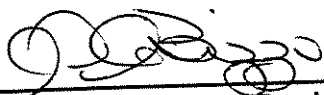
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Estudo da Influência do Número de Rotação
na Formação de NO_x em uma
Câmara de Combustão Cilíndrica**

Autor: Marcos Rogério Mafra

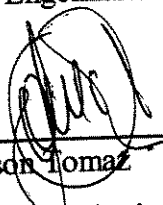
Orientador: Waldir Antonio Bizzo

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE



Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo, Presidente

Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Edson Tomaz

Faculdade de Engenharia Química - Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez

Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 24 de fevereiro de 2000

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha família (Antonio, Emilia e Vanessa) que mesmo longe estiveram sempre presente na minha vida e a minha querida namorada Luciana Igarashi, companheira em todos os momentos.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Agradecimentos:

Este trabalho contou com a colaboração de entidades e pessoas, aos quais expresso meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Waldir Antonio Bizzo por sua valiosa orientação e amizade;

A FAPESP pela financiamento deste projeto;

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado;

A Luciana Igarashi pela ajuda em todos os momentos deste trabalho;

A Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp pela estrutura oferecida;

Aos seguintes técnicos pelo profissionalismo:

Luiz Zanaga; Luiz Gama; Jefferson A. de Souza.

À secretária Cleusa de Vasconcelos Lima pela colaboração no exercício de suas atribuições;

Aos estagiários Gustavo e Luciano pela ajuda nos momentos necessários;

Por fim, meu muito obrigado a Daniel Celente pela dedicação em todos os momentos da montagem e dos testes, e ao colega Fábio Luís Fassani por sua ajuda voluntária durante o período de testes, os quais foram de suma importância na realização deste trabalho.

Resumo

MAFRA, Marcos Rogério, *Estudo da Influência do Número de Rotação na Formação de NO_x em uma câmara de combustão cilíndrica*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 107 p.. Dissertação(Mestrado).

A tendência de utilização de incineradores no tratamento de resíduos, exige um melhor conhecimento desta técnica, principalmente no que diz respeito as emissões gasosas por eles produzidas. A câmara de combustão é a etapa responsável pela oxidação térmica dos gases produzidos pela volatilização dos resíduos. As condições típicas de operação desta câmara, alto excesso de ar e altas temperaturas, são ideais para a formação de NO_x. Desta forma, foi estudado em uma câmara de combustão cilíndrica a influência da injeção de ar através de jatos com rotação na combustão e na emissão de gases de combustão. Através da variação do número de rotação foram construídas curvas relacionando diretamente as concentrações de saída dos gases com o número de rotação do escoamento. Foram também levantados perfis de temperatura e de concentração dos gases (O₂, CO e NO_x) no interior da câmara para dois números de rotação em duas condições de temperatura. Os resultados permitiram verificar a influência do número de rotação na intensidade da zona central de recirculação, na concentração dos gases e consequentemente nos níveis de temperatura no interior da câmara. Verificou-se também que para um número de rotação menos intenso as flutuações de temperatura são maiores, o que causa uma maior taxa de formação de NO_x do que o previsto pelo mecanismo do NO_x térmico. Entretanto, o mecanismo do NO_x térmico foi comprovado como sendo a rota principal de formação de NO_x na câmara de combustão.

Palavras Chaves

- Combustão; poluição; NO_x; escoamento; número de rotação.

Abstract

MAFRA, Marcos Rogério, *Study of the swirl number influence on NO_x formation in a cylindrical combustion chamber*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 107 p.. Dissertação(Mestrado).

The trend of utilization of incinerators on the wastes treatment demands a better knowledge about this technique, mainly its gas emissions. The combustion chamber is the responsible device for thermal oxidation of the gases produced by the waste volatilization. The typical parameters from this chamber, high air excess and high temperature, are ideals to produce NO_x. Then, it was studied in a cylindrical combustion chamber the influence of air injection by swirl jets in the combustion and related gas emissions. The NO_x emissions from the combustion chamber was correlated to the swirl number and it was obtained temperature and gas concentration (O₂, CO and NO_x) profiles into the chamber for two swirl number and in two temperature conditions. The results showed the influence of swirl number on the central recirculation zone intensity, gas concentration and temperatures inside the chamber. For low swirl numbers, its was showed that the temperature fluctuations are higher than high swirl numbers, causing high rates of NO_x formation. However, the NO_x thermal was proved to be the main route of NO_x formation into the combustion chamber.

Key Words

- Combustion; Pollution; NO_x; Flow; Swirl number.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
Nomenclatura	ix
1 - Introdução	1
2 - Revisão da Literatura	7
3 - Descrição da Bancada Experimental	41
4 - Descrição do Procedimento Experimental	53
5 - Apresentação e Análise dos Resultados	63
6 - Conclusão e Sugestões	81
Referências Bibliográficas	85
Anexos	91
A1 - Dados Experimentais a 1000 °C	92
A2 - Dados Experimentais a 1175 °C	101

LISTA DE FIGURAS

1.1 - Incinerador de forno rotativo	4
1.2 - Incinerador de câmaras múltiplas	4
1.3 - Incinerador de injeção líquida	5
2.1 - Principais reações de conversão do N-combustível em NO e N ₂	14
2.2 - Principais reações do mecanismo térmico De-NO _x	17
2.3 - Regiões do jato sem turbulência	19
2.4 - Linhas de correntes típicas de escoamento com rotação - corte axial	20
2.5 - Perfil de velocidade tangencial de uma câmara de combustão cilíndrica para um número de rotação de 0,90	24
2.6 - Gerador de escoamento com rotação por entrada tangencial e axial de ar	36
2.7 - Gerador de escoamento com rotação por blocos móveis	36
2.8 - Princípio de operação do queimador de mistura rápida	37
3.1 - Fluxograma do processo e instrumentação da bancada original	42
3.2 - Vista geral da bancada experimental	43
3.3 - Fluxograma do processo e instrumentação da bancada modificada	43
3.4 - Dimensões principais (em mm e sem escala) da câmara de combustão	44
3.5 - Sistema de blocos móveis para regulação do número de rotação	45
3.6 - Queimador com gerador de rotação do ar de combustão	46
3.7 - Pirômetro de sucção	49
3.8 - Fluxograma do sistema de sucção do pirômetro	50
3.9 - Sonda de amostragem dos gases de combustão	51
3.10 - Fluxograma do sistema de amostragem dos gases	52
5.1 - Emissão de NO _x em função do número de rotação	65
5.2 - Emissão de O ₂ em função do número de rotação	66
5.3 - Emissão de CO em função do número de rotação	66
5.4 - Perfis de concentração de O ₂ a 1000 °C: a) S' ₁ = 0,488; b) S' ₂ = 1,315	69
5.5 - Perfis de concentração de O ₂ a 1175 °C: a) S' ₁ = 0,488; b) S' ₂ = 1,315	70
5.6 - Perfis de concentração de CO a 1000 °C: a) S' ₁ = 0,488; b) S' ₂ = 1,315	71

5.7 - Perfis de temperatura a 1000 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1,315$	74
5.8 - Perfis de temperatura a 1175 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1,315$	75
5.9 - Perfis de concentração de NO_x a 1000 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1,315$	79
5.10 - Perfis de concentração de NO_x a 1175 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1,315$	80

LISTA DE TABELAS

3.1 - Características dos medidores de vazão	47
3.2 - Características dos sensores de temperatura	48
3.3 - Características dos medidores eletrônicos de temperatura	48
3.4 - Características dos medidores de pressão	48
3.5 - Características principais dos analisadores de gases	52
4.1 - Principais parâmetros e variáveis de operação	55
4.2 - Propriedades do GLP	56
4.3 - Potência específica da câmara de combustão	58
4.4 - Relação entre a posição na rosca e o número de rotação do queimador	60
5.1 - Condições de operação da câmara	64

NOMENCLATURA

Letras Latinas

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

G_{φ} - quantidade de movimento tangencial

G_x - quantidade de movimento axial

$\dot{m}_{GLP}$ - vazão de GLP (Kg/s)

P - pressão estática

R - raio da saída do gerador de rotação; raio da câmara; constante universal dos gases

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

r - posição radial

S' - número de rotação

$\bar{t}$ - tempo médio de residência;

U - componente axial da velocidade dos gases

V - volume da câmara em m^3

$\dot{v}$ - vazão do ar de combustão calculado na temperatura de saída da câmara (m^3/s);

W - componente tangencial da velocidade dos gases

$\dot{w}_{PCS}$ - potência específica

z - quantidade de blocos móveis;

Letras Gregas

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.

σ - coeficiente da quantidade de movimento tangencial, calculado pela equação 4.6

ρ - densidade dos gases

φ - coeficiente de excesso de ar.

Siglas

DTR - distribuição do tempo de residência

GLP - gás liquefeito do petróleo

IFRF - International Flame Reserch Foundation

PCI - poder calorífico inferior

PCS - poder calorífico superior

QBN - queimador de baixo NO_x

ZCR - zona central de recirculação

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Foco das atenções nas últimas duas décadas, os problemas ambientais são decorrentes de mais de um século de desenvolvimento industrial desordenado. Desde a revolução industrial, passando pelo advento das máquinas a vapor e chegando até a popularização dos computadores, observa-se um enorme aprimoramento dos meios de produção e dos produtos consumidos. Entretanto, se por um lado o desenvolvimento de novas tecnologias facilitou a vida humana na Terra, por outro lado desenvolveu também a qualificação das agressões ao meio ambiente.

As atividades industriais e o volume de bens consumido pelo homem moderno gera um grande montante de resíduos que devem ser dispostos. Os aterros sanitário foram por muito tempo a forma de disposição desses resíduos mais utilizada. Porém, não mais se tem permitido o uso de aterros, devido ao enorme volume de resíduos e da área que seria necessária para o tratamento destes. Os aterros sanitários oferecem ainda, riscos de contaminação do solo e de mananciais d'água devido a formação do chorume. O chorume é um produto altamente tóxico, prejudicial a fauna e flora, que se forma pela água da chuva que escorre nos aterros sanitário. Em países como os Estados Unidos o uso de aterros vem diminuindo a cada ano.

Uma alternativa moderna no que se refere ao tratamento de resíduos é a reciclagem em conjunto com a minimização na sua produção. Entretanto, a reciclagem tem barreiras técnicas

que impedem a reutilização de 100% do mínimo gerado. Haveria, então, a necessidade de se tratar por outras técnicas aquilo que não pôde ser reciclado.

Dentre as alternativas existentes no tratamento de resíduos, o tratamento térmico têm se mostrado mais eficaz, principalmente no tratamento de resíduos perigosos.

1.1 - Resíduos e Resíduos Perigosos

Resíduo é aquilo que se gera em um processo industrial que não tem valor comercial e que deve então ser disposto. Estes resíduos podem ser desde simples embalagens de produtos utilizados na produção até substâncias altamente perigosos a saúde humana e ao meio ambiente, resultante dos processos de tratamento da matéria-prima, separação ou lavagem de equipamentos.

Segundo a norma brasileira NBR 10004, existem mais de 500 substâncias classificadas como "perigoso" gerada em mais de 100 tipos de processos. A norma classifica como "perigoso" produtos que apresentem: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

1.2 - Tratamento Térmico de Resíduos (Incineração)

O tratamento térmico de resíduos consiste na oxidação do resíduo a altas temperaturas. Quando se trata de resíduos orgânicos a oxidação completa destes produz CO_2 e H_2O . Entretanto, na prática ocorre a formação de outras substâncias. A incineração, além de destruir o agente nocivo, tem como outra vantagem a redução do volume do resíduo.

Os resíduos inorgânicos também são passíveis de incineração, desde que haja uma fração de orgânicos para alimentar a combustão. Entretanto a grande desvantagem da incineração é a geração de cinzas contaminadas com inorgânicos, além da transformação de resíduos sólidos ou líquidos em efluentes gasosos, tais como ácido clorídrico (HCl), ácido bromídrico (HBr), óxidos

de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x) e materiais particulados além de produtos da combustão incompleta (CO e hidrocarbonetos não queimados). As cinzas contaminadas devem ser neutralizadas antes da sua disposição em aterros.

Poluentes como HCl, HBr, SO_2 e material particulado são passíveis de controle de poluição por equipamentos especializados. Já para o NO_x e o CO não existem equipamentos no qual sejam viável técnica e economicamente o controle desses poluentes, exigindo que se faça o controle no processo de formação do mesmo.

O tratamento térmico envolve diversos fenômenos físicos e químicos tais como: secagem, pirólise e combustão completa de voláteis.

Os incineradores são geralmente constituídos de uma câmara primária onde ocorrem os processos de secagem, pirólise e a queima incompleta de compostos orgânicos e uma câmara secundária onde ocorrem a combustão completa dos gases voláteis produzidos na câmara primária.

1.3 - Tipos de Incineradores

O tipo mais versátil de incineradores é o de forno rotativo (figura 1.1), constituído de câmaras primária e secundária, que surgiu da necessidade de se tratar a diversidade de formas dos resíduos. Os incineradores de forno rotativo conseguem tratar desde sólidos finos até materiais de grande porte como tambores.

Outro tipo de incinerador é o de câmaras múltiplas (figura 1.2). Este incinerador é também constituído de câmaras primária e secundária e é utilizado na incineração de resíduos hospitalares, domésticos ou industriais não perigosos.

Por fim, existe o incinerador de injeção líquida (figura 1.3), constituído por uma única câmara de combustão, o qual é utilizado no tratamento de resíduo líquido nebulizável. Neste

incinerador os processos de volatilização, pirólise e combustão ocorrem na mesma câmara. BIZZO (1997) traz maiores detalhes técnicos a respeito destes incineradores.

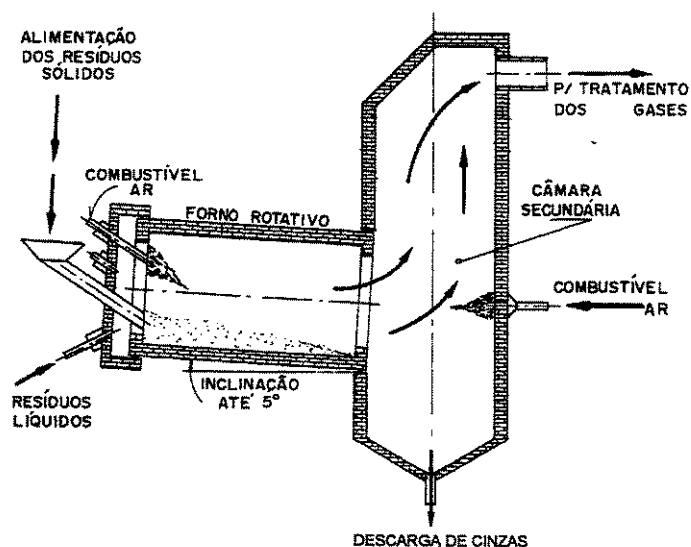


FIGURA 1.1 - Incinerador de forno rotativo (BIZZO, 1997. p.6).

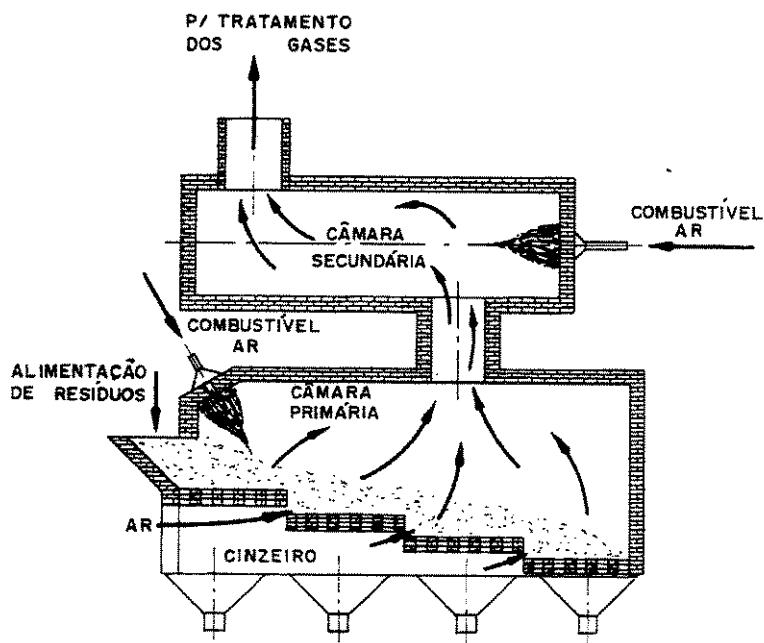


FIGURA 1.2 - Incinerador de câmaras múltiplas (BIZZO, 1997. p.4).

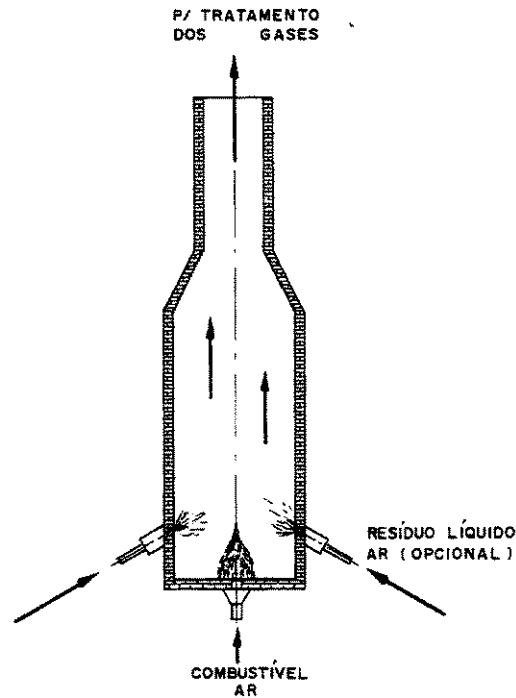


FIGURA 1.3 - Incinerador de injeção líquida (BIZZO, 1997. p.7).

1.4 - Câmara de Combustão e a Emissão de NO_x

O presente trabalho se concentra no estudo da câmara secundária, ou seja, da câmara de combustão. Nesta câmara ocorre a destruição final dos componentes voláteis formados na câmara primária e também a formação dos poluentes já citados.

As condições de operação desta câmara de combustão, que são: altas temperaturas e alto excesso de ar, são ideais para a formação dos óxidos de nitrogênio.

Ao contrario do SO_x que depende do enxofre ligado ao combustível para ser formado, o NO_x não depende exclusivamente do nitrogênio presente no combustível. Mesmo combustíveis livres de nitrogênio podem formar NO_x durante sua combustão, devido ao fato do nitrogênio estar presente no ar de combustão.

Considerando-se a queima de combustíveis limpos (sem nitrogênio) existe a possibilidade de se controlar a emissão de NO_x através dos seus parâmetros de operação.

Dentre os óxidos de nitrogênio encontrados na natureza, somente NO , NO_2 e N_2O apresentam-se em concentrações apreciáveis. Estes três óxidos variam no que se refere a toxicidade, cor, reatividade e fontes geradoras.

Os óxidos de nitrogênio tem sido responsabilizados por contribuir para o agravamento de problemas ambientais tais como: chuva ácida, destruição da camada de ozônio (O_3) em alta atmosfera, formação de ozônio em baixas atmosfera e pelo crescente aquecimento da Terra. Na saúde humana o NO_2 causa: bronquites, pneumonias, irritação do pulmão e aumento da susceptibilidade a infecções virais. Estudos em animais mostram que exposições intermitentes a baixos níveis de NO_2 pode comprometer rim, fígado, células vermelhas do sangue e alterar o sistema imunológico.

Neste trabalho pretende-se avaliar parâmetros aerodinâmicos de câmaras de combustão, capazes de influenciar na formação do NO_x . A revisão de literatura apresenta principalmente os fatores químicos e físicos responsáveis pela formação do NO_x em câmaras de combustão além de técnicas alternativas de controle.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

"Por mais de um século, os níveis de óxidos de nitrogênio na atmosfera tem aumentado regularmente". Parte significativa deste aumento tem sido devido a atividades humanas, como por exemplo a queima de combustíveis fósseis. As fontes naturais tem também contribuído para este aumento através do ciclo natural do nitrogênio, porém em menor escala (MUZIO e QUARTUCY, 1997).

Os impactos causados pelo aumento das emissões de poluentes nitrogenados se refletem na saúde dos homens e animais e também na integridade do meio ambiente. Entre outras coisas os óxidos de nitrogênio podem causar, chuva ácida e em condições crítica, redução da visibilidade devido formação de névoa. O efeito estufa causado pela camada de gases poluentes na atmosfera também pode ser reflexo de compostos nitrogenados como o óxido nitroso, mas isso ainda não foi totalmente comprovado.

Neste capítulo pretende-se apresentar através da revisão de literatura, conceitos importantes no estudo da formação de óxidos de nitrogênio em câmaras de combustão tais como: propriedades dos diversos poluentes nitrogenados; mecanismos químicos de formação e destruição; escoamento em câmaras de combustão; e as diversas técnicas usadas para prevenir ou combater a formação dos óxidos de nitrogênio.

2.1 - Ciclo do Nitrogênio

O nitrogênio é o elemento químico presente em maior quantidade na atmosfera (cerca de 79%). Entretanto, o nitrogênio não é absorvido diretamente por diversos organismos, sendo primeiramente fixado por microorganismos como bactérias, para posteriormente ser utilizado por plantas e animais (RAO, 1991).

O nitrogênio na forma de nitratos é assimilado como aminoácidos, uréia e outros compostos orgânicos. Em condições normais o montante de nitrogênio fixado é igual a quantidade retornada a atmosfera pelas bactérias dinitrificantes. Essas bactérias convertem a amônia, resultante da amonificação dos aminoácidos e da uréia, em nitritos e posteriormente em nitratos (RAO, 1991).

As atividades humanas tais como produção de fertilizantes nitrogenados e a oxidação do nitrogênio durante a queima de combustíveis fósseis, bem como a queima de combustíveis nitrogenados (carvão e óleo), tem alterado o ciclo natural do nitrogênio (RAO, 1991).

2.2 - Óxidos de Nitrogênio

São três os óxidos de nitrogênio encontrados na natureza em quantidades significantes. São eles:

- NO: óxido nítrico;
- NO₂: dióxido de nitrogênio;
- N₂O: óxido nitroso.

Sendo que desses somente o NO e o NO₂ são coletivamente denominados NO_x (MUZIO e QUARTUCY, 1997).

O óxido nítrico é o poluente nitrogenado mais combatido nos processos de combustão. Apesar de incolor e inodoro é o responsável pela formação do dióxido de nitrogênio na atmosfera. Esse óxido tem na queima de combustíveis sua principal fonte.

O dióxido de nitrogênio é um gás marrom, picante, de odor irritante e pode ser detectado a baixas concentrações (aproximadamente 0,12 ppm). Em baixas altitudes da atmosfera, o NO_2 tem sido detectado em pequenas concentrações. Isso deve-se, provavelmente, ao fato do dióxido de nitrogênio ser produzido principalmente pela oxidação do NO em atmosferas ricas em ozônio (O_3). Através da absorção de raios solares, o NO_2 inicia uma série de reações fotoquímicas na atmosfera. Os principais geradores deste poluente são a queima de combustível e as plantas industriais de fabricação do ácido nítrico e ácido adípico (RAO, 1991).

Por fim, o óxido nitroso é um gás incolor, inodoro e não tóxico em concentrações relativamente altas (0,25 ppm). É produzido na atmosfera pela ação biológica do solo e suas fontes antropogênicas são quase inexistentes. Tem baixa reatividade e normalmente não é considerado um poluente (RAO, 1991). Entretanto alguns trabalhos tais como: SANO (1985); HAO *et al.* (1987); DIEGO *et al.* (1996) citam o N_2O como um poluente emitido em quantidade significativa sob condições específicas. HAO *et al.* (1987) além de MUZIO e QUARTUCY (1997) referem-se ao óxido nitroso como um forte colaborador do efeito estufa e responsável pela destruição da camada de ozônio (O_3) da Terra. HAO *et al.* (1987) diz ainda que o N_2O é a maior fonte para a formação de NO_x na estratosfera.

Segundo HAYHURST e VINCE (1980), o NO tem um tempo de meia-vida de alguns dias antes de se converter a NO_2 . Este último é considerado o agente nocivo dentre os óxidos de nitrogênio presentes nos gases de exaustão de queimadores, apesar de não representar mais que 5% do NO_x gerado na combustão.

Outra propriedade importante desses óxidos é o fato de que, segundo ZELDOVICH (1985), o óxido nítrico ser pouco solúvel em água enquanto o dióxido de nitrogênio tem uma alta solubilidade. Esta característica pode ser de vital importância no projeto de lavadores tipo

"Scrubber" para NO_x . Entretanto, lavadores tipo "Scrubber" para NO_x só são economicamente viáveis quando o lavador já é empregado no controle de SO_2 .

2.3 - Mecanismos de Formação e Destruição dos Óxidos de Nitrogênio

Ao analisar a cinética química do nitrogênio durante os processo de combustão observa-se três rotas principais de formação do NO_x :

- NO_x térmico;
- NO_x imediato (do inglês "Prompt NO_x ");
- NO_x combustível.

Existem outras duas rotas secundárias chamadas de mecanismo do dióxido de nitrogênio e o mecanismo do óxido nitroso, que só são verificadas em condições específicas.

Ainda segundo a cinética química das reações envolvendo o nitrogênio existem dois mecanismos capazes de reduzir o NO_x formado: o térmico De- NO_x e o RAPRENO $_x$.

2.3.1 - Rotas Principais

2.3.1.1 - NO_x Térmico

Segundo MILLER e BOWMAN (1989) o NO_x térmico é a principal fonte de poluentes nitrogenados no processo de queima de combustíveis não nitrogenados. Originalmente este mecanismo foi chamado de "Mecanismo de Zeldovich" em homenagem ao pesquisador russo que propôs tal rota. HAYRURST e VINCE (1980) citam ZELDOVICH (1946) como sendo o marco inicial no estudo dos mecanismos envolvendo o nitrogênio durante a combustão.

ZELDOVICH (1946) apresenta uma sequência de duas reações (2.1 e 2.2) pelas quais ocorreria a formação do NO_x em câmaras de combustão:



FENIMORE e JONES (1957) citado por FENIMORE (1971) propõe uma terceira reação (2.3) a este mecanismo, devido uma certa inconsistência da rota proposta originalmente por ZELDOVICH:



Desta forma esse conjunto de reações fica então sendo conhecido como mecanismo do NO_x térmico, devido ao fato desta rota, segundo HAYHURST e VINCE (1980), ser diretamente dependente da temperatura. Ainda segundo os autores, este mecanismo é linearmente dependente da concentração do átomo de oxigênio e independente do tipo de combustível.

A forte dependência das reações que compõe o mecanismo do NO_x térmico com relação a temperatura, se deve, segundo HAYHURST e VINCE (1980), a alta energia de ativação ($E_A = 315 \text{ kJ/mol}$) deste mecanismo, que torna o mecanismo proposto por Zeldovich altamente sensível a temperatura.

Segundo MILLER e BOWMAN (1989) as reações que compõe esse mecanismo são lentas em relação as reações de oxidação do combustível (combustão). FENIMORE (1971) cita que as reações do mecanismo do NO_x térmico produzem cerca de 1 ppm de NO a cada milissegundo.

2.3.1.2 - NO_x Imediato

FENIMORE (1971) detectou uma sobre taxa de NO_x na região de chama com mistura rica em combustível que não poderia ser explicada pelo mecanismo proposto por ZELDOVICH (1946). Fenimore observou que a velocidade de formação do NO_x era muito alta, não condizendo como o mecanismo do NO_x térmico, onde as reações são relativamente lentas. Desta forma Fenimore propôs um novo mecanismo denominado por ele de NO_x Imediato (do inglês "Prompt NO_x "), segundo o qual radicais hidrocarbonetos reagem rapidamente com o nitrogênio molecular formando aminas (NH) e compostos cianos (HCN, H_2CN e CN) como mostram as reações 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 (HAYHURST e VINCE, 1980; DRAKE *et al.*, 1987; CARVALHO *et al.*, 1990; DUPONT *et al.*, 1993; VAN DER LANS *et al.*, 1997; MEUNIER *et al.*, 1998). Segundo ALTPFART e CHRISTMAN (1995) o mecanismo se completa em $1,0 \times 10^{-3}$ segundos.



No caso de haver altas concentrações de O e OH os compostos cianos são então convertidos em NO pelo mesmo mecanismo do NO_x combustível (figura 2.1), completando o mecanismo do NO_x Imediato em chamas ricas em combustível (VAN DER LANS *et al.*, 1997). Apesar de haver vários radicais hidrocarbonetos responsáveis por esta rota química, o CH e o CH_2 são considerados os de maior importância (MILLER e BOWMAN, 1989).

Segundo HAYHURST e VINCE (1980) o mecanismo proposto por FENIMORE (1971) é válido somente em regiões de chamas com mistura rica em combustível, enquanto o mecanismo proposto por ZELDOVICH (1976) prediz adequadamente a taxa de formação de NO_x em chamas

de mistura pobre e em condições estequiométricas, sendo então aplicável a maioria dos sistemas práticos.

2.3.1.3 - NO_x Combustível

Este mecanismo refere-se a formação de NO_x proveniente da volatilização de compostos nitrogenados ligados ao combustível. O NO_x Combustível é particularmente importante em queimadores de carvão e derivados do carvão, onde o nitrogênio representa de 0,5 a 2,0% do seu peso (MILLER e BOWMAN, 1989).

Ainda segundo MILLER e BOWMAN (1989), medidas feitas em queimadores de escala laboratorial com vários tipos de combustíveis nitrogenados permitiu as seguintes conclusões em relação a conversão do nitrogênio do combustível a NO:

- A conversão é quase independente do tipo dos compostos nitrogenados;
- A conversão depende fortemente das condições locais de combustão: temperatura alta favorece a quebra das ligações aumentando a taxa de NO_x combustível; estequiometrias ricas em combustível favorecem a formação de HCN que é fortemente oxidado a NO na região posterior a chama (VAN DER LANS *et al.*, 1997);
- A conversão é altamente dependente da concentração inicial de compostos nitrogenados na mistura ar/combustível.

Basicamente as reações envolvendo o NO_x Combustível se iniciam rapidamente convertendo quase a totalidade dos composto nitrogenados em cianeto de hidrogênio (HCN) e amônia (NH_3). Quando o nitrogênio do combustível esta ligado a um anel aromático o produto é o cianeto de hidrogênio. Já quando o nitrogênio esta ligado a um grupa amina o produto é a amônia (MILLER e BOWMAN, 1989).

VAN DER LANS *et al.* (1997) apresenta um esquema simplificado das principais etapas de conversão do nitrogênio do combustível em NO e N₂ (figura 2.1):

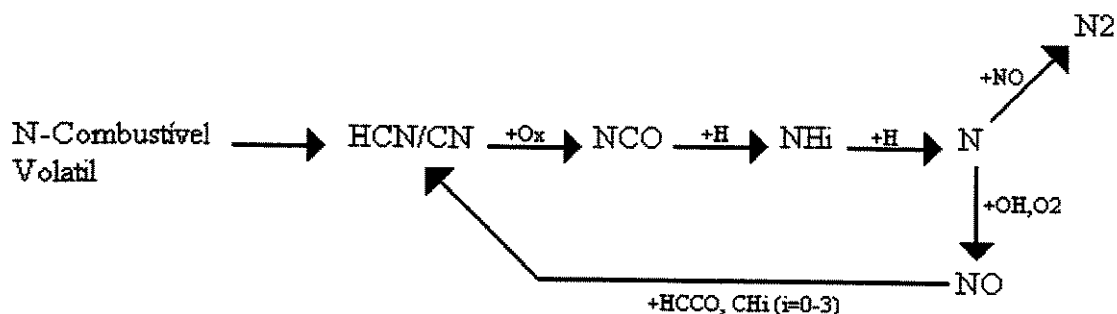


FIGURA 2.1 - Principais reações de conversão do N-combustível em NO e N₂ (VAN DER LANS *et al.*, 1997. p.354)

2.3.2 - Rotas Secundárias

2.3.2.1 - Mecanismo do Dióxido de Nitrogênio

O trabalho de MILLER e BOWMAN (1989) apresenta o mecanismo do dióxido de nitrogênio como sendo uma fonte de NO_x em máquinas e turbinas a gás. Medidas locais de concentração de NO_x próximo a zona de chama em queimadores com e sem pré mistura, revelam altas concentrações de NO₂ em relação ao NO.

SANO (1985) propõe um mecanismo (reações 2.8, 2.9 e 2.10) para tentar explicar a formação e destruição do NO₂ durante a combustão:



Em regiões de chama de baixa temperatura, significativa concentração de HO₂ pode ser encontrada o qual pode reagir com o NO formado em regiões de alta temperatura e transportado por difusão para a região de baixa temperatura. As reações de remoção do NO₂ são rápidas, e na presença de altas concentrações de radicais O e H, NO₂ será convertido rapidamente de volta a NO (MILLER e BOWMAN, 1989).

A formação do dióxido de nitrogênio é então sensível as reações de formação e remoção do HO₂ (reação 2.11).



Segundo MILLER e BOWMAN (1989) a reação 2.11 ocorre em regiões de chamas de baixa temperatura. O átomo de hidrogênio necessário para a reação 2.11 é transportado da região de alta temperatura por difusão molecular. A reação 2.12 também é importante na formação de NO₂. Quanto a remoção do dióxido de nitrogênio, MILLER e BOWMAN (1989) propõem que a reação 2.9 é de maior relevância em relação a reação 2.10.



2.3.2.2 - Mecanismo do Óxido Nitroso

HAO *et al.* (1987) relatam que altas concentrações de N₂O tem sido encontrados nos gases de exaustão da queima de carvão e óleo combustível.

Conforme ROBY e BOWMAN (1987) estudos realizado em chama laminar com pré mistura indicam que o N₂O é um composto que se converte rapidamente nos gases de exaustão da combustão. As reações 2.13 e 2.14 mostram a formação do óxido nitroso que é rapidamente convertido em N₂ conforme a reação 2.15.



Este mecanismo é de interesse, pois, como mostram as reações 2.13 e 2.14, ele é responsável pela remoção do NO. O N₂O é um subproduto do RAPRENO_x que será apresentado na seção 2.3.3.2.

2.3.3 - Mecanismo de Redução do NO_x

2.3.3.1 - *Térmico De-NO_x*

O térmico De-NO_x é uma estratégia utilizada no controle das emissões de NO_x em processos de queima de combustíveis nitrogenados (N-combustível). Esta técnica se insere nas chamadas técnicas de pós combustão, uma vez que sua ação se dá após a formação do poluente, agindo nos gases de exaustão da combustão (MILLER e BOWMAN, 1989).

O mecanismo do térmico De-NO_x consiste na injeção de amônia (NH₃) nos gases de exaustão de combustores estacionários. A amônia inicia uma sequência de reações que acabam por converter o óxido nítrico em nitrogênio molecular. Um esquema mostrando as principais reações envolvidas neste mecanismo é apresentado na figura 2.2:

MILLER e BOWMAN (1989) citam uma série de características químicas deste mecanismo que tem motivado um grande número de estudos. A respeito destas características pode-se dizer que:

- O mecanismo possui uma faixa estreita de temperatura de operação (1100 a 1400 K) sendo 1250 K seu ótimo, sem a presença de aditivo algum;
- A amônia só é eficiente na redução do NO a N₂ se houver condições de excesso de oxigênio;
- Aditivos tais como hidrogênio e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) abaixam a faixa de temperatura de operação;
- A temperatura ótima de operação aumenta levemente com a presença de água, promovendo uma pequena inibição no mecanismo.

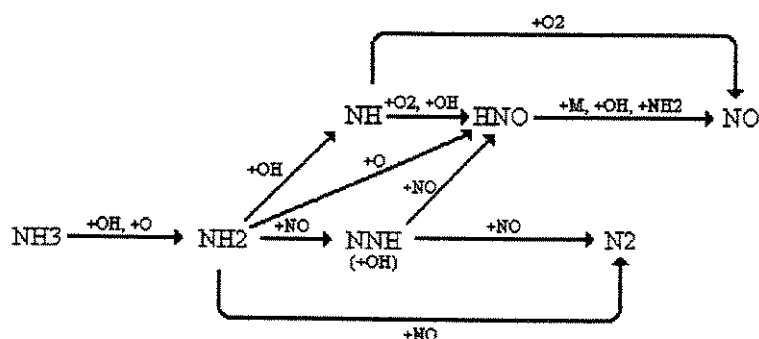


FIGURA 2.2 - Principais reações do mecanismo térmico De-NO_x (MILLER e BOWMAN, 1989)

2.3.3.2 - RAPRENO_x

Assim como o térmico De-NO_x o RAPRENO_x é um processo no qual os gases de exaustão da queima de N-combustível são tratados com o objetivo de converter NO em N₂. Entretanto, o RAPRENO_x tem motivado menos pesquisas visando o seu estudo.

No mecanismo do RAPRENO_x ácido cianúrico ((HOCN)₃) comercial é injetado nos gases de exaustão. Quando aquecido o ácido cianúrico sublima e se decompõe sob a forma de ácido isocianico (reação 2.16) (MILLER e BOWMAN, 1989).



MILLER e BOWMAN (1989) baseados em trabalhos experimentais estabelece que apesar da decomposição do ácido cianurico se iniciar em 600 K, a conversão do NO a N₂ só ocorrerá a partir de 1000 K. A 1200 K quase todo NO já foi convertido, porém acima desta temperatura a redução do óxido nítrico a nitrogênio molecular diminui com o aumento da concentração do N₂O.

Apesar das reações que compõe o mecanismo do RAPRENO_x não estarem tão bem estudadas como as do mecanismo do térmico De-NO_x, PERRY e SIEBERS (1986) citado por MILLER e BOWMAN (1989) sugerem uma sequência de reações para explicar o mecanismo do RAPRENO_x (reações 2.17 a 2.23):



2.4 - Fluidodinâmica de Câmaras de Combustão

O projeto de queimadores com alta eficiência de queima e baixos níveis de emissão de poluentes exige o conhecimento das formas de escoamento no interior das câmaras de combustão.

BIZZO (1997) afirma que o estudo da aerodinâmica de combustores foi motivada inicialmente pela necessidade de se desenvolver queimadores com alta eficiência de queima através de uma boa estabilidade de chama.

Entretanto nas últimas duas décadas queimadores de baixo NO_x tem sido desenvolvido valendo-se dos princípios de cinética química da oxidação do nitrogênio e do estudo do escoamento no interior de câmaras de combustão.

Escoamentos livres de turbulência evoluem no interior da câmara a partir do bocal passando por quatro regiões distintas como mostra a figura 2.3. Entretanto, a presença de turbulência é de vital importância tanto para aumentar a eficiência de queima (BEÉR e CHIGIER, 1972) quanto para minimizar a emissão de NO_x (COE, 1980; AOKI *et al.*, 1992; ANDREWS *et al.*, 1992; SCHENELL *et al.*, 1993; ALTPFART e CHRISTMAN, 1995; KENBAR *et al.*, 1995; JAWORZNO..., 1995; DÖBBELING *et al.*, 1996 e 1997; HESSELMANN, 1997; VAN DER LANS *et al.*, 1997; YEGIAN e CHENG, 1998; ADRIAN HSIEH *et al.*, 1998).

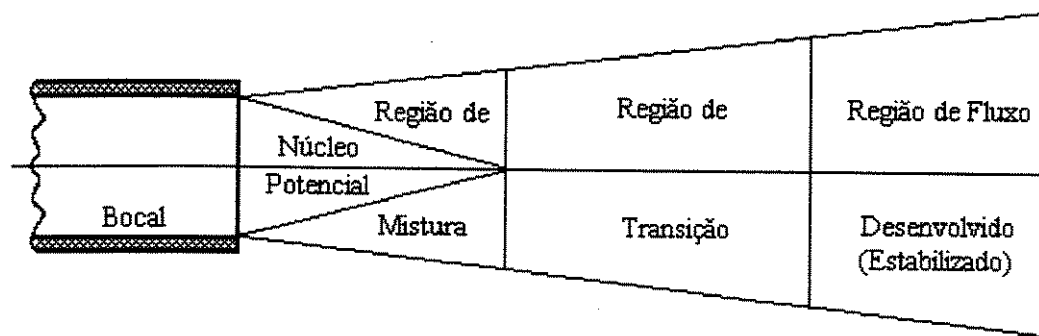


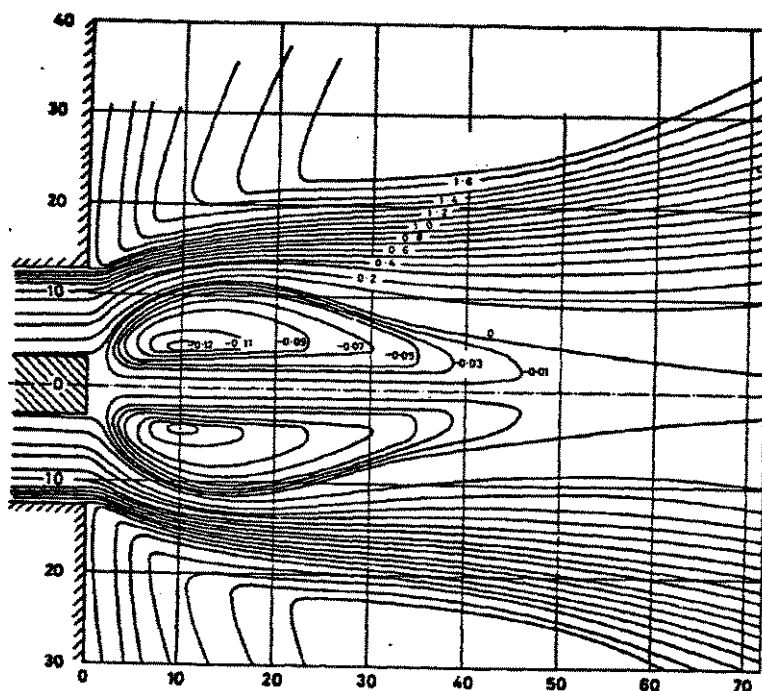
FIGURA 2.3 - Regiões do jato sem turbulência (BEÉR e CHIGIER, 1972. p.10).

Entretanto a presença de escoamento turbulento dificulta a predição da emissão de NO_x devido a interação de fatores químicos com fatores aerodinâmicos. Acredita-se ainda que a emissão de NO_x é diretamente proporcional as flutuações locais de temperatura provocadas pelo escoamento com rotação (HAYHURST e VINCE, 1980).

Parece haver uma contradição quanto a influência do escoamento com rotação na emissão de NO_x . Porém, uma análise da literatura revela que o número de rotação deve ser otimizado a fim de minimizar a emissão de poluentes nitrogenados e maximizar a eficiência de queima.

2.4.1 - Escoamento com rotação ("Swirl")

BEÉR e CHIGIER (1972) marcam o estudo de escoamento com rotação (figura 2.4) utilizado a fim de melhorar a estabilidade de chama e consequentemente a eficiência de queima. A instabilidade de chama é responsável pela perda de calor na região de combustão devido a dispersão da chama. Numa chama dispersa a temperatura cai favorecendo a formação de CO devido a queima incompleta do combustível. Em um escoamento com rotação, ocorre a recirculação de gases próximo ao queimador, dando origem a região denominada Zona Central de Recirculação (ZCR).



Com a finalidade de avaliar a intensidade dos jatos com rotação (do inglês "Swirl Jet") em testes de laboratório, BEÉR e CHIGIER (1972) propuseram um número adimensional, chamado de número de rotação (do inglês "Swirl Number") como mostra a equação 2.24.

$$S = \frac{G_{\phi}}{G_x.R} \quad (2.24)$$

sendo

$$G_{\phi} = \int_0^R (W.r).\rho.U.2\pi.r.dr \quad (2.25)$$

e

$$G_x = \int_0^R U.\rho.U.2\pi.r.dr + \int_0^R P.2\pi.r.dr \quad (2.26)$$

onde:

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.

BEÉR e CHIGIER (1972) citam dois dispositivos usados na geração de escoamento com rotação: entrada tangencial e axial de ar; e passagem por blocos móveis. VAN DER LANS *et al.* (1997), apresentam mais três formas de se promover esse tipo de escoamento:

- Aletas radiais: geralmente usadas em aplicações industriais para suprir ar secundário e terciário à combustão (ALTPFART e CHRISTMAN, 1995);

- Aletas axiais: usadas para injeção de ar primário ou em queimadores de pequena escala (JAWORZNO..., 1995);
- Entrada tangencial dos gases: não é usado com frequência (KENBAR, 1995).

Foi observado por BELTAGUI e MACCALLUM (1976a) que as dimensões da Zona Central de Recirculação (ZCR) em escoamentos altamente confinados, eram mais dependentes do diâmetro da fornalha do que do diâmetro do gerador de rotação, que normalmente é o próprio queimador. Desta forma propuseram uma nova definição de número de rotação substituindo o raio do gerador de rotação (R) pelo diâmetro da câmara (D) e omitindo o termo de pressão. O novo número de rotação (S^*) oferece maior liberdade com relação a dados experimentais. O trabalho demonstra ainda que existe uma relação linear entre a intensidade da ZCR e o número de rotação para escoamento confinado. Segundo BELTAGUI e MACCALLUM (1976b) a intensidade da ZCR é determinada pela razão entre o fluxo reverso e o fluxo total na região.

A similaridade entre escoamento com rotação a frio e escoamento com rotação a quente (combustão) foi estudado por EL-MAHALLAWAY *et al.* (1977) que concluiu que:

- a combustão diminui o tamanho da ZCR devido ao aumento da velocidade axial, ou seja, da quantidade de movimento axial ocorrido neste processo;
- a combustão altera a distribuição das linhas de correntes, mas seu efeito sobre a quantidade de movimento tangencial é pequeno.

STYLES *et al.* (1979) valeu-se de um modelo com água em uma fornalha ciclônica para sugerir uma correlação entre o número de rotação a frio e as condições de combustão (equação 2.27).

$$S_{\text{combustão}} \approx S_{\text{isotermico}} \frac{T_{\text{entrada}} (K)}{T_{\text{saída}} (K)} \approx S_{\text{isotermico}} \frac{\rho_{\text{saída}}}{\rho_{\text{entrada}}} \quad (2.27)$$

Como EL-MAHALLAWAY *et al.* (1977), WEBER e DUGUÉ (1992) também estudaram a similaridades entre o escoamento com rotação a frio e o escoamento com rotação a quente, chegando às mesmas conclusões. Sugeriu ainda um número de rotação efetivo para o caso de fornalhas altamente confinadas e chamas com mistura perfeita (equação 2.28).

$$S_{\text{efetivo}} = S \frac{G_{x(\text{frio})}}{G_{x(\text{combustão})}} \quad (2.28)$$

A equação 2.28 simplifica-se no caso de baixo número de rotação ($S < 0,7$), ficando igual a equação 2.27 de STYLE *et al.* (1979).

Segundo VAN DER LANS *et al.* (1997) não existe uma correlação universal que permita relacionar um dado número de rotação com o seu respectivo perfil de escoamento, quando este é gerado por diferente geometrias. Isto torna inválida a comparação entre resultados obtidos por diferentes geradores de rotação. Entretanto é possível comparar resultados quando o escoamento com rotação é produzido pelo mesmo tipo de gerador.

2.4.2 - Distribuição do Tempo de Residência (DTR)

A Distribuição do Tempo de Residência (DTR) em câmaras de combustão é um parâmetro de grande importância quanto ao estudo da formação de NO_x . Entretanto a DTR não tem sido amplamente estudada. A distribuição do tempo de residência é apresentada por LEVENSPIEL (1972) e representa a distribuição dos tempos que cada porção do fluido permanece dentro do reator.

Escoamento com rotação foi estudado por CLAYPOLE e SYRED (1982) com o objetivo de analisar a estabilidade da chama. Neste trabalho foi proposto um modelo simplificado para o escoamento na câmara. Nele, a região de chama é dividida em duas partes, sendo a primeira uma região de mistura perfeita (reator de mistura perfeita) e a segunda uma região sem mistura (reator de fluxo pistonado).

KENBAR (1995) estudou a aerodinâmica de combustão para uma câmara com injeção periférica de combustível, e construiu um perfil de velocidade axial experimental (figura 2.5). Neste perfil observa-se uma região de intensa mistura promovida pelo refluxo próximo ao queimador e uma região de fluxo desenvolvido onde o perfil de velocidade é praticamente constante. Isso revela um comportamento de reator de mistura perfeita no início da câmara e de reator de fluxo pistonado na parte final.

BIZZO (1997) afirma que o modelo proposto por CLAYPOLE e SYRED (1982) é ideal para um incinerador com baixa emissão de poluentes. Uma distribuição não uniforme da DTR faz com que algumas partículas passem rapidamente pela câmara sem que tivessem tido tempo hábil para sua reação, enquanto outras partículas teriam um tempo de residência desnecessariamente maior que o tempo médio de residência.

Vale lembrar que o mecanismo do NO_x térmico, que é considerado a principal rota de formação de óxidos de nitrogênio em processos de combustão, tem uma baixa taxa de reação. Isso faz com que se deseje perfis de velocidade constante na parte final da câmara, de modo a se evitar que algumas partículas permaneçam dentro do reator tempo suficiente para formar NO_x .

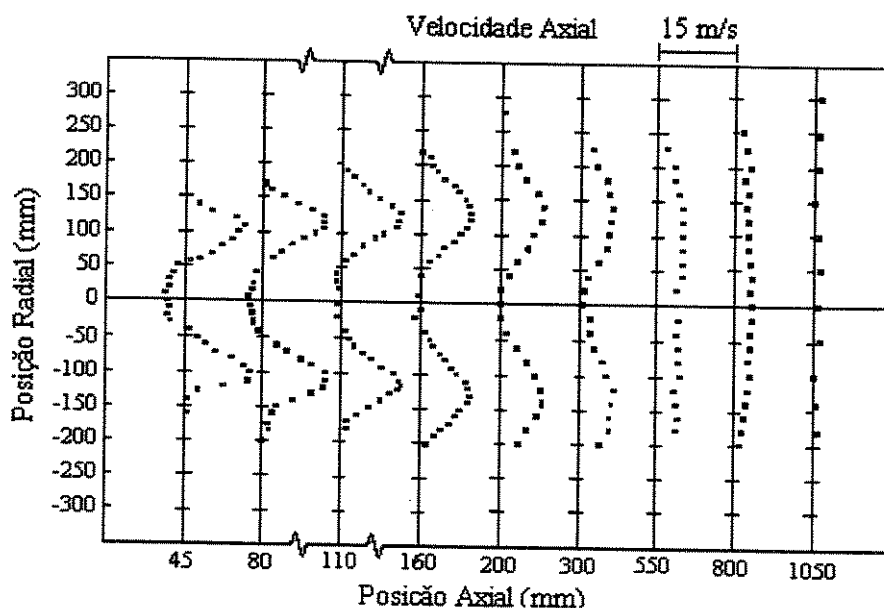


FIGURA 2.5 - Perfil de velocidade tangencial de uma câmara de combustão cilíndrica para um número de rotação de 0,90 (KENBAR, 1995. p.338).

2.5 - Técnicas de Controle de Emissão de NO_x

Analisando as técnicas existente de controle de NO_x observa-se que existem dois caminhos distintos para este fim: técnicas de pós combustão e técnicas de combustão.

2.5.1 - Técnicas de Pós Combustão

As técnicas ditas de pós combustão visam abater o NO_x formado sem se preocupar como ele foi produzido. Esse procedimento tem caráter destrutivo e não preventivo. Espera-se destas técnicas que elas possam adequar as emissões de poluentes às normas vigentes de controle ambiental.

O controle pós combustão de fontes móveis ou estacionárias se baseiam em três categorias: redução não-catalítica; redução catalítica ; e lavadores de gases.

Existe ainda uma técnica desenvolvida em escala laboratorial por STECIAK *et al.* (1995) baseada na adsorção química simultânea de óxidos de enxofre (SO_x) e de óxidos de nitrogênio (NO_x) em sais de cálcio de ácidos carboxílicos ($\text{Ca}(\text{COOH})_2$; $\text{Ca}(\text{CH}_2\text{COOH})_2$ entre outros). O processo de pirólise dos sais orgânicos de cálcio injetados na linha dos gases de exaustão, produz poros onde os poluente são adsorvidos. Nestes poros o SO_x reage com os sais produzindo sulfato de cálcio (CaSO_4) e sulfito de cálcio (CaSO_3). Já o NO_x reage com os radicais CH_i formados pela decomposição do grupamento carboxílico, reduzindo o NO a N_2 , em condições de mistura rica de combustível.

Os sais de cálcio de ácido orgânico são injetados pulverizados e secos na linha de exaustão. O experimento foi realizado em uma atmosfera com temperatura entre 550 e 1250 °C, contendo: 2000 ppmv de SO_2 ; 1000 ppmv de NO; 3 % de O_2 ; e 12 % de CO_2 .

Dentre os sais testados o que ofereceu melhores resultados de remoção de SO_x e NO_x foi o propionato de cálcio ($\text{Ca}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_2$) que com um baixo tempo de residência (~ 1 segundo)

e temperaturas maiores que 950 °C conseguiu remover mais que 80 % tanto do SO_x como do NO_x presentes inicialmente.

A grande desvantagem desta técnica esta no alto custo dos sais de cálcio de ácidos carboxílicos, em virtude do custo de produção do ácido carboxílico que atualmente provem do gás natural e do petróleo. Existe uma idéia que o uso de biomassas (resíduos) na produção destes sais pode vir a diminuir esse custo.

2.5.1.1 - Redução Não-Catalítica

O processo de redução não-catalítica do NO_x baseia-se na injeção de compostos nitrogenados, geralmente amônia (NH₃), que age como um agente redutor do óxido nítrico (NO) produzindo nitrogênio molecular (N₂). Entretanto não se tem procedido muito a injeção de amônia, mas sim compostos que se decomponham nela durante o processo.

AOKI *et al.* (1999) estudou experimentalmente o uso da uréia ((NH₂)₂CO) decomposta termicamente de forma a produzir amônia (NH₃), ácido isocianico (HNCO) e ácido cianúrico ((HOCN)₃). Observa-se então, que os mecanismos presentes neste processo são o térmico De-NO_x e o RAPRENO_x, já citados neste trabalho. A decomposição da uréia se dá através de duas formas:



Deseja-se muito o uso deste processo em situações reais, porém a estreita faixa de temperatura de operação dos mecanismos envolvidos , entre 1100 K e 1400 K sendo o ótimo 1200 K, dificulta o controle desta técnica.

AOKI *et al.* (1999) conseguiu atingir 90% de conversão do NO a N₂ a uma temperatura de 1250 K. Entretanto, abaixo desta temperatura a redução do óxido nítrico (NO) não ocorre com

sucesso, havendo ainda o risco de se encontrar amônia não reagida nos gases de exaustão. Acima de 1250 K pode ocorrer a conversão dos agentes redutores a NO e N₂O simultaneamente.

Entretanto o trabalho de AOKI *et al.* (1999) conseguiu estabelecer as relações e os fatores responsáveis pela decomposição da uréia, sendo útil na simulação de processos de combustão que façam uso desta técnica.

2.5.1.2 - Redução Catalítica

Uma técnica cara, mas que vem sendo muito utilizada quando não se consegue baixar os níveis de emissão de óxido de nitrogênio durante a combustão, é a redução catalítica.

Assim como na redução não-catalítica, a amônia também é usada como um agente redutor do óxido nítrico a nitrogênio molecular na redução catalítica (CANTELLI e de LUCA, 1999). A grande diferença entre ambas, além da presença do catalisador, é que na redução catalítica os próprios componentes do gás de exaustão são usados também como agentes redutores. Compostos como: hidrogênio, gás natural, hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono (CO) somados a presença de catalisadores metálicos, conseguem promover a conversão do NO_x a nitrogênio molecular (RAO, 1991).

O processo de redução catalítica dos óxidos de nitrogênio é dividida em duas etapas. Na primeira etapa ocorre a conversão catalítica de todo dióxido de nitrogênio (NO₂) em óxido nítrico (NO). Pelo fato do NO₂ ser marrom e o NO ser incolor, chama-se esta etapa de "Processo de Descoloração". A segunda etapa consiste na destruição catalítica do produto da descoloração (NO), transformando-o em nitrogênio molecular na presença dos agentes redutores (RAO, 1991).

Segundo RAO (1991) os catalisadores de maior eficiência são o Paládio e a Platina. Porém, esses metais são caros e altamente sujeitos a "envenenamento" por adsorção de enxofre no caso de queima de carvão ou óleo combustível. A contaminação do catalisador limita a seletividade que é a sua característica mais importante.

Quanto a seletividade do catalisador, RAO (1991) diz que em uma redução seletiva o agente redutor reage preferencialmente com o NO_x, reduzindo o montante de reagente necessário para a neutralização do poluente. As reações 2.31, 2.32 e 2.33 mostram a ação de alguns redutores em uma redução seletiva:



No caso de uma redução catalítica não-seletiva, as reações 2.34 e 2.35 ocorrem primeiro, seguido da reação 2.36. Entretanto, a reação de redução do NO (reação 2.36) só ocorrerá quando todo oxigênio presente tiver reagido com o combustível (reação 2.34).



2.5.1.3 - Lavadores de Gás Tipo "Scrubber"

Uma técnica de combate do NO_x que tem se mostrado bastante eficiente é a lavagem dos gases de exaustão em lavadores do tipo "Scrubber". O lavador "Scrubber" transfere o poluente da fase gasosa para a fase líquida, permitindo que este possa então ser tratado ou reciclado. Esse tipo de lavador é tradicionalmente usado no combate ao SO_x em usinas termoeletricas (KASPER *et al.*, 1996).

ROSSI e UNFRIED (1997) descrevem o uso de hidróxido de sódio (NaOH) e hidrosulfito de sódio (NaHS) como soluções básicas usadas na lavagem do NO_x.

O hidróxido de sódio é geralmente usado na remoção dos óxidos de nitrogênio. Os mecanismos que descrevem o processo de lavagem usando NaOH são mostrados pelas reações 2.37, 2.38 e 2.39:



O nitrito (NaNO₂) e o nitrato (NaNO₃) produzido neste processo devem ser então dispostos. Teoricamente esses sais podem ser processados e vendidos, entretanto, devido ao baixo retorno financeiro, isso não vem ocorrendo na prática, fazendo com que esses sejam tratados como dejetos.

A grande desvantagem desta solução é o seu alto custo de manutenção, pois o lavador tem a necessidade de paralisação periódica para a remoção de sais que precipitam no seu interior. Este custo dobra quando se computam também os prejuízos causados pela tempo de parada da unidade.

Outra base muito usada em soluções de lavagem do NO_x é o hidrosulfito de sódio (NaHS) devido ao seu baixo custo e alta eficiência de remoção. Consegue-se abater altas concentrações de óxidos de nitrogênio em gases com alta velocidade usando o NaHS. As reações 2.40 e 2.41 descrevem o processo de conversão do NO_x a NaHSO₄ e N₂:



Nos Estados Unidos a Agência de Proteção Ambiental (EPA) considera o NaHS uma substância perigosa, exigindo que se faça uso de medidas de segurança adicionais na operação e no caso de vazamento acidental.

Devido a alta alcalinidade do efluente do "Scrubber" deve-se proceder a neutralização do mesmo antes da sua deposição final. Deste processo de neutralização, gera-se gases como o hidrogênio sulfídrico (H₂S) e outras mercaptanas de odor desagradável a baixas concentrações e propriedades altamente tóxicas em altas concentrações.

Vêm se tentando ultimamente a substituição do hidrosulfito de sódio por outros reagentes, porém seus custos são sempre maiores. Dentre as alternativas destaca-se o uso de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) que é um poderoso oxidante. Diferentemente do NaOH e do NaHS, o peróxido de hidrogênio não forma sais de nitrato, mas sim soluções de ácido nítrico.

Quanto ao uso de peróxido de hidrogênio no combate ao NO_x efluente, KASPER *et al.* (1996) realça a possibilidade desta técnica vir a substituir a redução catalítica seletiva, que tem um alto custo, e os queimadores de baixo NO_x, que tem eficiência limitada. ROSSI e UNFRIED (1997) estudando a utilização de H₂O₂ no controle de NO_x em processos de produção de aço inox, verificou que este pode ser uma alternativa atrativa, devido a possibilidade de se recuperar o ácido nítrico utilizado na etapa de banho do metal. ROSSI e UNFRIED (1997) citam ainda que o uso de H₂O₂ pode se tornar vantajoso, quando fatores como problemas de operação, disposição dos sais produzidos, manutenção do lavador "Scrubber" e liberação de odores desagradáveis são computados. No caso do processo já possuir um lavador tipo "Scrubber" para SO_x, as chances desta técnica se tornar atrativa economicamente aumentam (KASPER *et al.*, 1996).

KASPER *et al.* (1996) em teste experimentais atingiu 97% de conversão para uma razão H₂O₂/NO de 2,6 e 75% de conversão para uma razão H₂O₂/NO de 1,6 em um reator a 500 °C, sob pressão atmosférica e com tempo de residência de 0,7 segundos. O abatimento dos óxidos de nitrogênio utilizando peróxido de hidrogênio é representado pelas reações 2.42 e 2.43:





O peróxido de hidrogênio é tão eficiente quanto o hidróxido de sódio no combate ao NO_x , sendo em alguns casos levemente mais eficiente devido ao fato das reações 2.42 e 2.43 ocorrem mais rapidamente em altas concentrações de NO_2 . Em relação ao hidrosulfito de sódio o H_2O_2 é menos eficaz pois requer um tempo de contato entre as fases maior do que o necessário em aplicações com NaHS (ROSSI e UNFRIED, 1997).

Finalmente quanto aos riscos ao ambiente e os perigos de operação, ROSSI e UNFRIED (1997) afirmam que o H_2O_2 é um produto químico compatível com o ambiente e que este apresenta um mínimo de risco de operação, principalmente quando diluído a concentrações abaixo de 8% (geralmente os "Scrubber" operam com solução de 3%).

2.5.2 - Técnicas de Combustão

As técnicas de combustão evoluem a medida que os mecanismos que governam a formação de NO_x são desvendados. Essas técnicas fundamentam-se na forma pela qual os poluentes nitrogenados são formados para poderem agir combatendo os fatores que favorecem cada mecanismo. Saber se os óxidos de nitrogênio são formados por um mecanismo ou por outro permite que o projeto de queimadores e câmaras de combustão possam ser realizados garantindo o mínimo de emissão.

Uma vez conhecido os mecanismos de formação de NO_x pode-se dividir as técnicas de combustão em três tipos básicos: queima com recirculação de gases de exaustão; queimadores de pré-mistura; e queimadores de baixo NO_x . Existem ainda um queimador de mistura rápida que consegue atingir baixíssimos níveis de NO_x e que se vale da combinação de algumas dessas técnicas citadas e o uso de injeção de água ou vapor para diminuir a temperatura na câmara.

2.5.2.1 - Recirculação de Gases de Exaustão

Segundo COSTA *et al.* (1996) a recirculação de gases de exaustão (do inglês "Flue Gas Recirculation - FGR") é um dos métodos mais usados na redução de NO_x . Este método baseia-se na recirculação de parte dos gases de exaustão, fazendo com que ele retorne através de um duto externo ao ponto de ignição. Neste percurso os produtos da combustão são então resfriados e em seguida misturado com ar fresco (RUÃO *et al.*, 1997). O resfriamento da porção recirculada somada a deficiência de oxigênio dentro da câmara provoca a diminuição do pico de temperatura reduzindo a formação de NO_x térmico.

A grande desvantagem da recirculação de gases de exaustão é o efeito que esta causa na estabilidade de chama, provocando com isso um aumento da emissão de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (COSTA *et al.*, 1996; BALTASAR *et al.*, 1997). RAO (1991) mostra que igual eficiência na redução de NO_x é atingida aumentando-se simultaneamente a taxa de recirculação e o excesso de ar. Entretanto MUZIO e QUARTUCY (1997) revelam que com uma taxa de recirculação de até 30% a estabilidade da chama não é afetada, porém acima desta pode-se haver uma perda na eficiência de queima.

COSTA *et al.* (1996) variando o tipo de combustível (propano e etileno) e os níveis de excesso de ar (1%, 7% e 14%), estudou em escala de laboratório a influência da taxa de recirculação de gases de exaustão na estabilidade de chama, performance da combustão e emissão de poluentes, concluindo que:

- Em ambos os combustíveis o aumento da taxa de recirculação provocou queda na emissão de NO_x ;
- A queda na emissão de NO_x não comprometeu a performance da combustão no que se refere a estabilidade de chama, eficiência de queima e emissão de CO;
- Nas condições de teste e com os referidos combustíveis observa-se uma taxa de recirculação ótima que reduz simultaneamente NO_x , CO e hidrocarbonetos não queimados;

- Atinge-se estabilidade de chama para taxas de recirculação de até 30% no caso do propano e de 50% para o etileno;

Consegue-se com essa técnica operar com baixos níveis de excesso de ar e com menor temperatura de combustão, evitando-se com isso o NO_x térmico.

2.5.2.2 - Queimadores com Pré mistura

DÖBBELING *et al.* (1996 e 1997) estudando a queima de gás combustível proveniente da gaseificação do carvão desenvolveu dois tipos de queimadores com pré mistura visando alcançar os mesmo níveis de emissão de NO_x obtido na queima de gás natural. O gás obtido na gaseificação é uma mistura de H_2 , CO e N_2 além de outros gases.

Nos queimadores com pré mistura, combustível e ar são misturados antes da ignição numa razão estequiométrica combustível/ar de aproximadamente 0,5 com relação as condições estequiométricas. Com isso consegue-se diminuir a máxima temperatura de chama para valores abaixo de 1800 K, minimizando a formação de NO_x térmico (DÖBBELING *et al.*, 1997).

A desvantagem destes queimadores refere-se a possibilidade de ocorrer chama reversa na região de pré mistura, caso o volume desta área seja suficiente para ocorrer a ignição (ALTPFART e CHRISTMAN, 1995).

2.5.2.3 - Queimadores de Baixo NO_x

Uma das técnicas que mais vem evoluindo nas últimas décadas no que se refere ao controle da formação de NO_x em câmaras de combustão, sem que para isso ocorra perda de eficiência da queima, é o uso de Queimadores de Baixo NO_x - QBN (do inglês "Low NO_x Burner - LNB"). Este tipo de queimador merece particular atenção, pois o desenvolvimento desta técnica, esta

intimamente ligado a evolução dos trabalhos que estudam a interação entre mecanismos químicos e fenômenos físicos na formação do NO_x em processos de combustão.

O início dos anos 70 marca o desenvolvimento dos primeiros QBN. MUZIO e QUARTUCY (1997) citam HEAP *et al.* (1972) o qual apresenta o projeto de um queimador desenvolvido no "IFRF" (do inglês "International Flame Research Foundation") que foi patrocinado pela EPA americana com o intuito de estudar a formação de NO_x em chamas de difusão turbulenta. Os experimentos foram realizados em uma câmara de escala piloto e relacionavam a emissão de NO_x com parâmetros do queimador, tais como:

- Método de injeção do combustível;
- Grau de rotação do ar de combustão;
- Velocidade do ar de combustão;
- Ângulo de saída do bocal;
- Tipo de bocal;
- Grau de diluição do combustível (carvão pulverizado) no ar de combustão primário.

Segundo MUZIO e QUARTUCY (1997) o conceito atual de queimador de baixo NO_x foi proposto TAKAHASHI *et al.*, (1982), citado pelo primeiro, conforme o conceito MACT (do inglês "Mitsubishi Advanced Combustion Technology").

Os queimadores de baixo NO_x são projetados de forma que a entrada tanto de ar como de combustível provoquem a formação de uma Zona Central de Recirculação (figura 2.4) com mistura rica em combustível (JAWORZNO..., 1995; ALTPFART e CHRISTMAN, 1995; BEÉR, 1996; MUZIO e QUARTUCY, 1997; VAN DER LANS, 1997; SANDELL, 1998). Esta região pobre em oxigênio é formada pela injeção de combustível através de um lança central que

promove a injeção axial do mesmo na ZCR. O oxigênio necessário para a combustão é então injetado, por meio de escoamento com rotação do ar secundário, na região posterior a ZCR.

O controle da emissão de NO_x nestes queimadores se dá por em duas etapas:

- Na ZCR, onde a temperatura é alta devido a recirculação de gases quente (VAN DER LANS *et al*, 1997), não ocorre formação de NO_x térmico, pois há deficiência de oxigênio (MILLER e BOWMAN, 1989);
- Na região posterior a ZCR, onde a temperatura é baixa e a concentração de oxigênio é alta devido a injeção de ar secundário (VAN DER LANS *et al*, 1997), também não ocorre a formação de NO_x térmico em virtude da baixa temperatura (MILLER e BOWMAN, 1989).

Baixo excesso de ar é uma característica, mas não uma regra em queimadores de baixo NO_x . Segundo COE (1980) alguns projetos de queimadores operam com alto nível de excesso de ar acoplado com um também alto nível de rotação do escoamento, a fim de manter a estabilidade da chama. Para operar com baixo excesso de ar, estes queimadores aumentam o efeito da rotação do escoamento. Entretanto, neste caso ocorre a formação de uma grande zona de alta intensidade de chama e aumento nos níveis de emissão de NO_x , em relação a queima com menor efeito de rotação e maior excesso de ar.

Quanto a eficiência desses queimadores no controle da formação de NO_x SANDELL (1998) afirma que em relação aos queimadores tradicionais os QBN podem reduzir a emissão entre 20 e 60%.

As diferenças entre os QBN esta na forma pela qual o combustível é injetado e na geometria do gerador de rotação para o ar secundário.

O escoamento com rotação pode ser gerado por dispositivos tais como: entrada tangencial e axial de ar num duto circular (figura 2.6); utilização de blocos moveis (figura 2.7) (BEÉR e CHIGIER, 1972); ou através de aletas direcionais (VAN DER LANS, 1997).

Segundo SANDELL (1998) os queimadores de baixo NO_x têm um custo de equipamento alto, porém seus gastos com manutenção são baixos.

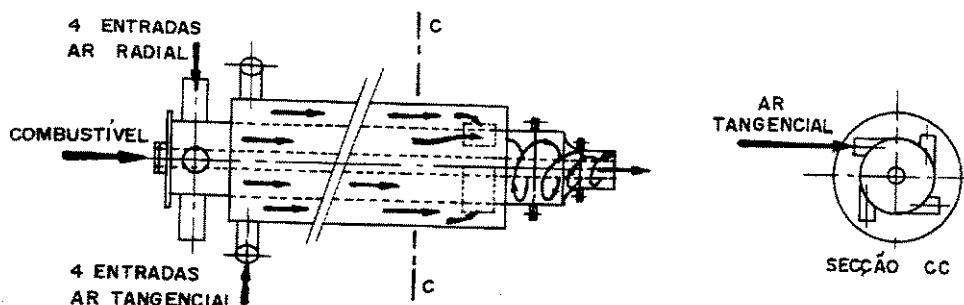


FIGURA 2.6 - Gerador de escoamento com rotação por entrada tangencial e axial de ar (BEÉR e CHIGIER, 1972. p.108)

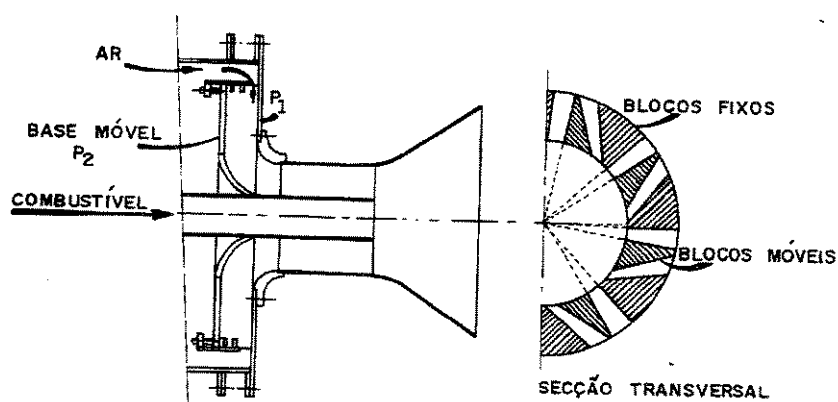


FIGURA 2.7 - Gerador de escoamento com rotação por blocos móveis (BEÉR e CHIGIER, 1972. p.108)

2.5.2.4 - Queimador de mistura rápida

A Radian Corporation (Austin, Texas - EUA) iniciou em 1993 o desenvolvimento de um queimador industrial baseado nas relações entre temperatura, estequiometria e NO_x . Desenvolvido para queimar gás ou óleo combustível, o queimador de mistura rápida (do inglês

"Rapid Mix Burner - RMB") conseguiu diminuir a emissão de NO_x para níveis abaixo de 10 ppm. Os detalhes deste queimador são descritos por ALTPFART e CHRISTMAN (1995). A figura 2.8 mostra um esquema e do princípio de operação do queimador de mistura rápida.

Assim como os queimadores de baixo NO_x , o queimador de mistura rápida, que pode também ser chamado de queimador de ultra baixo NO_x , considera o NO_x térmico como a maior fonte de óxidos de nitrogênio na queima de gás natural e combustíveis nitrogenados. Sabe-se que, segundo HAYHURST e VINCE (1980), a rota do NO_x térmico pode ser controlada diminuindo-se os picos de temperatura da chama.

Entretanto para atingir níveis de emissão de NO_x abaixo de 10 ppm, o mecanismo de NO_x imediato deve também ser considerado. A formação da zona de mistura rica em combustível em QBN promove a combustão incompleta nesta região. Com isso radicais hidrocarbonetos (CH_i) são produzidos iniciando a rota do NO_x imediato (ver capítulo 2.3.1.2).

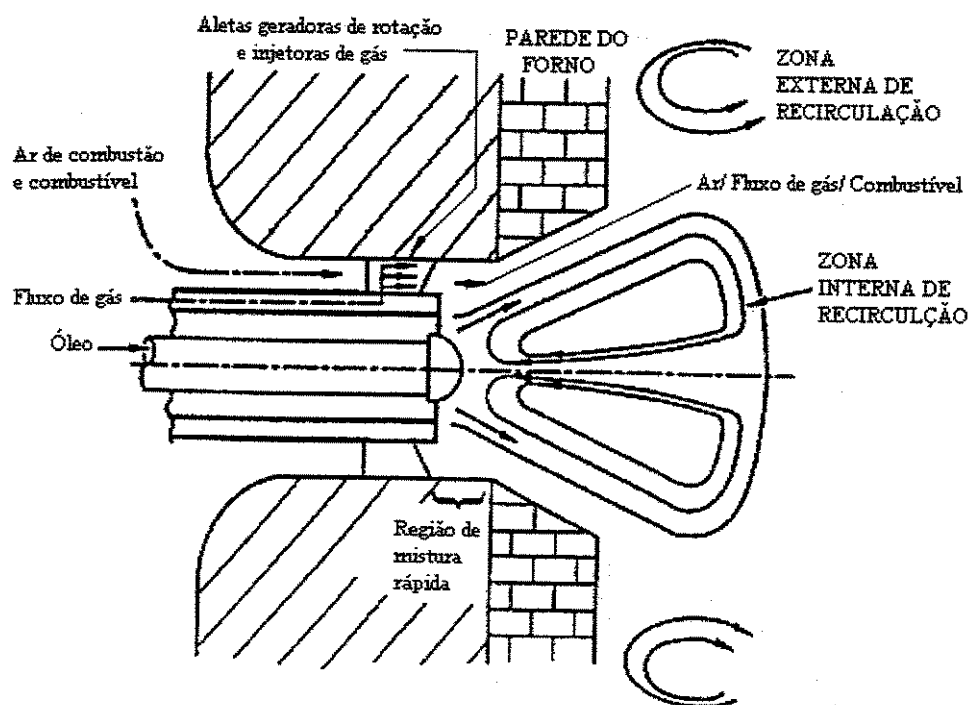


FIGURA 2.8 - Princípio de operação do queimador de mistura rápida (ALTPFART e CHRISTMAN, 1995, p.29).

Segundo ALTPFART e CHRISTMAN (1995) em condições de mistura rica onde a razão combustível/ar esta abaixo de 0,6 (em relação a estequiometria) tanto HCN quanto NH_3 (produtos do NO_x imediato) são formados pela reação entre os radicais CH_i e o N_2 . Quando a razão combustível/ar é menor que 0,5 praticamente todo NO_x formado provém do NO_x imediato.

Em queimadores de baixo NO_x cerca de 20 ppm de NO_x imediato são formados na região de mistura rica em combustível. Esses 20 ppm não são destruídos no decorrer do processo limitando então a eficiência dos QBN no combate a formação NO_x . Não se consegue, segundo ALTPFART e CHRISTMAN (1995), alcançar níveis de emissão de óxidos de nitrogênio abaixo de 10 ppm em queimadores de baixo NO_x .

Desta forma a Radian Co entendeu que para alcançar baixíssima emissão de NO_x deveria evitar primeiramente a formação da zona de mistura em combustível, que poderia formar NO_x imediato. Em seguida, o projeto do queimador de mistura rápida precisaria diminuir a temperatura de chama a fim de reduzir o NO_x térmico.

A formação da zona de mistura rica em combustível foi evitada realizando uma eficiente mistura ar/combustível próximo a saída do queimador. Essa mistura perfeita aumenta a eficiência de queima, reduzindo a formação de radicais CH_i e consequentemente a formação de NO_x imediato.

A recirculação de gases de exaustão foi utilizada no projeto para controlar a temperatura de chama da combustão, reduzindo o NO_x térmico. Essa porção de gás recirculado é injetado com ar de combustão num ponto antes do bocal do queimador.

A mistura da porção de gás recirculado com o combustível se dá por meio de aletas fixadas na parte externa da lança de combustível. Existe na base das aletas cavidades que promovem a injeção de combustível. Este esquema promove uma mistura perfeita entre as fases antes do ponto de ignição. Um fluxo de ar secundário surge quando a escala de queima ultrapassa 30 GJ/h.

Esse queimador muito se parece com um queimador de pré mistura. Entretanto possui uma importante distinção. No queimador de mistura rápida, o volume da região onde ocorre a pré mistura é pequeno, o que evita a formação de chama reversa. A rápida mistura ocorrida neste queimador, promove uma alta estabilidade de chama.

2.5.2.5 - Injeção de Água ou Vapor

Um meio simples usado para controlar a emissão de NO_x é a injeção de água ou vapor na zona de combustão da câmara. Segundo RAO (1991) os dados da época não ofereciam confiabilidade quanto ao seu uso em caldeiras, entretanto alguns resultados obtidos em turbinas a gás mostram um grande potencial para esta técnica.

O princípio básico da injeção da água ou do vapor é a redução que esta causa na temperatura da combustão, controlando com isso o NO_x térmico. RAO (1991) diz que a injeção de 5 a 10% (em relação ao fluxo de gases) de água ou vapor, pode em determinadas condições diminuir o nível de temperatura da fornalha, da mesma forma que ocorreria usando a técnica da recirculação de gases de exaustão (2.5.2.1).

A desvantagem deste método de controle de NO_x é a possível instabilidade de chama que resultaria numa perda de eficiência de queima.

2.6 - Objetivo do Trabalho

Visando o estudo da interação entre mecanismos químicos e fenômenos físico relativo ao escoamento com rotação, pretende-se neste trabalho monitorar a formação de NO_x em uma câmara de combustão cilíndrica utilizada por BIZZO (1997).

O estudo será realizado observando a formação das zonas de recirculação promovidas pelo escoamento com rotação e o perfil de concentração de NO_x nestas regiões. Pretende-se identificar o mecanismo responsável pela formação do NO_x em cada uma das regiões.

O queimador a ser utilizado é do tipo blocos móveis apresentado por BEÉR e CHIGIER (1972) (figura 2.7). Este queimador promove a distribuição do ar de combustão de modo a gerar movimento com rotação.

Será também monitorado a eficiência de combustão através de medidas de concentração do monóxido de carbono (CO).

Acredita-se que através da otimização do número de rotação, pode-se minimizar simultaneamente as emissões de NO_x e CO (COSTA *et al.*, 1996).

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A descrição da bancada é apresentada por BIZZO (1997) e adaptada a este trabalho.

3.1 - Fluxograma do 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. No entanto, não foi utilizado neste trabalho a linha de combustível líquido vaporizado. Os produtos de combustão saem da fornalha por um duto de exaustão, onde são resfriados rapidamente por um lavador e então succionados por um exaustor para a chaminé de descarga de gases que os lança para fora do laboratório. O fluxograma original da câmara com a linha de combustível líquido bem como a vista geral da bancada são mostrados nas figuras 3.1 e 3.2 respectivamente. Já a figura 3.3 mostra um esquema da câmara de combustão após as modificações.

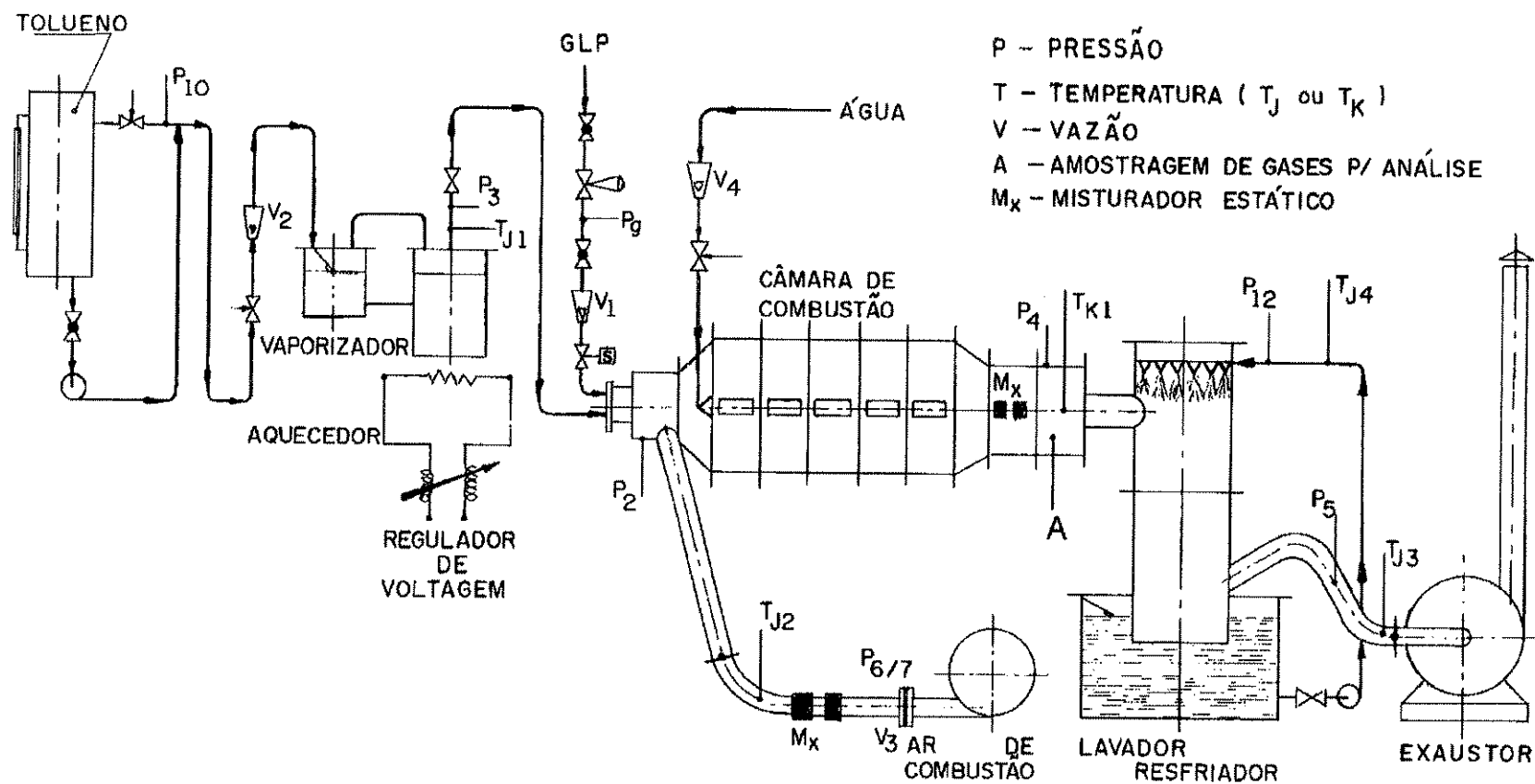


FIGURA 3.1 - Fluxograma do processo e instrumentação da bancada original.

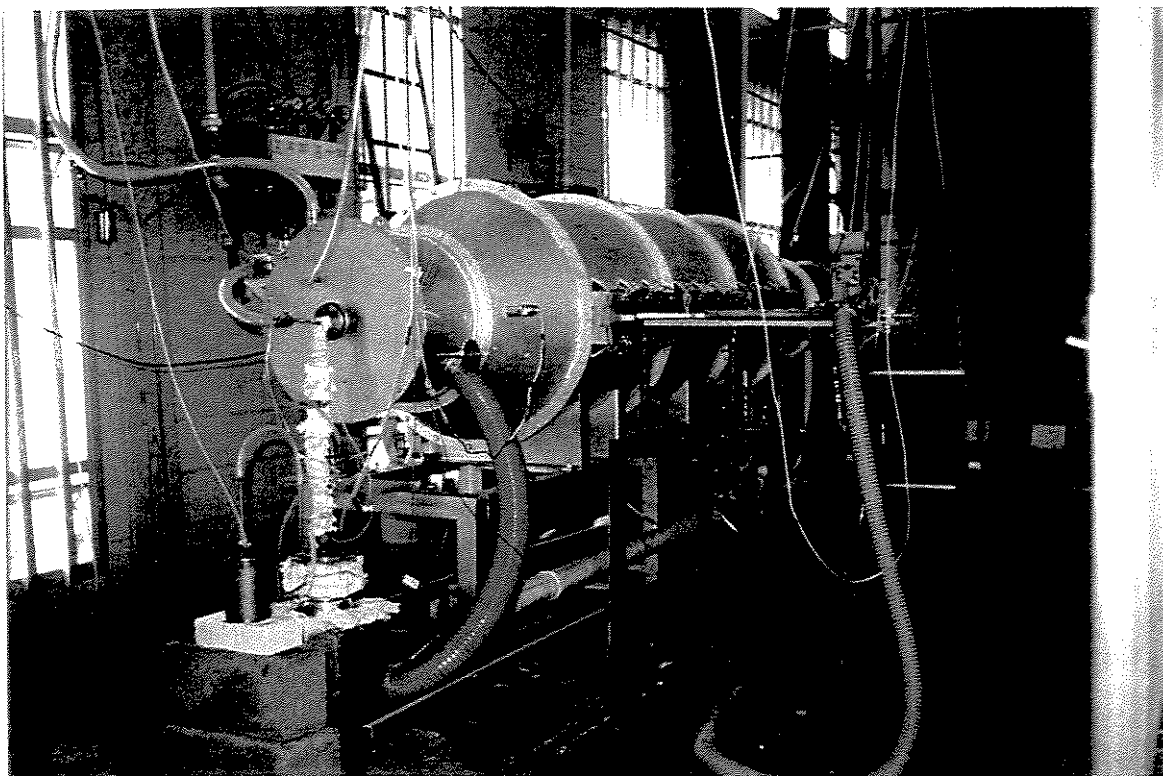


FIGURA 3.2 - Vista geral da bancada experimental.

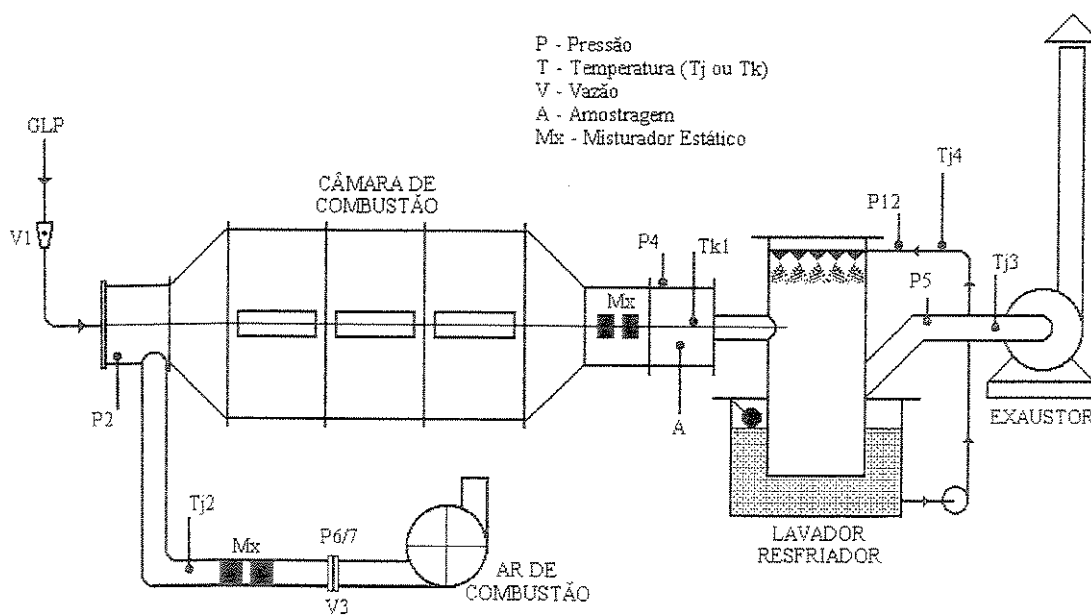


FIGURA 3.3 - Fluxograma do processo e instrumentação da bancada modificada.

3.2 - Fornalha de Testes

A câmara de combustão tem formato cilíndrico com 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 um comprimento de 1800 mm. As dimensões da câmara foram adotadas de maneira que as sondas de medição de temperatura 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 com espessura de 150 mm. Na lateral da fornalha, em cada módulo, foi construído uma abertura retangular com dimensões 50 x 500 mm que permite a inserção de sondas para medição de temperatura 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 3.4 apresenta um esquema da fornalha com suas dimensões principais. Existe ainda um carrinho para apoio das sondas de temperatura e amostragem de gases. O carrinho corre sobre trilhos nivelados na lateral da fornalha.

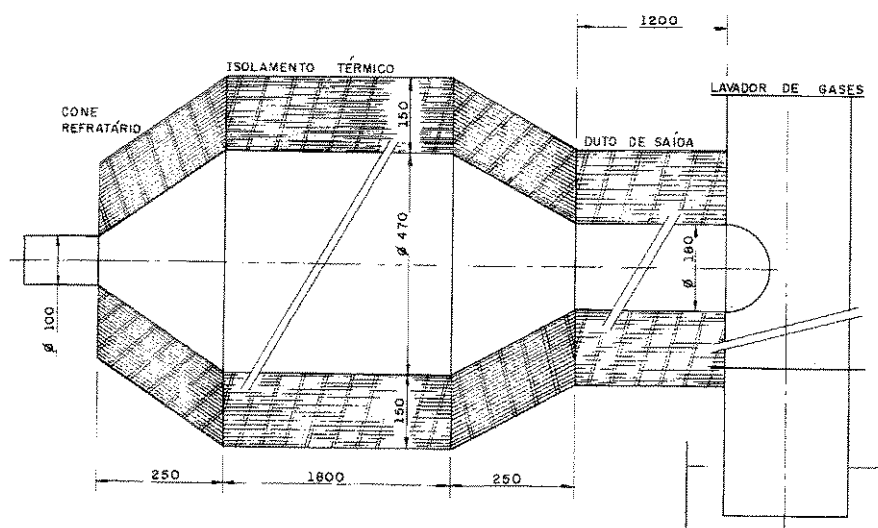


FIGURA 3.4 - Dimensões principais (em mm e sem escala) da câmara de combustão.

3.3 - Queimador

O queimador com número de rotação variável é construído com blocos direcionais, em aço inoxidável, conforme BEÉR E CHIGIER (1972). O número de rotação da fornalha é regulado 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 3.5 apresenta o sistema de blocos móveis. A figura 3.6 mostra o esquema do conjunto do queimador.

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

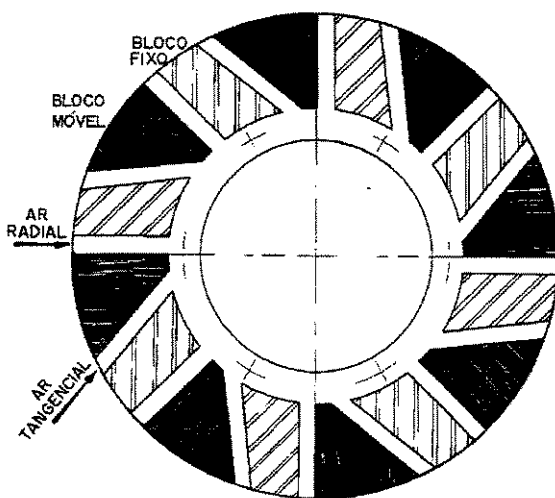


FIGURA 3.5 - Sistema de blocos móveis para regulação do número de rotação.

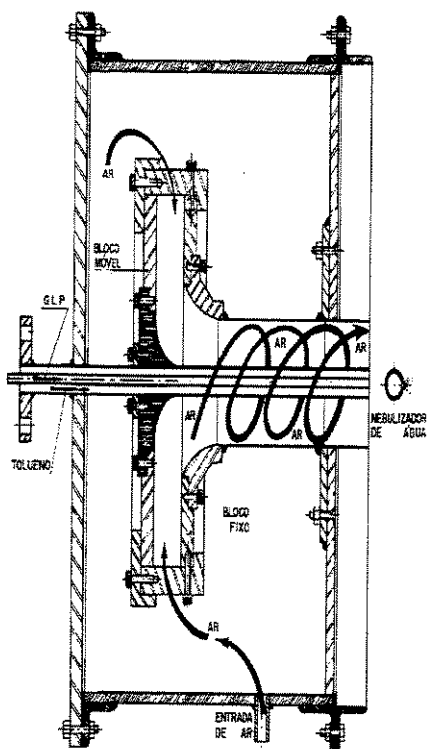


FIGURA 3.6 - Queimador com gerador de rotação do ar de combustão (não foram utilizados a injeção de tolueno e nem de água nebulizada).

3.4 - Linha de Exaustão dos Gases de Combustão

O duto da linha de exaustão dos gases 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 seção da sonda de amostragem.

Os produtos de combustão são resfriados rapidamente por um lavador úmido de gases. Os gases são então 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 regulação da pressão interna da câmara próxima de zero.

3.5 - Descrição da Instrumentação

3.5.1 - Medidores de Vazão, Temperatura e Pressão

Os instrumentos utilizados na bancada experimental e suas características estão listados nas tabelas 3.1 a 3.4.

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	ar de combustão	Placa de orifício d/D = 0,77	Até 550 kg/h	0,8%	laboratório norma ISO 5167, ed. 1980
V3	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

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	Produtos de combustão - saída da fornalha	K	+/- 1%	3 mm, inconel	Robert Shaw
T3	Produtos de combustão - saída do lavador	J	+/- 4°C	3 mm, inox 316	Robert Shaw
T4	Produtos de combustão - em chama - pirômetro de sucção	S	+/- 0,5%	0,35 mm, tubo capilar 99% Al ₂ O ₃	Robert Shaw
T5	Produtos de combustão - saída do resfriador do pirômetro de sucção	J	+/- 4°C	1,6 mm, inox 316	Robert Shaw
T6	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	HP	Plotter

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
P4	Produtos de combustão - saída da fornalha	coluna de água	0 a 150 mm	1 mm
P5	Produtos de combustão - saída do lavador	coluna de água	0 a 500 mm	1 mm
P6	Água de recirculação do lavador-resfriador	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	
P7	Produtos de combustão - saída do pirômetro de sucção	coluna de água	0 a 1000 mm	
P8	Água de refrigeração do Pitot 5 furos	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	
P9	água de refrigeração da sonda de amostragem de gases	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	
P10	Água de refrigeração do pirômetro de sucção	Bourdon	0 a 10 kgf/cm ²	
P12	Câmara de combustão	inclinado	10 mm	0,2 mm

Os medidores que aparecem nas figuras e não são mencionados nas tabelas, referem-se a linha de tolueno e água nebulizada, não usados neste trabalho.

3.5.2 - 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 3.7 apresenta um desenho esquemático do pirômetro, enquanto a figura 3.8 mostra o fluxograma do sistema de sucção do pirômetro.

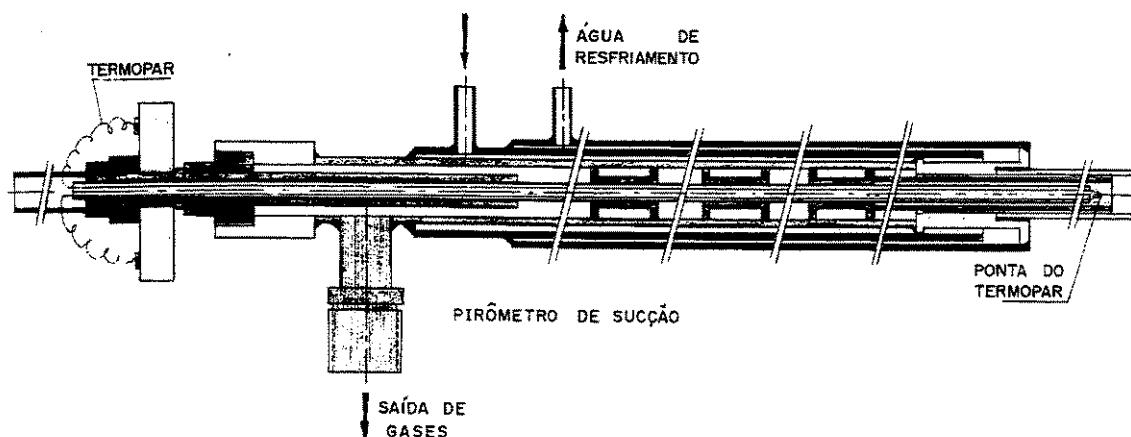


FIGURA 3.7 - Pirômetro de sucção.

Para minimizar o erro de medição da temperatura do gás, CHEDAILLE e BRAUD (1972) recomendam velocidade de sucção da ordem de 100 a 200 m/s ou fluxos de sucção da ordem de $50 \times 10^3 \text{ kg/m}^2\text{h}$. Nas dimensões escolhidas no presente projeto, operou-se com taxa de sucção de $70 \times 10^3 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 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.

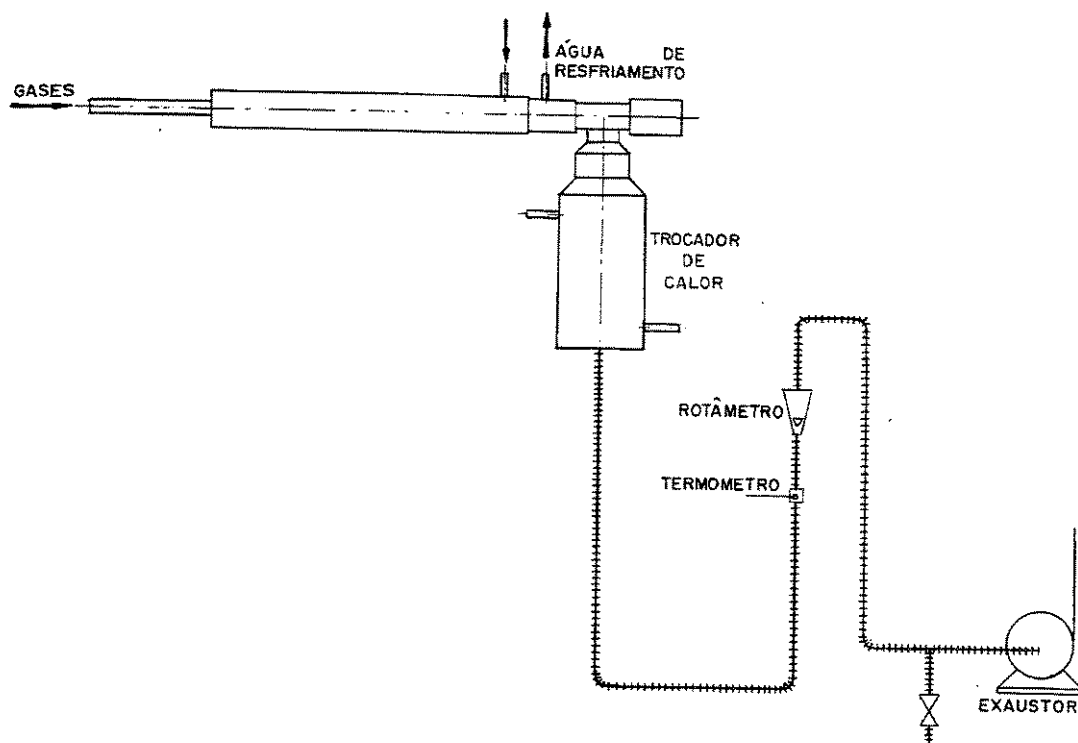


FIGURA 3.8 - Fluxograma do sistema de sucção do pirômetro.

3.5.3 - 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 de modo que a composição da mistura não varie significativamente em relação ao ponto de amostragem no interior da câmara. Empiricamente foi estimado por CHEDAILLE e BRAUD (1972) 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 é da ordem de 30 mm.

Utilizou-se 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 é feita por uma bomba de diafragma e o gás de amostra é enviado a um pequeno recipiente que permite o envio a cada um dos analisadores de gases: NO_x , O_2 e CO . A figura 3.9 apresenta um desenho esquemático de fabricação de uma das sondas.

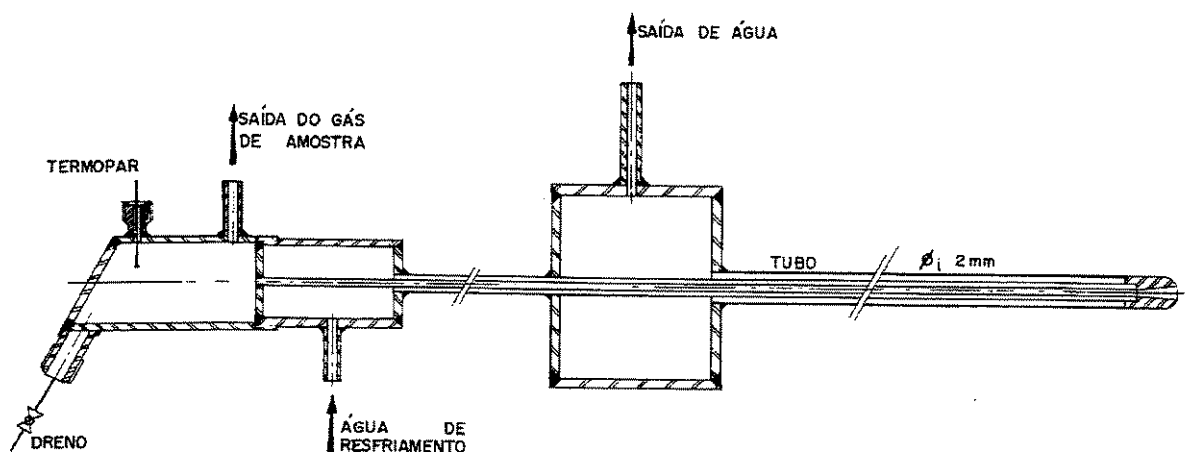


FIGURA 3.9 - Sonda de amostragem dos gases de combustão.

A figura 3.10 mostra o fluxograma do sistema de amostragem dos gases. O sistema possui uma válvula de alívio que permite regular a pressão no recipiente pressurizado. Todos os analisadores de gases também possuem suas próprias bombas de sucção, porém operando com vazões diferentes em cada analisador. A bomba de amostragem da sonda opera com vazão nominal de 5 litros/minuto. As características principais de cada analisador são apresentados na tabela 3.5. A calibração do analisador de NO_x (analisador Horiba) foi realizada usando-se um gás padrão de 941 ppm adquirido comercialmente.

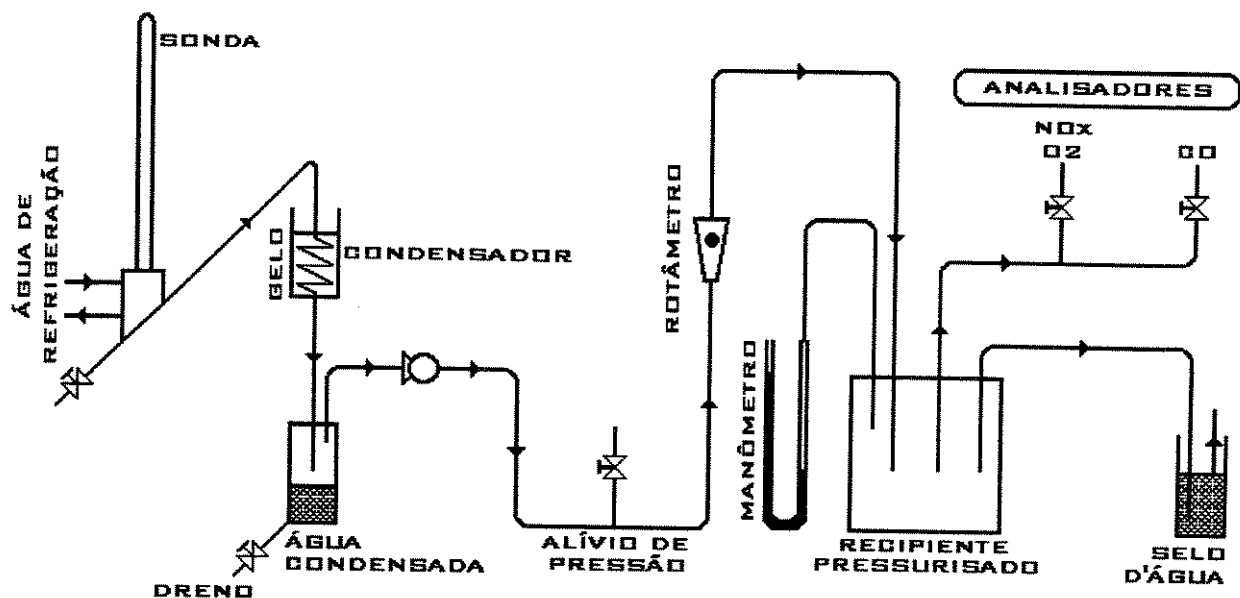


FIGURA 3.10 - Fluxograma do sistema de amostragem dos gases.

Tabela 3.5 - Características principais dos analisadores de gases.

Gás	Fabricante	Modelo	Sensor	faixa de medição	Precisão	Amostragem
NO _x	Horiba	ENDA-1400	Infravermelho não dispersivo	0 a 25%	+/- 0,012% (em volume)	Contínua 3 l/min
CO	Telegan	TEMCO	Célula eletroquímica	0 a 2000 (ppm)	+/- 5% (valor lido)	Contínua 700 ml/min
O ₂	Horiba	ENDA-1400	Paramagnético	0 a 25%	+/- 0,012% (em volume)	Contínua 3 l/min

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Antes de iniciar os testes foi necessário um longo período para se realizar a manutenção da bancada, que se encontrava parada a mais de dois anos, a fim de solucionar alguns problemas ocorridos em testes passados.

4.1 - Preparação e Recuperação da Bancada

Dentre os problemas que foram solucionados, inclui-se o lavador resfriador dos gases de exaustão que foi totalmente desmontado e alterado para que pudesse controlar efetivamente a temperatura dos gases na chaminé. Trocou-se o distribuidor de água por outro que oferecesse maior dispersão. Este arranjo não teve sua eficiência comprovada no início dos testes exigindo a busca por melhor solução rapidamente. Foi então montado no ducto de saída dos gases do lavador um outro bico pulverizador e substituído o já existente para que se conseguisse uma maior área de contato entre a água e os gases de exaustão.

O período de preparação da câmara para os testes contou ainda com problemas menores tais como: substituição dos termopares, reinstalação das linhas de manômetros, recuperação do eletrodo responsável pela ignição, construção de outra linha de gás combustível (GLP) uma vez

que a existente tinha sido deteriorada, calibragem do analisador de gases da marca HORIBA e projeto de uma nova bancada para análise dos gases, que garantisse um eficiente selo contra a entrada de ar falso.

4.3 - Variáveis de Operação

Os testes foram realizados de forma a possibilitar conclusões plausíveis a respeito do processo de combustão e suas emissões. Tempo de residência, temperatura e o grau de mistura entre ar e combustível, são os três principais parâmetros da combustão, os quais foram levados em consideração durante o planejamento dos experimentos.

O efeito do tempo de residência não foi analisado neste trabalho. Para que não houvesse o risco deste parâmetro comprometer os resultados dos testes, fixou-se em cerca de 2 segundos o tempo de residência médio para todos os testes. No cálculo das vazões necessárias para este tempo de residência, a vazão de GLP foi desprezada por representar menos que 4% da vazão total em condições de testes. Os testes foram realizados em condições de alto excesso de ar, o que minimiza ainda mais a participação da vazão de combustível (GLP) na vazão total da mistura.

O efeito da temperatura foi estudado realizando-se os testes em duas condições de temperatura dos gases de saída da câmara: 1000 e 1175 °C. As temperaturas foram escolhidas usando-se de critérios tais como: garantia da combustão; variação suficiente que permitisse notar a influência da temperatura; preservação da bancada e da instrumentação e segurança no processo de operação e amostragem.

Por fim o grau de mistura foi estudado considerando-o função direta do número de rotação aplicado ao fluxo do ar de combustão. Da mesma forma que BIZZO (1997) operou-se com número de rotação que variou de 0,364 a 1,463.

Outras variáveis foram controladas a fim de garantir o não comprometimento da bancada e dos resultados.

A pressão da câmara foi mantida nula para que evitasse a entrada de ar falso, no caso de pressão negativa, e nem excessiva perda de calor, no caso de pressão positiva.

A temperatura dos gases na saída do lavador foi controlada para que não ocorresse o comprometimento do exaustor no caso de alta temperatura, e nem a condensação de vapor antes da chaminé no caso de temperatura baixa. A condensação do vapor antes da chaminé é prejudicial pois provoca acúmulo d'água na voluta do exaustor centrífugo.

Manteve-se a pressão positiva no sistema de amostragem de gases a fim de evitar a entrada de ar falso e também como forma de monitorar o entupimento da sonda e/ou da linha de amostragem. Verificou-se inúmeras vezes o bloqueio do sistema de amostragem (sonda e linha) pela queda de pressão observada no manômetro, que chegava a valores negativos uma vez que independente do entupimento, os analisadores continuavam a operar succionando os gases do sistema.

O resumo das principais variáveis de controle é mostrado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Principais parâmetros e variáveis de operação.

Parâmetro	Valor Assumido
Temperatura dos gases de exaustão	1000 e 1175 °C
Pressão da câmara	Nula
Pressão no sistema de amostragem	~ 10 mmCA

As condições de operação da câmara de combustão foram monitoradas a fim de garantir que o processo de amostragem estava ocorrendo com a câmara em regime permanente. Em alguns casos as condições foram monitoradas e registradas frequentemente durante toda a duração dos testes. No entanto os primeiros testes revelaram que após o sistema entrar em equilíbrio as condições de operação pouco se alteravam. A prática mostrou que somente a temperatura de saída da câmara e a pressão da câmara sofriam pequenas oscilações. Desta forma

passou-se a registrar as variáveis de operação somente no inícios dos teste, que só iniciavam após a câmara entrar em regime, realizando no restante do tempo somente a verificação visual dos seus valores. As pequenas oscilações que ocorriam eram observadas e corrigidas com um mínimo de alteração da vazão de combustível (GLP) e com pequenas mudanças na posição da válvula borboleta que controla a saída dos gases de exaustão.

4.3 - Caracterização do Sistema Experimental

4.3.1 - Combustível

O combustível utilizado foi o gás liquefeito do petróleo (GLP), por se tratar de um gás de fácil obtenção e por não conter na sua composição nitrogênio, o que evita a formação do óxido de nitrogênio pelo mecanismo do NO_x Combustível.

O GLP é composto basicamente por propano (C_3H_8) e butano (C_4H_{10}), com pequenas frações de etano, propeno e buteno, que são desprezadas. Desta forma considerou-se que sua composição em massa é 50 % propano e 50 % butano.

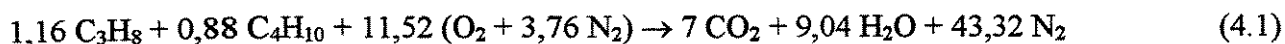
Os valores do poder calorífico superior e inferior (PCS e PCI, respectivamente) e de densidade do GLP são mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Propriedades do GLP.

Propriedade	Valor
PCS	45.932,9 kJ/kg
PCI	42.782,6 kJ/kg
Densidade	2,06 kg/Nm ³

4.3.2 - Estequiometria de Combustão do GLP

A relação estequiométrica da reação de combustão do GLP, para a composição proposta, é apresentada pela equação 4.1.



4.3.3 - Relação Ar/Combustível

A relação em massa Ar/Combustível para a estequiometria proposta pela equação 4.1 é representada pela equação 4.2.

$$\left(\frac{\text{Ar}}{\text{Comb.}} \right)_{\text{massa}} = \phi.15,50 \quad (4.2)$$

onde:

ϕ - coeficiente de excesso de ar.

4.3.4 - Tempo Médio de Residência dos Gases

O tempo médio de residência, que foi fixado em 2 segundos para todos os teste, é dado pela equação 4.3.

$$\bar{t} = \frac{\dot{V}}{V} \quad (4.3)$$

onde:

$\bar{t}$ - tempo médio de residência;

$\dot{V}$ - vazão total dos gases calculado na temperatura de saída da câmara (m^3/s);

V - volume da câmara em m³.

4.3.5 - Potência Específica da Câmara

A potência específica ($\dot{w}_{PCS}$) da câmara de combustão, que é função do poder calorífico superior do combustível, é calculado pela equação 4.4.

$$\dot{w}_{PCS} = \frac{\dot{m}_{GLP} \cdot PCS}{V} \quad (4.4)$$

onde:

$\dot{m}_{GLP}$ - vazão de GLP (kg/s)

Para as duas temperaturas de operação a potência específica média da câmara de combustão é apresentada na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Potência específica da câmara de combustão.

Potência Específica Média da Câmara	
1000 °C	~ 295 kW/m ³
1175 °C	~ 312 kW/m ³

4.3.6 - Número de Rotação (S')

O número de rotação S' para um gerador de rotação de blocos móveis, como utilizado neste trabalho, é calculado pelas equações 4.5 e 4.6, a partir das dimensões do queimador, sendo que estas equações apresentaram boa correlação com resultados experimentais (BEÉR e CHIGIER, 1972):

$$S' = \sigma \cdot \frac{R}{2B} \left[1 - \left(\frac{R_h}{R} \right)^2 \right] \quad (4.5)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{z \cdot \xi_m} \sin \beta \frac{\cos \beta \left[1 + \tan \beta \cdot \tan \left(\frac{\xi}{2} \right) \right] \left(\frac{\xi}{\xi_m} \right)}{\left\{ 1 - \left[1 - \cos \beta \left(1 + \tan \beta \cdot \tan \left(\frac{\xi}{2} \right) \right) \right] \frac{\xi}{\xi_m} \right\}} \quad (4.6)$$

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 4.6

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.

A câmara de combustão cilíndrica, projetada por BIZZO (1997) e utilizada neste trabalho apresenta um mecanismo de roscas paralelas que promove o movimento do bloco móvel do queimador alterando o número de rotação. Este mecanismo apresenta uma relação que permite relacionar o número de fios de rosca com o seu respectivo número de rotação. A tabela 4.4 mostra a relação entre a posição da rosca e o número de rotação para os valores de S' estudados neste trabalho.

Tabela 4.4 - Relação entre a posição na rosca e o número de rotação do queimador.

Posição (números de roscas)	Número de Rotação Efetivo (S')
7	0,364
9	0,488
12	0,684
15	0,887
17	1,027
19	1,170
21	1,315
23	1,463

4.4 - Experimentos Realizados

Os testes foram divididos em duas etapas correspondendo as duas temperaturas de saída dos gases (1000 e 1175 °C).

Para cada uma das temperaturas realizou-se os seguintes testes:

- Variação do número de rotação (S'): nas condições de operação, variou-se o número de rotação para os valores apresentados na tabela 4.1, enquanto uma sonda de amostragem fixada no final da câmara, coletava amostras para análise de concentração de NO_x, O₂ e CO, nos gases de exaustão;
- Perfil de concentração: dentre os oito valores de número de rotação aplicado ao escoamento escolheu-se dois onde foram levantados, através da sonda de amostragem móvel, os perfis de concentrações de NO_x, O₂ e CO no interior da câmara de combustão;

- Perfil de temperatura: nos mesmos dois números de rotação escolhidos para a construção dos perfis de concentração, levantou-se através do pirômetro de sucção os perfis de temperatura no interior da câmara.

Não foi possível o levantamento do perfil de concentração de CO a 1175 °C, devido a saturação do analisador de CO (TEMCO), que impossibilitava a coleta de valores confiáveis.

Os perfis levantados no interior da câmara foram construídos considerando-se que os mesmos eram simétricos em relação ao eixo axial central. Desta forma as medidas foram realizada somente em uma das metades (em relação ao eixo axial central) da câmara de combustão.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados aqui apresentados, seguem uma sequência a fim de possibilitar uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos na fluidodinâmica de uma câmara de combustão cilíndrica com injeção de ar através de jatos com rotação. O tempo de residência foi fixado em cerca de dois segundos.

Foi levantado a relação entre o número de rotação e os níveis de emissão na câmara, que entre outras coisas, permitiu a escolha das condições de operação para a construção dos perfis de concentração e temperatura no interior da câmara de combustão.

Os perfis de concentração de O_2 e de CO , foram levantados para que se tivesse uma idéia da forma do escoamento e do processo de combustão. O perfil de temperatura, que está intimamente ligado ao perfil de concentração de O_2 , permite a comparação com o perfil de concentração do NO_x a fim de estudar o mecanismo de formação deste último no interior da câmara de combustão cilíndrica com injeção de ar através de jatos com rotação.

O efeito da temperatura de operação é observada em cada um dos parâmetros apresentados, uma vez que os testes foram realizados em duas temperatura distintas (1000 e 1175 °C). A

exceção se dá no perfil de CO, que devido falha no analisador TEMCO, não teve seu perfil avaliado a 1175 °C.

A tabela 5.1 mostra os valores médios das condições de operação da câmara de combustão nos teste a 1000 e 1175 °C.

Tabela 5.1 - Condições de operação da câmara.

Temperatura	1000 °C	1175 °C
Excesso de ar	65 %	19 %
Relação (Ar/Comb.) _{massa}	25,5	18.4
Tempo de residência	2 s	2 s
Potência específica	295 kW/m ³	312 kW/m ³

5.1 - Número de rotação

As relações existentes entre as emissões de NO_x, O₂ e CO e o número de rotação, para duas temperaturas de operação são mostradas pelas figuras 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente. A emissão de NO_x foi a que se mostrou mais dependente do número de rotação, além de apresentar a mesma tendência nas duas temperaturas. Observa-se na figura 5.1 que a formação de NO_x é alta em número de rotação baixo para ambas as temperaturas. Entretanto a formação de NO_x se mantém constante e relativamente baixa, independentemente da temperatura, para valores de S' intermediários. Desta forma, pode-se dizer que existe uma faixa para o número de rotação, onde as emissão de NO_x se mantém em valores mínimos e constantes, independente da temperatura de operação.

A figura 5.2 revela que a emissão de oxigênio não sofre influência do número de rotação devido o seu volume ser muito maior do que os demais gases formados na combustão. A diferença encontrada entre as curvas, revela o maior excesso de ar a 1000 °C. Os valores de

emissão de CO (figura 5.3) revelam certa instabilidade a 1175 °C, enquanto a 1000 °C a emissão mantém-se praticamente constante.

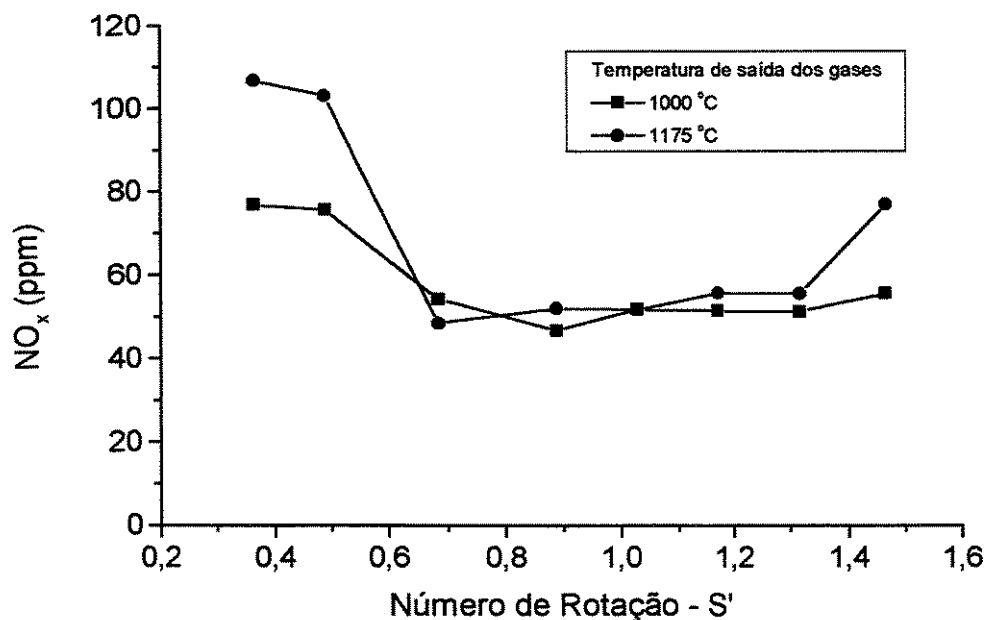


FIGURA 5.1 - Emissão de NO_x em função do número de rotação.

Os valores de S' escolhidos para a construção dos perfis de concentração e de temperatura foram 0,488 e 1,315 por serem representantes das duas regiões observada na figura 5.1: a região de baixo S' e alta emissão de NO_x e a região de número de rotação mais intenso onde as emissões de NO_x permanecem estáveis com relação a S' e praticamente igual em ambas as temperaturas de operação.

Devido ao excesso de ar utilizado na combustão, o oxigênio não pode ser utilizado como um parâmetro químico na reação de queima, mas sim com um indicador da forma com que o escoamento e consequentemente a mistura evoluem no interior da câmara de combustão.

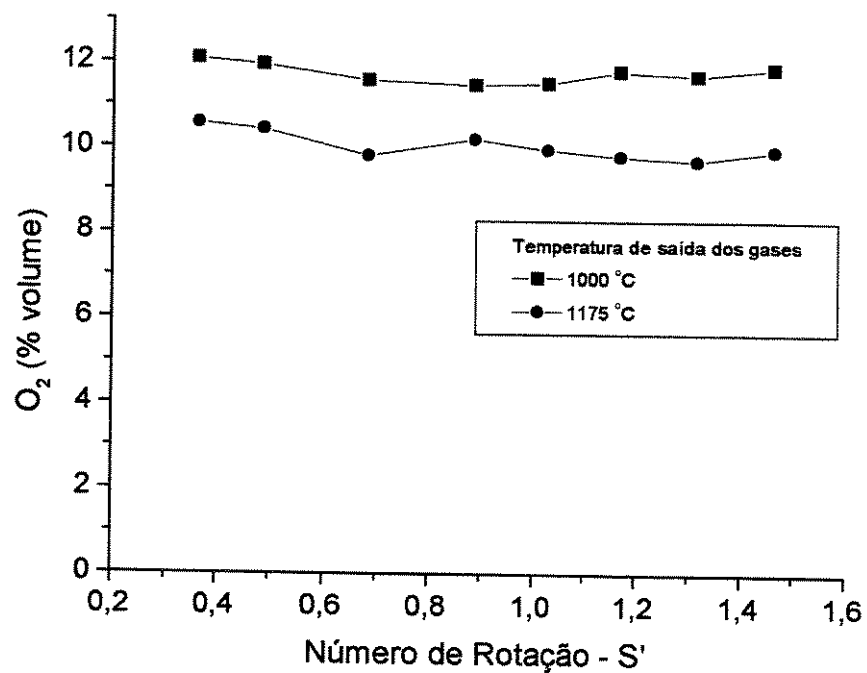


FIGURA 5.2 - Emissão de O₂ em função do número de rotação.

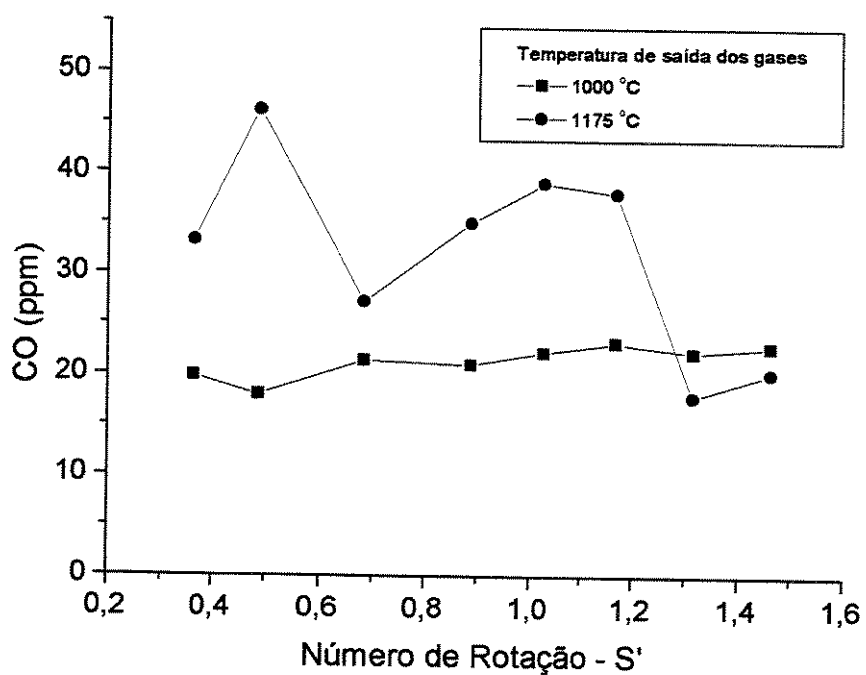


FIGURA 5.3 - Emissão de CO em função do número de rotação.

5.2 - Perfil de concentração de O_2 e CO

Como mencionado na seção 5.1, os perfis de concentração de oxigênio permite que se tenha uma idéia da forma do escoamento no interior da câmara de combustão. É possível através dos perfis de O_2 estimar a intensidade e o tamanho da zona central de recirculação (ZCR). As figuras 5.4 e 5.5 mostram os perfis de concentração de oxigênio a 1000 e 1175 °C, respectivamente, para os dois números de rotação proposto ($S'_1 = 0,488$ e $S'_2 = 1,315$).

Os perfis de concentração de oxigênio não sofrem grandes modificações com relação a temperatura para o número de rotação S'_1 (figuras 5.4a e 5.5a). Observa-se que para este valor de número de rotação a intensidade da recirculação na zona central é baixa, pois a concentração de O_2 neste ponto atinge seu menor valor. Isso se deve possivelmente ao fato de que para este número de rotação o gradiente de pressão gerado pelos jatos com rotação, não é suficientemente alto para possibilitar o surgimento de um fluxo reverso intenso. O tamanho da ZCR é limitado pela região onde o perfil de concentração de O_2 se torna plano. Neste momento tem-se um escoamento do tipo pistonado, caracterizando a região de fluxo desenvolvido. Para ambas as temperaturas o comportamento é o mesmo.

As figuras 5.4b e 5.5b apresentam os perfis de concentração a 1000 e 1175 °C, respectivamente, para o número de rotação mais intenso (S'_2). A 1000 °C, os perfis de concentração (figura 5.4b) revelam um comportamento contrário ao observado para S'_1 (figura 5.4a). Devido a alta intensidade dos jatos com rotação, surge para esta condição um gradiente de pressão responsável por uma elevada taxa de recirculação de ar na ZCR. Este fato é comprovado pelos picos de concentração de O_2 alcançado na região central próximo ao queimador. Ainda a 1000 °C nota-se que a região da zona central de recirculação cresce em relação a S'_1 . Entretanto a evolução do escoamento para um fluxo pistonado também é observado nesta condição. Já a 1175°C os perfis de concentração de O_2 (figura 5.5b) não apresentam grandes variações para o número de rotação S'_2 . Desde o início da câmara a distribuição de concentração de O_2 evolui para um perfil plano, revelando que a combinação de número de rotação alto com alta temperatura de operação pode estar estendendo a ZCR para quase toda a extensão da câmara de combustão.

A formação das regiões de recirculação, em especial a ZCR, é comprovada através de perfis de velocidades para escoamentos com rotação em câmaras de combustão nos trabalhos de KENBAR *et al.* (1995) e BIZZO (1997).

A figura 5.6 mostra o perfil de concentração de CO a 1000 °C, o qual é praticamente o oposto do perfil de concentração de O₂ (figuras 5.4a e 5.4b) tanto para o número de rotação baixo (figura 5.6a) quanto para o número de rotação mais intenso (figura 5.6b).

As altas concentrações de CO nos pontos mais próximos do queimador (figuras 5.6a e 5.6b) foram também comprovadas pelos diversos entupimentos por fuligem que ocorreu tanto na sonda de amostragem quanto no filtro da linha. Entretanto, independentemente do número de rotação as concentrações de CO no final da câmara apresentam valores baixos e muito próximos, além de possuir um perfil de concentração plano.

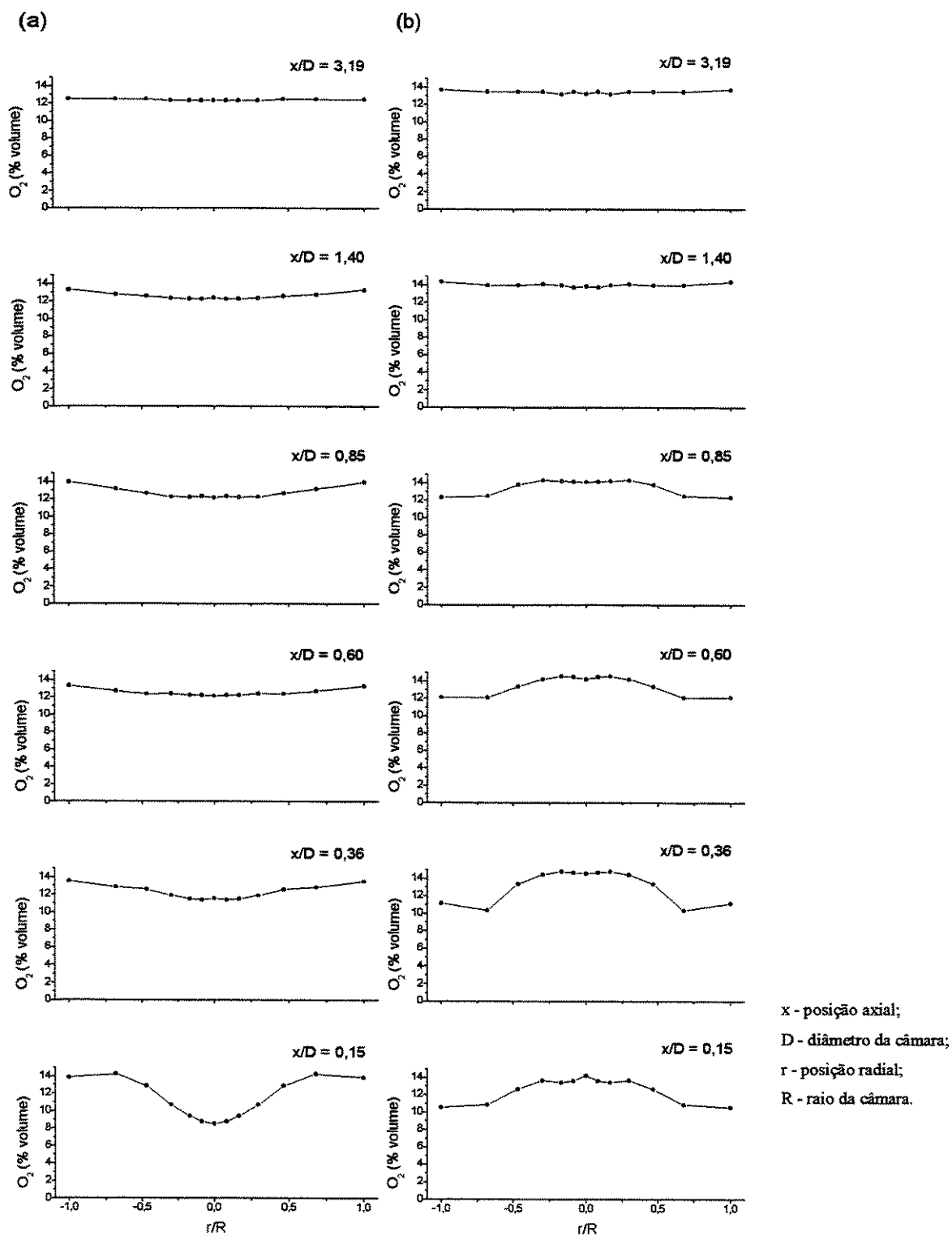


FIGURA 5.4 - Perfis de concentração de O_2 a 1000 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1.315$.

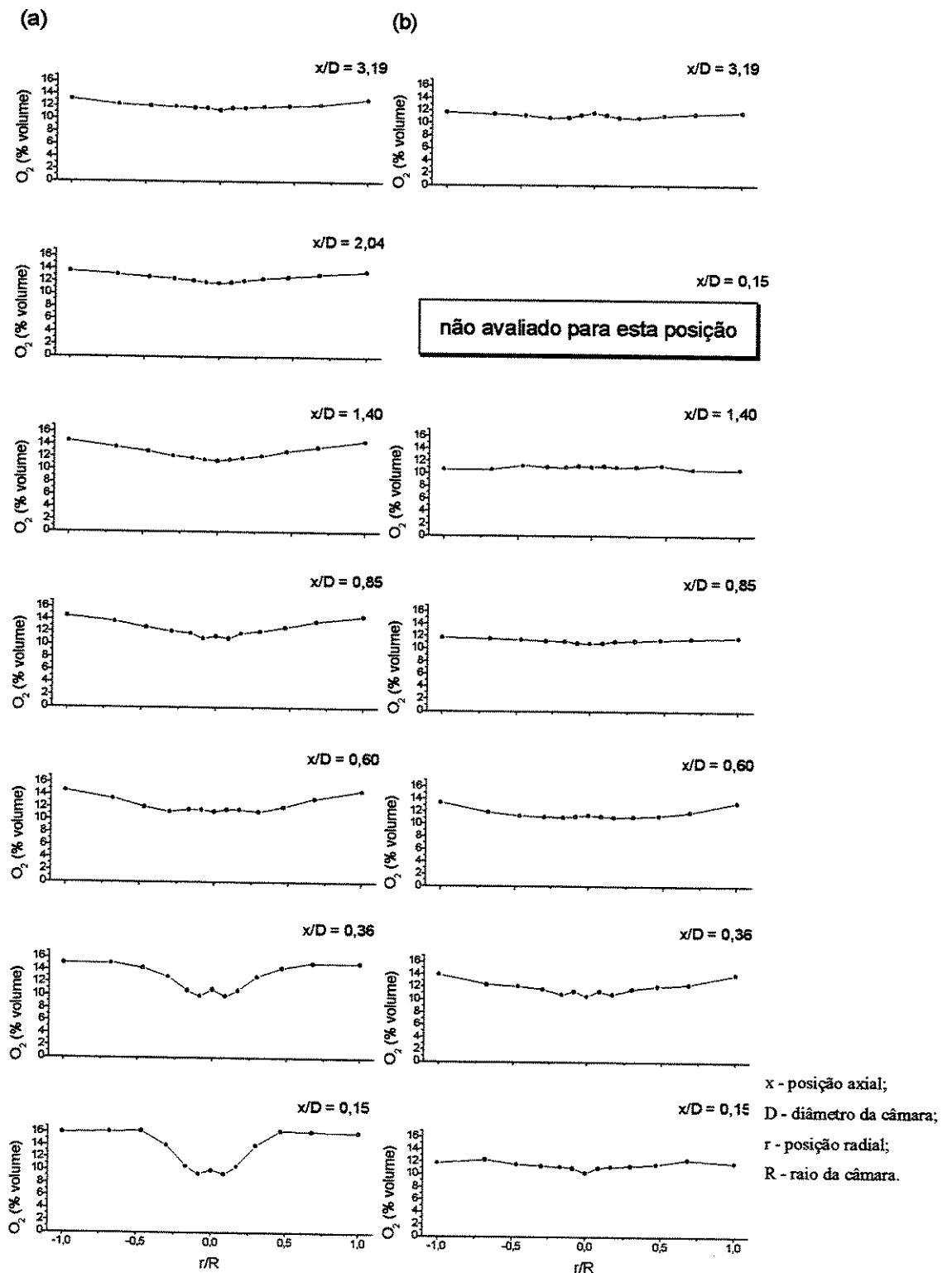


FIGURA 5.5 - Perfis de concentração de O_2 a 1175 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1.315$.

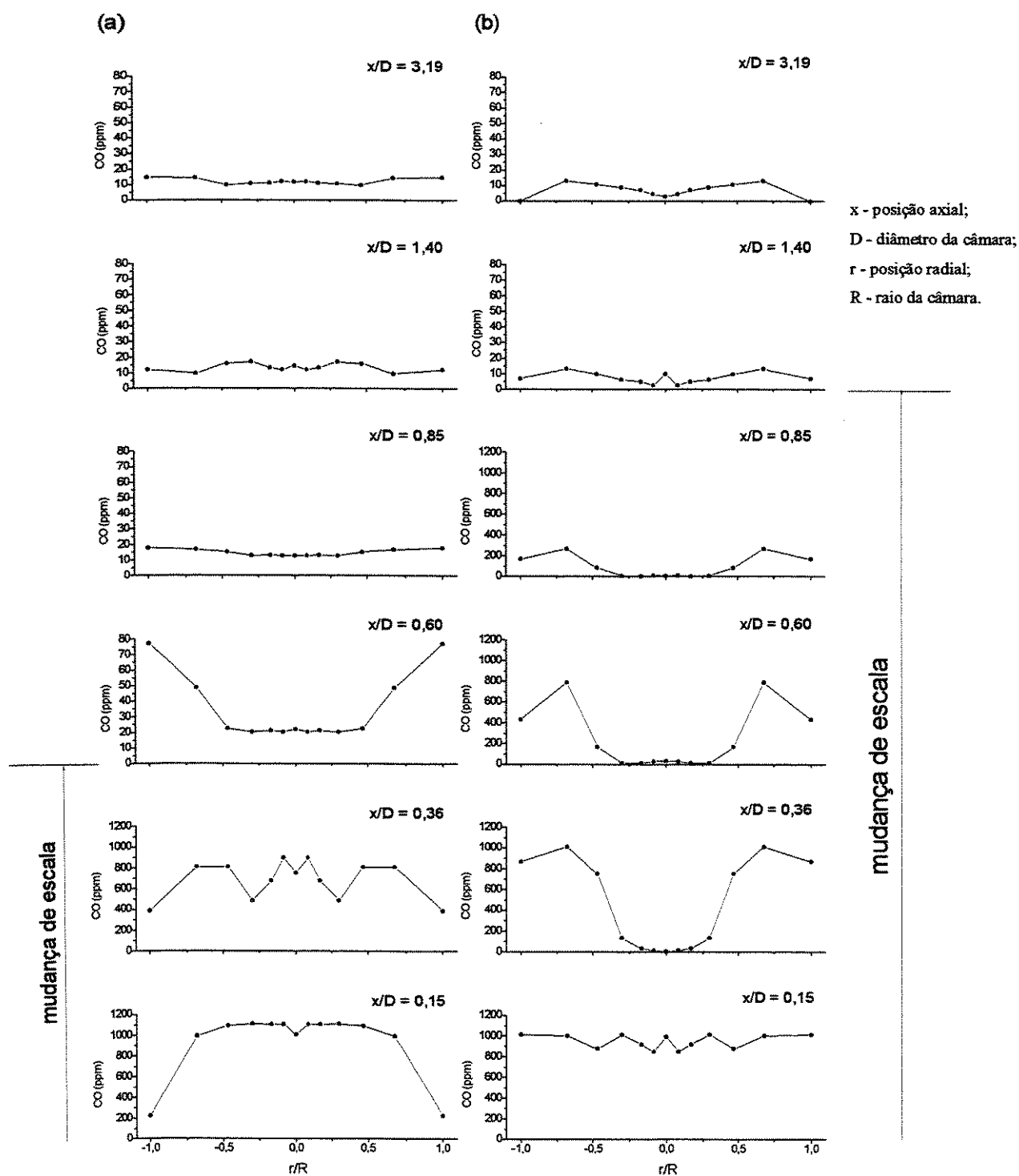


FIGURA 5.6 - Perfis de concentração de CO a 1000 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1,315$.

5.3 - Perfil de Temperatura

A recirculação de gases quentes, somado a fenômenos como o efeito de parede, influencia o perfil de temperatura no interior da câmara de combustão. As figuras 5.7 e 5.8 apresentam o levantamento dos perfis de temperatura da câmara para as duas temperaturas de operação, 1000 e 1175 °C respectivamente.

A 1000 °C e com um número de rotação igual a 0,488 (número de rotação menos intenso), a figura 5.7a mostra picos de temperaturas na região central para as posições próximas ao queimador. Já para um número de rotação mais intenso ($S' = 1,3154$), a figura 5.7b revela um comportamento contrário nestas mesmas regiões. Entretanto, existe uma tendência comum, para os dois números de rotação, dos perfis de temperaturas se tornarem planos a medida que o escoamento se afasta do queimador e se aproxima do final da câmara. A comparação desses perfis, com os seus respectivos perfis de concentração de O_2 (figuras 5.4a e 5.4b), mostra uma relação inversamente proporcional entre esses dois parâmetros, ou seja, nas regiões onde ocorrem picos de concentração de oxigênio a temperatura é relativamente menor em relação as regiões onde a concentração de O_2 atinge seu mínimo. Este fato revela que o oxigênio além de promover a reação de combustão é também importante no controle da temperatura nos processos de queima de combustíveis em câmaras de combustão. Vale lembrar que o oxigênio não é propriamente o único e principal responsável pela absorção de calor. O nitrogênio (N_2) presente juntamente com oxigênio no ar de combustão é então o grande responsável pela absorção de calor e consequentemente pelo controle da temperatura na câmara de combustão.

A figura 5.8a, apresenta o perfil de temperatura a 1175 °C para o número de rotação menos intenso (S'_1), revelado que nesta condição o perfil de temperatura é semelhante ao seu respectivo a 1000 °C (figura 5.7a). Já para o número de rotação mais intenso (S'_2) na mesma condição térmica, o perfil de temperatura (figura 5.8b) se apresenta plano desde os pontos próximos ao queimador até o final da câmara, diferenciando-se do perfil de temperatura para o mesmo valor de número de rotação a 1000 °C. Entretanto, assim como a 1000 °C, nota-se uma relação

inversamente proporcional dos perfis de temperatura com relação aos perfis de concentração de O_2 para as mesmos números de rotação a 1175 °C (figuras 5.5a e 5.5b).

Esta relação inversamente proporcional entre os perfis de temperatura e seus respectivos perfis de concentração de O_2 é também confirmado por KENBAR *et al.* (1995). BIZZO (1997) apresenta perfis de temperatura com as mesma tendências observadas neste trabalho.

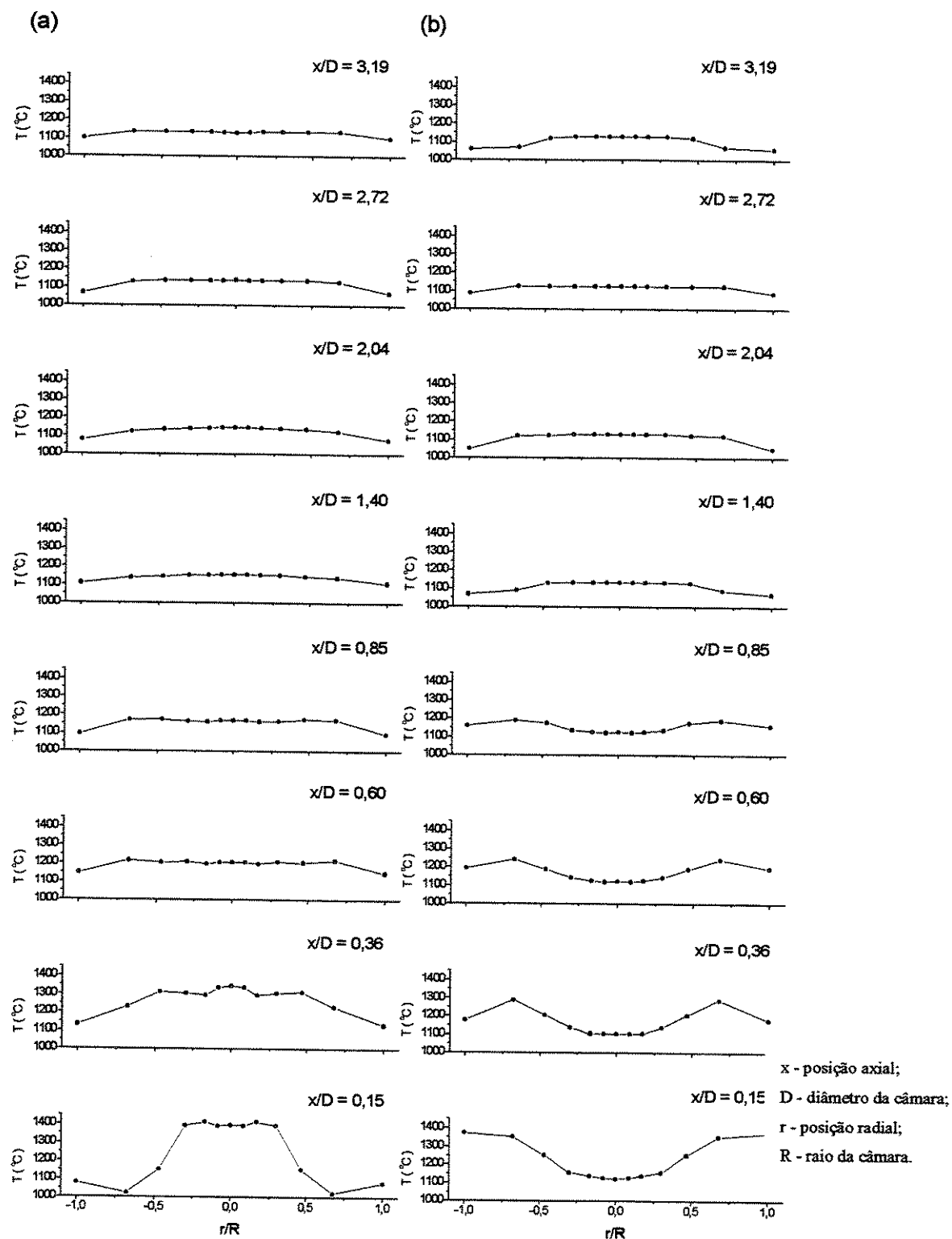


FIGURA 5.7 - Perfis de temperatura a 1000 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1,315$.

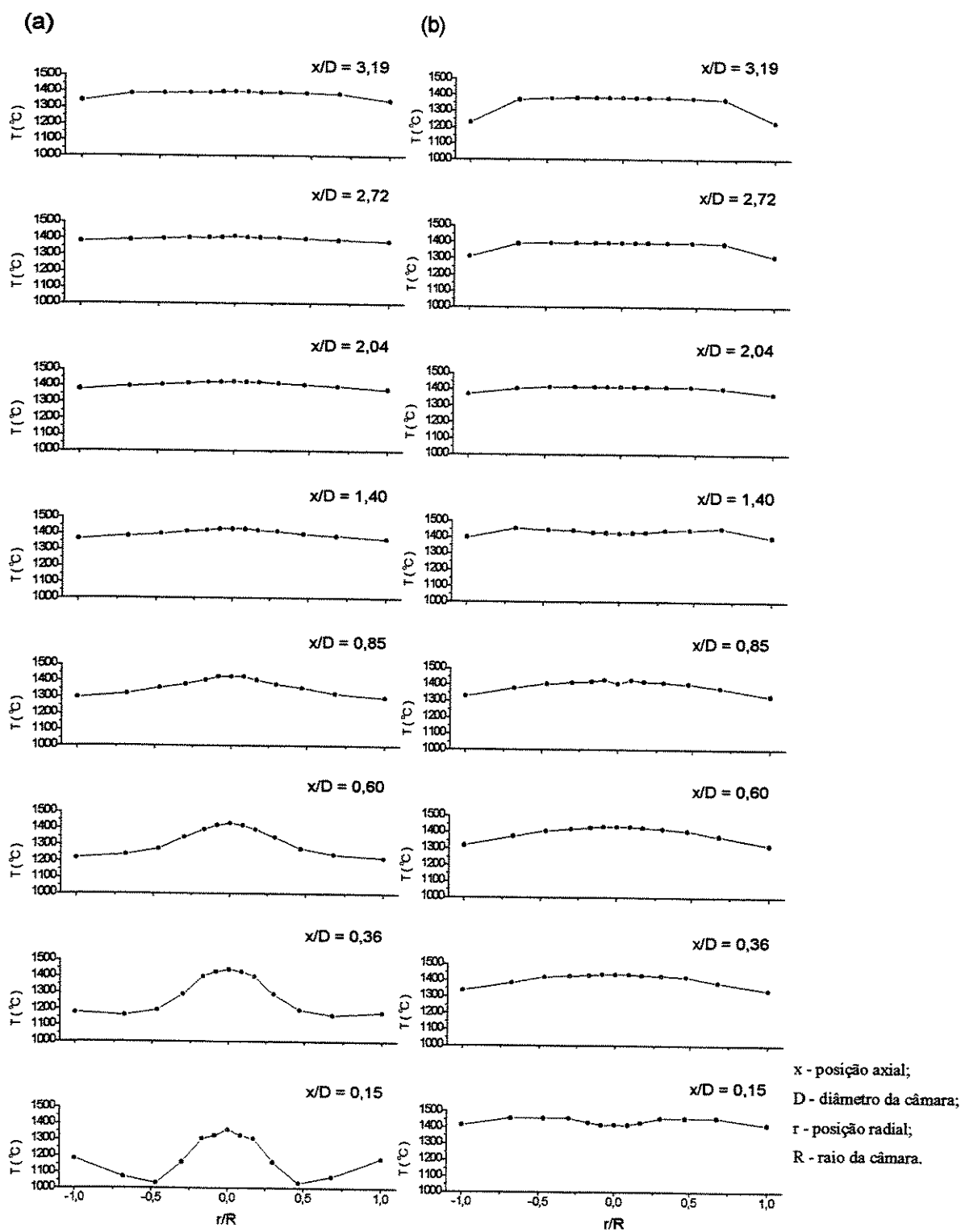


FIGURA 5.8 - Perfis de temperatura a 1175 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1,315$.

5.4 - Perfil de Concentração de NO_x

As condições típicas de operação das câmaras de incineração: alto excesso de ar e alta temperatura, favorecem, segundo MILLER e BOWMAN (1989), a formação do NO_x térmico. Os testes realizados tentam simular as condições de combustão, alto excesso de ar e altas temperaturas, a fim de avaliar a real influência desses fatores somado a forma de injeção de ar, através de jatos com rotação, na emissão de NO_x .

Os perfis de concentração de NO_x são apresentados pelas figuras 5.9 e 5.10, que representam as condições de temperatura da câmara, 1000 e 1175 °C respectivamente.

Para a temperatura de 1000 °C os perfis de concentração de NO_x para S'_1 (figura 5.9a) revela picos de concentração na região central para os primeiros perfis. Em seguida os perfis de concentração tendem a se tornarem planos. Para o número de rotação mais intenso (S'_2) a figura 5.9b mostra que os perfis de concentração de NO_x apresentam um comportamento contrário na região próxima ao queimador com relação aos perfis em S'_1 (figura 5.9a), apresentando mínimos de concentração nesta região. Entretanto, nestas condições, a tendência de apresentar um perfil de concentração plano no final da câmara também se confirma.

Operando a 1175 °C e com o número de rotação menor (S'_1) a figura 5.10a revela um comportamento dos perfis de concentração de NO_x similar aos perfis com o mesmo número de rotação a 1000 °C. Entretanto, nota-se que os picos de concentração de NO_x a 1175 °C são bem maiores que os picos a 1000 °C, revelando uma relação diretamente proporcional entre a temperatura e a formação de NO_x , como previsto pelo mecanismo do NO_x térmico. Ainda a 1175°C, porém com um número de rotação mais intenso (S'_2) o comportamento dos perfis de concentração de NO_x se aproximam muito de um perfil plano em toda a extensão da câmara.

A forte presença do mecanismo do NO_x térmico é também comprovada quando se faz a comparação entre os perfis de concentração de NO_x (figuras 5.9 e 5.10) e seus respectivos perfis de temperatura (figuras 5.7 e 5.8). Nota-se em todas as situações uma relação diretamente

proporcional entre a temperatura e a formação de NO_x na câmara de combustão. Já a comparação entre os perfis de concentração de NO_x e seus respectivos perfis de concentração de O_2 , revela que o NO_x térmico depende mais da temperatura do que da alta concentração de oxigênio. Isto se deve possivelmente ao fato de que mesmo a concentração de O_2 sendo relativamente menor na região central do que nas regiões próximas a parede, ela é suficientemente alta em valores absolutos para promover o mecanismo do NO_x térmico, uma vez que a operação de queima se dá com alto excesso de ar.

Essas mesmas relações entre os perfis de concentração de O_2 , perfis de temperatura e perfis de concentração de NO_x foi observada por KENBAR *et al.* (1995).

Assim como KENBAR *et al.* (1995) os perfis de concentração de NO_x apresentados neste trabalho (figuras 5.9 e 5.10) revelam que as emissões de NO_x são significativamente maiores para o menor número de rotação (S'_1). Essa diferença se deve possivelmente aos seguintes fatores:

- Distribuição do tempo de residência: em condições de baixo número de rotação a distribuição não uniforme do tempo de residência tende a favorecer as reações lentas de formação do NO_x nas regiões de alta temperatura;
- Segundo HAYHURST e VINCE (1980) flutuações na temperatura tem sido responsável por uma maior formação de NO_x do que aquela prevista pelo mecanismo de Zeldovich (NO_x térmico). Os autores apresentam uma correlação (equação 5.1) como critério para negligenciar as flutuações de temperatura. Pela correlação as flutuações de temperatura só podem ser desprezadas quando o membro esquerdo da equação 5.1 for muito menor que 1. Neste trabalho o registro das temperaturas no interior da câmara foram realizados com ajuda de um "Plotter" da marca HP que registrava significativas flutuações de temperatura nas regiões próximas ao queimador para o número de rotação menos intenso ($S'_1 = 0,488$). Para as flutuações encontrada nesta região a correlação apresentada por HAYHURST e VINCE (1980) indica que as mesmas não devem ser desprezadas, havendo, então, uma maior formação de NO_x do que a prevista pelo mecanismo do NO_x térmico no presente trabalho. Segundo os autores, esta distorção no mecanismo se devem a complicações

ocorridas por interação entre fatores aerodinâmicos e cinéticos. O anexo A mostra as flutuações de temperatura que ocorreram neste trabalho.

$$\left(\frac{E_A}{RT}\right)^2 \left[\frac{T'^2}{\bar{T}^2}\right] \ll 1 \quad (5.1)$$

onde:

E_A - energia de ativação (314 kJ/mol);

R - constante universal dos gases;

$\bar{T}$ - temperatura média;

T' - variação da temperatura.

- Mistura ar/combustível: para um número de rotação baixo, os perfis de concentração de O_2 mostram que o grau de mistura entre o ar de combustão e o combustível é baixo. Neste caso a temperatura tende a ser maior na zona central de recirculação (ZCR) favorecendo a formação do NO_x térmico;
- NO_x imediato: em condições de mistura rica em combustível ocorre a formação de NO_x pelo mecanismo do NO_x imediato, devido a presença de HC não queimado. Apesar de não ter sido medido neste trabalho é sabido que a presença de CO revela a existência também de HC não queimado no interior da câmara. Nas regiões de alta concentração de CO a formação de NO_x pelo mecanismo do NO_x imediato pode ser relevante.

O anexo A mostra os dados experimentais responsáveis pelos gráficos aqui apresentados. Encontram-se também neste anexo os valores dos desvios calculados para cada ponto, além das flutuações de temperatura registras.

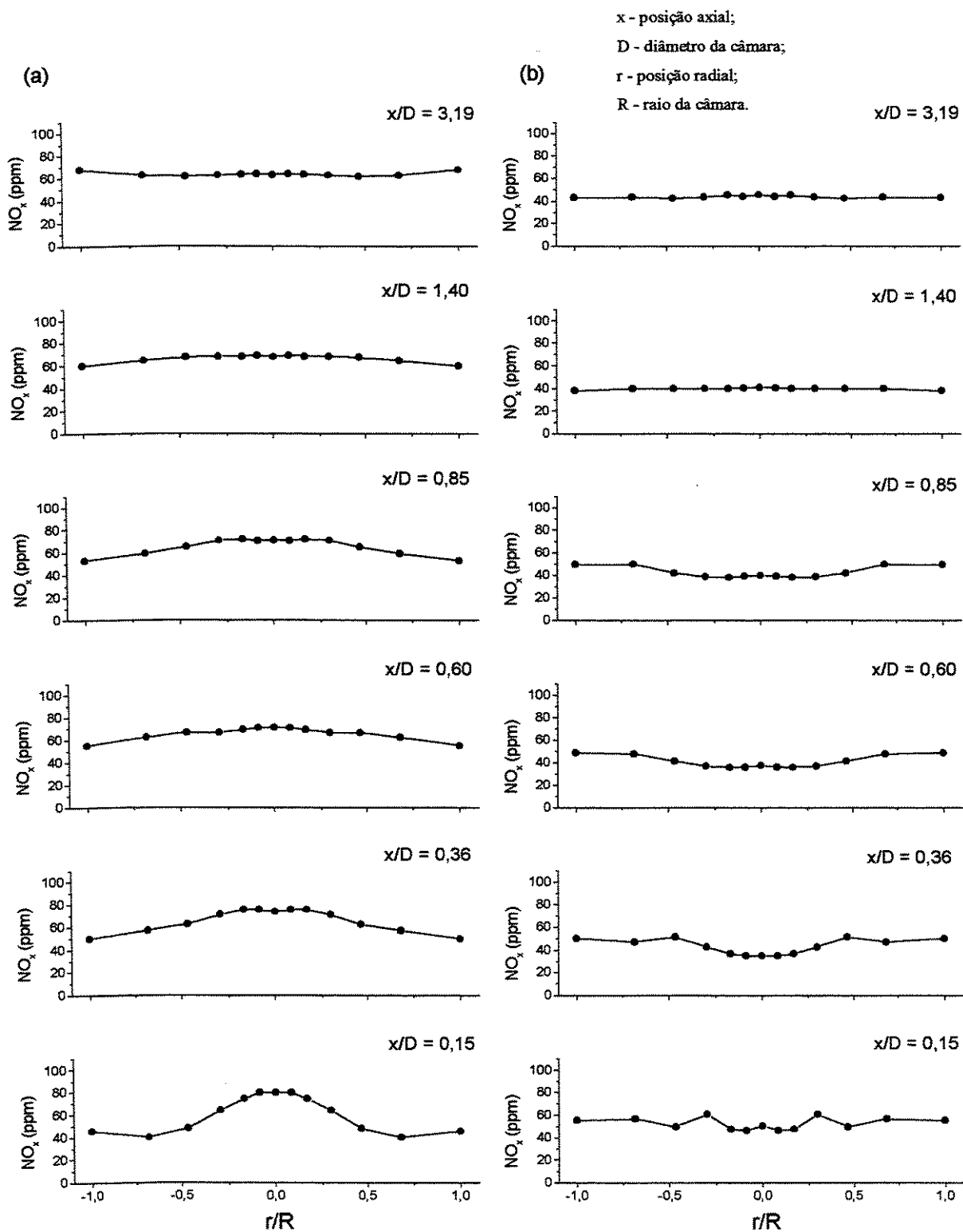


FIGURA 5.9 - Perfis de concentração de NO_x a $1000\text{ }^\circ\text{C}$: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1,315$.

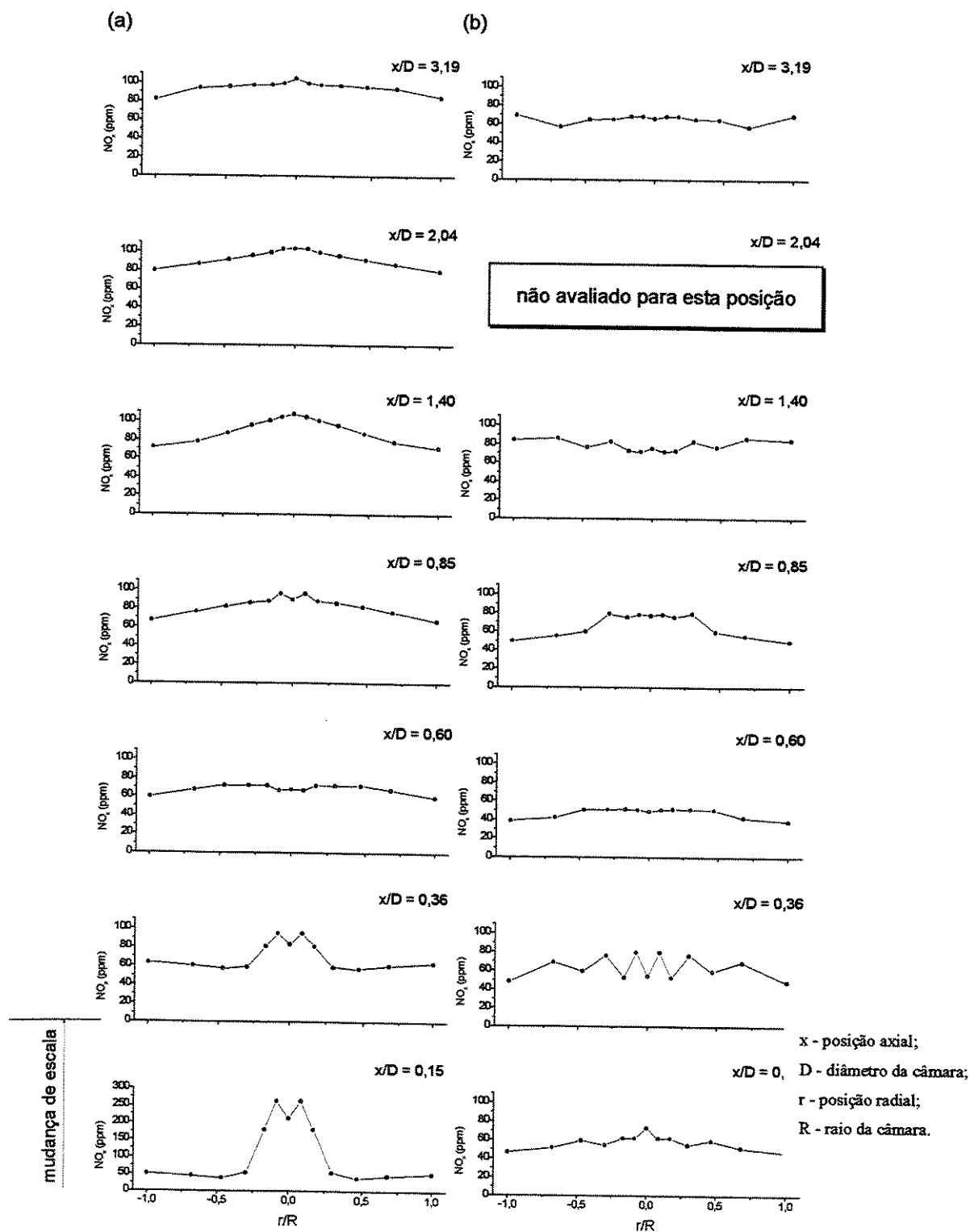


FIGURA 5.10 - Perfis de concentração de NO_x a 1175 °C: a) $S'_1 = 0,488$; b) $S'_2 = 1,315$.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO E SUGESTÕES

6.1 - Conclusão e Considerações Finais

A qualidade da combustão depende principalmente de três parâmetros: distribuição do tempo de residência, do grau de mistura entre ar e combustível e dos níveis de temperatura. Neste trabalho foi estudado a influência da fluidodinâmica e da temperatura na formação de (NO_x) em uma câmara de combustão cilíndrica com injeção de ar através de jatos com rotação. O efeito do tempo médio de residência foi isolado para que não houvesse comprometimento dos resultados por interferência deste parâmetro.

No que se refere a fluidodinâmica do escoamento os resultados revelaram que a formação de NO_x está diretamente ligada ao número de rotação do escoamento. Entretanto, foi comprovado que existe uma faixa de número de rotação (0,684 a 1,315) onde as emissões de NO_x se mantêm aproximadamente constante e em níveis relativamente baixos (figura 5.1). A maior formação de NO_x em números de rotação menos intenso se deve ao maior tempo de residência e ao maior nível de variações nas concentrações dos gases de combustão.

Os perfis de concentração levantados no interior da câmara de combustão também permitiram comprovar a influência do número de rotação na formação de NO_x . Foi observado que em um número de rotação menos intenso ($S'_1 = 0,488$) os perfis de concentração de NO_x apresentam picos na zona central de recirculação (ZCR), enquanto que para um número de rotação mais intenso ($S'_2 = 1,315$) a concentração de NO_x apresentava mínimos de concentração para esta mesma região.

Os resultados envolvendo temperatura revelam uma relação diretamente proporcional entre este e a formação de NO_x em câmaras de combustão. As regiões de picos de temperaturas coincidem com picos de concentração de NO_x , e a comparação entre os perfis de NO_x nas duas temperaturas de operação (1000 e 1175 °C) revelam uma maior taxa de óxidos de nitrogênio na temperatura mais elevada. Portanto comprova-se com isso que a formação de NO_x em câmaras de combustão tem forte influência do mecanismo do NO_x térmico.

Uma análise mais global dos resultados permite traçar uma linha de pensamento ligando os parâmetros estudados:

- A intensidade da zona central de recirculação é afetada diretamente pelo número de rotação. Em valores de S' menos intenso o fluxo reverso é menor;
- A intensidade do fluxo reverso na ZCR é comprovado pela concentração de O_2 nesta região. Em um número de rotação mais intenso ocorrem picos de concentração de O_2 na ZCR enquanto em valores de S' menor a concentração de O_2 atinge um mínimo;
- A distribuição de temperatura no interior da câmara de combustão esta relacionada com a concentração de O_2 através de uma relação inversamente proporcional. Isto se deve a capacidade do ar de combustão de absorver o calor gerada na queima do combustível;
- A temperatura tem uma relação diretamente proporcional com a concentração de NO_x devido a forte presença do mecanismo do NO_x térmico.

- Os dados experimentais indicam a possibilidade de haver a formação de NO_x imediato além de desvios no mecanismo térmico causado por flutuações da temperatura na região próxima ao queimador para baixos números de rotação.

6.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros

É de grande importância a obtenção de um número maior de dados experimentais para que se tenha condições de ajustar um modelo matemático considerando a cinética das reações de combustão e de formação de NO_x além da forma do escoamento no interior da câmara de combustão.

A intensidade e tamanho da zonas de recirculação (central e externa) podem ser melhor definidas através da construção dos perfis de velocidade no interior da câmara. Esse levantamento pode ser realizado através de um Pitot de cinco furos, como o utilizado por BIZZO (1997), o qual recomenda um cuidadoso projeto da sonda. Ainda segundo o autor, o processo de calibração, tomada e tratamento dos resultados requer exaustivo trabalho, não sendo possível o levantamento deste perfil em tempos relativamente curtos.

O arranjo atual do queimador não permite que se opere em números de rotação maiores do que 1,463. A alteração deste queimador seria de grande interesse para que se pudesse operar em uma faixa maior de S' a fim de comprovar a tendência de aumento nas emissões de NO_x para números de rotação mais intensos.

Alterações na câmara que permitissem a experimentação de outras técnicas de controle de NO_x , tais como recirculação de gases de exaustão e pré mistura na região do queimador, é de real importância na comparação entres as diferentes técnicas. A combinação destas técnicas numa mesma operação também é passível de investigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADRIAN HSIEH,T.C., DAHM,W.J.A., DRISCOLL,J.F. Scaling laws for NO_x emission performance of burners and furnaces from 30 kW to 12 MW. **Combustion and Flame**, v.114, p.54-80, 1998.
- ALTPFART,G.R.,CHRISTMAN,R. Gas burner offers less than 10 ppm NO_x. **Modern Power Systems**,p.27-30, Nov. 1995.
- ANDREWS,G.E. *et al.* High-intensity burners with low NO_x emissions. **Part A: Journal of Power and Energy**, v.206, p.3-17, 1992.
- AOKI,H. *et al.* Effect of swirling flow on unburned ratio and nitrogen oxide concentration in a spray combustion system. **Experimental Thermal and Fluid Science**, New York, v.5, p.838-847, 1992.
- AOKI,H., *et al.* Measurement of urea thermal decomposition reaction rate for NO selective non-catalytic reduction. In: FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGIES AND COMBUSTION FOR A CLEAN ENVIRONMENT, 1999, Lisboa-Portugal. **Anais...** Lisbon - Portugal, 1999. p.115-118
- BALTASAR,J. *et al.* Fuel gas recirculation in a gas-fired laboratory furnace: measurements and modelling. **Fuel**, v.76, n.10, p.919-929, 1997.

- BEÉR,M.J., CHIGIER,N.A. **Combustion Aerodynamics**. London: Applied Science Publishers LTD, 1972. 264p.
- BELTAGUI,S.A., MACCALUUM,N.R.L. Aerodynamics of vane-swirled flame in furnaces. **J. Inst. Fuel**, v.69, p.183-193, 1976a.
- BELTAGUI,S.A., MACCALUUM,N.R.L. The modelling of vane-swirled flame in furnaces. **J. Inst. Fuel**, v.69, p.193-200, 1976b.
- BELTAGUI,S.A.,KENBAR,A.M.A.,MACCALLUM,N.R.L. Comparison of measured isothermal and combustion confined swirling flows: Peripheral fuel injection. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.6, p.147-1456, 1993.
- BIZZO,W.A. **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 da UNICAMP, 1997. 116p.(Tese, Doutorado em Engenharia Mecânica)
- BIZZO,W.A.,CARDOSO,A.L.,GOLDSTEIN Jr.,L. Construção e calibração de dois modelos de tubo de Pitot de 5 furos para aplicação em câmaras de combustão. In: 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 11-14 de novembro, Florianópolis. **Anais...**
- CANTELLI,M.,de LUCA,S.J. Oxidação de NO_x de pequenas fontes fixas por oxidação alcalina. In: 20º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1999. p.2842-2850.
- CARVALHO,M.G. *et al.* Predictions of nitric oxide emissions from na industrial glass-melting furnace. **Journal of the Institute of Energy**, p.39-47, Mar. 1990.

- CHEDAILLE,J.,BRAUD,Y. **Measurement in Flames**. Edward Arnold (Publ.), London, 1972. 228p.
- COE,W.W. Combustion: efficiency vs. NO_x. **Hydrocarbon Processing**, p.130-134, May 1980.
- COSTA,M.,RUÃO,M., CARVALHO,M.G. On the influence of flue-gas recirculation on pollutant emissions from a small-scale laboratory furnace. **Archivum Combustionis**, v.16, n.1-2, p.77-86, 1996.
- DIEGO,L.F. *et al.* Influence of operating parameters on NO_x and N₂O axial profiles in a circulating fluidized bed combustion. **Fuel**, v.75, n.8, p.971-978, 1996.
- DÖBBELING,K. *et al.* Low NO_x premixed combustion of Mbtu fuels in a research burner. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v.119, p.553-558, 1997.
- DÖBBELING,K. *et al.* Low NO_x premixed combustion of Mbtu fuels using the ABB double cone burner (EV burner). **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v.118, p.46-53, 1996.
- DRAKE,M.C. *et al.* Superequilibrium and thermal nitric oxide formation in turbulent diffusion flames. **Combustion and Flame**, v.69, p.347-365, 1987.
- DUPONT,V. *et al.* The reduction of NO_x formation in natural gas burner flames. **Fuel**, v.72, n.4, p.497-503, 1993.
- EL-MAHALLAWY,F.M., *et al.* Effect of combustion and similarity between hot and cold flow patterns in a cylindrical oil fired furnace. In: **Flow, Mixing and Heat Transfer in Furnace**, K.H.Khalil (ed), Pergamon Press, Oxford, 1997. 248p.

- FENIMORE,C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. In.: 13TH SYMPOSIUM (INTERNATIONAL) ON COMBUSTION, 1970, Salt Lake City, Utah. **Combustion Institute**. Pittsburgh, Pa: 1971. p. 373-380.
- FENIMORE,C.P., JONES,G.W. Nitric oxide decomposition at 2200 degrees K - 2400 degrees K. **Journal of Physical Chemistry**, v. 61, n.5, p.654-657, 1957
- HAO,W.M., *et al.* Nitrous oxide concentrations in coal, oil, and gas furnace flames. **Combustion Science and Technology**, v.55, p.23-32, 1987.
- HAYHURST,A.N., VINCE,I.M. Nitric oxide formation from N₂ in flames: the importance of "Prompt" NO. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.6, p.35-51, 1980.
- HEAP,M.P.,*et al.* The effect of burner parameters on nitric oxide formation in natural gas and pulverized fuel flames. In: AMERICAN FLAME DAYS: Conf. Spansored by the America Flame Committee. **Anais...**1972.
- HESSELMANN,G.J. Optimization of combustion by fuel testing in a NO_x reduction test facility. **Fuel**, v.76, n.13, p.1269-1275, 1997.
- JOWORZNO III cleans up. **Modern Power Systems**, p.43-47, Nov. 1995.
- KASPER,J.M., CLAUSEN III,C.A., COOPER,C.D. Control of nitrogen oxide emissions by hydrogen peroxide-enhanced gas-phase oxidation of nitric oxide. **Journal of Air and Waste Management Association**, v.46, n.2, p.127-133, 1996.
- KENBAR,A.M.A., BELTAGUL,S.A., MACCALLUM,N.R.L. Combustion aerodynamics of a gas-fired furnace with peripheral injection. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.10, p.335-346, 1995.

- LEE,K.C.,ASH,J.E. A three dimensional spherical Pitot probe. **Transactions of the ASME**, p.603-608, 1985.
- LEVENSPIEL,O. **Engenharia das Reações Químicas**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1972. 481p.
- MEUNIER,Ph.,COSTA,M.,CARVALHO,M.G. The formation and destruction of NO in turbulent propane diffusion flames. **Fuel**, v.77, n.15, p.1705-1714, 1998.
- MILLER,J.A., BOWMAN,C.T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. . **Progress in Energy and Combustion Science**, v.15, p.287-338, 1989.
- MUZIO,L.J., QUARTUCY,G.C. Implementing NO_x control: research to application. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.23, p.266-233, 1997.
- PERRY,R.A.,SIEBERS,D.L. *Nature* 324, 657, 1986 apud MILLER,J.A., BOWMAN,C.T. Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. . **Progress in Energy and Combustion Science**, v.15, p.287-338, 1989.
- PRATT,D.T. Mixing and chemical reaction in continuous combustion. **Progress in Energy Combustion**, v.1, p.79-86, 1976.
- RAO,C.S. **Environmental pollution control engineering**. New Delhi, India: Wiley Eastern Limited, 1991. 431p.
- ROSSI,N.J.,UNFRIED,K.G. NO_x control with hydrogen peroxide. **Metal Finishing**, p.16-19, Apr. 1997.
- SANO,T. NO₂ formation in the mixing region of hot burner gas with cool air - effect of surrounding air. **Combustion Science and Technology**, v.43, p.259-269, 1985.

- SCHNELL,U., KAESS,M., BRODBEK,H. Experimental and numerical investigation of NO_x formation and its basic interdependencies on pulverized coal flame characteristics. **Combustion Science and Technology**, v.93, p.91-109, 1993.
- STECIAK,J. *et al.* Dual SO₂-NO_x concentration reduction by calcium salts of carboxylic acids. **Journal of Environmental Engineering**, p.595-604, 1995.
- STULES,A.C. *et al.* A study of modulatable cyclone combustors using gaseous fuel. **J. Inst. Energy**, p.159-168, dec. 1979.
- TAKAHASHI,Y., *et al.* Developmente of "MACT" in-furnance NO_x removal process for steam generators. In: 1982 SYMP. ON STATIONARY COMBUSTION, 1982, Dallas,TX. **Anais...**1982.
- VAN DER LANS,R.P., GLARBORG,P., DAM-JOHANSEN,K. Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.23, p.349-377, 1997.
- WEBER,R.,DUGUÉ,J. Combustion accelerated swirling flows in high confinements. **Progress in Energy Combustion**, v.18, n.4, p.349-367, 1992.
- YEGIAN,D.T.,CHENG,R.K. Development of a lean premixed low-swirl burner for low NO_x practical applications. **Combustion Science and Technology**, v.139, p.207-227, 1998.
- ZELDOVICH,Y.B. **acta Phys.-Chim. URSS**, 21, 577, 1946 apud HAYHURST,A.N., VINCE,I.M. Nitric oxide formation from N₂ in flames: the importance of "Prompt" NO. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.6,p.35-51, 1980.
- ZELDOVICH,Ya.B. *et al.* **The mathematical theory of combustion and explosions.** p.30-36, Consultants Bureau, 1985.

ANEXO A

DADOS EXPERIMENTAIS

A.I - DADOS EXPERIMENTAIS A 1000 °C

Teste 1 - Número de Rotação vs Concentração

(Referente as figuras 5.1, 5.2 e 5.3 - páginas 65 e 66)

Tomada	Posição	Número de Rotação	NOx (ppm)					Média (ppm)	Desvio (ppm)
1	7	0,364	76	76	78	78	77	77,00	0,80
2	9	0,488	77	79	74	74	75	75,80	1,76
3	12	0,684	56	54	54	54	54	54,40	0,64
4	15	0,887	47	47	46	47	47	46,80	0,32
5	17	1,027	53	52	53	51	51	52,00	0,80
6	19	1,170	52	53	51	51	51	51,60	0,72
7	21	1,315	51	51	51	51	53	51,40	0,64
8	23	1,463	56	56	55	56	56	55,80	0,32

Tomada	Posição	Número de Rotação	O2 (% volume)					Média	Desvio Padrão
1	7	0,364	12,20	12,10	12,10	12,10	11,90	12,08	0,07
2	9	0,488	11,90	12,00	11,90	12,00	11,90	11,94	0,05
3	12	0,684	11,50	11,60	11,60	11,60	11,60	11,58	0,03
4	15	0,887	11,40	11,50	11,50	11,50	11,50	11,48	0,03
5	17	1,027	11,50	11,60	11,50	11,50	11,50	11,52	0,03
6	19	1,170	11,80	11,80	11,80	11,80	11,80	11,80	0,00
7	21	1,315	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	11,70	0,00
8	23	1,463	11,80	11,90	11,90	11,90	11,90	11,88	0,03

Tomada	Posição	Número de Rotação	CO (ppm)					Média	Desvio Padrão
1	7	0,364	19	20	20	20	20	19,80	0,32
2	9	0,488	17	17	18	19	19	18,00	0,80
3	12	0,684	20	21	21	22	23	21,40	0,88
4	15	0,887	19	21	21	22	22	21,00	0,80
5	17	1,027	21	22	22	23	23	22,20	0,64
6	19	1,170	23	23	23	23	24	23,20	0,32
7	21	1,315	21	21	22	23	24	22,20	1,04
8	23	1,463	20	23	23	24	24	22,80	1,12

Teste 2 - Perfil de Temperatura em $S' = 0,488$

(Referente as figura 5.7a - página 74)

Posição		Termopar	Temperatura (graus Celsius)				
x/D	r (mm)	(mV)	Média	Ambiente	Real	Máxima	Flutuação
0,15	235	10,125	1046,58	33	1079,58	1101,00	21,42
	160	9,469	989,89	33	1022,89	1058,00	35,11
	110	11,000	1121,00	33	1154,00	1196,00	42,00
	70	13,900	1361,42	33	1394,42	1423,50	29,08
	40	14,160	1382,83	33	1415,83	1444,00	28,17
	20	13,857	1357,85	33	1390,85	1414,00	23,15
	0	13,911	1362,30	33	1395,30	1423,50	28,20
0,36	235	10,750	1099,67	33	1132,67	1154,00	21,33
	160	11,929	1198,46	33	1231,46	1256,50	25,04
	110	12,893	1278,35	33	1311,35	1349,50	38,15
	70	12,862	1272,44	33	1305,44	1344,00	38,56
	40	12,679	1260,66	33	1293,66	1344,00	50,34
	20	13,196	1303,44	33	1336,44	1382,00	45,56
	0	13,303	1312,28	33	1345,28	1382,00	36,72
0,60	235	10,946	1116,28	33	1149,28	1166,00	16,72
	160	11,750	1183,58	33	1216,58	1237,50	20,92
	110	11,625	1173,15	33	1206,15	1229,00	22,85
	70	11,679	1177,62	33	1210,62	1237,50	26,88
	40	11,518	1164,19	33	1197,19	1219,00	21,81
	20	11,643	1174,64	33	1207,64	1237,50	29,86
	0	11,643	1174,64	33	1207,64	1237,50	29,86
0,85	235	10,321	1063,31	33	1096,31	1111,50	15,19
	160	11,214	1138,77	33	1171,77	1190,00	18,23
	110	11,250	1141,76	33	1174,76	1189,50	14,74
	70	11,143	1132,77	33	1165,77	1178,00	12,23
	40	11,107	1129,76	33	1162,76	1172,00	9,24
	20	11,179	1135,77	33	1168,77	1183,50	14,73
	0	11,179	1135,77	33	1168,77	1183,50	14,73
1,40	235	10,429	1072,99	35	1107,99	1109,50	1,51
	160	10,786	1102,72	35	1137,72	1143,00	5,28
	110	10,857	1108,68	35	1143,68	1149,00	5,32
	70	10,929	1114,75	35	1149,75	1156,00	6,25
	40	10,964	1117,77	35	1152,77	1156,00	3,23
	20	11,000	1120,75	35	1155,75	1156,00	0,25
	0	11,000	1120,75	35	1155,75	1156,00	0,25
2,04	235	10,089	1043,52	35	1078,52	1095,00	16,48
	160	10,643	1090,66	35	1125,66	1132,00	6,34
	110	10,786	1102,72	35	1137,72	1138,00	0,28
	70	10,821	1105,69	35	1140,69	1144,00	3,31
	40	10,857	1108,75	35	1143,75	1144,00	0,25
	20	10,893	1111,73	35	1146,73	1150,00	3,27
	0	10,893	1111,73	35	1146,73	1150,00	3,27
2,72	235	9,964	1032,77	35	1067,77	1077,00	9,23
	160	10,679	1093,63	35	1128,63	1138,00	9,37
	110	10,786	1102,72	35	1137,72	1138,00	0,28
	70	10,786	1102,72	35	1137,72	1138,00	0,28
	40	10,786	1102,72	35	1137,72	1138,00	0,28
	20	10,786	1102,72	35	1137,72	1138,00	0,28
	0	10,821	1105,70	35	1140,70	1141,00	0,30
3,19	235	10,357	1066,37	35	1101,37	1113,50	12,13
	160	10,750	1099,65	35	1134,65	1138,00	3,35
	110	10,750	1099,65	35	1134,65	1138,00	3,35
	70	10,750	1099,65	35	1134,65	1138,00	3,35
	40	10,750	1099,65	35	1134,65	1138,00	3,35
	20	10,714	1096,64	35	1131,64	1138,00	6,36
	0	10,679	1093,63	35	1128,63	1131,50	2,87

Teste 3 - Perfil de Temperatura em S' = 1,315

(Referente as figura 5.7b - página 74)

Posição		Termopar	Temperatura (graus Celsius)				
x/D	r (mm)	(mV)	Média	Ambiente	Real	Máxima	Flutuação
0,15	235	13,643	1340,25	34	1374,25	1386,00	11,75
	160	13,393	1319,64	34	1353,64	1362,50	8,86
	110	12,178	1219,19	34	1253,19	1280,00	26,81
	70	11,036	1123,82	34	1157,82	1166,80	8,98
	40	10,821	1105,70	34	1139,70	1148,80	9,10
	20	10,679	1093,64	34	1127,64	1136,80	9,16
	0	10,607	1087,60	34	1121,60	1131,00	9,40
0,36	235	11,286	1144,83	34	1178,83	1220,50	41,67
	160	12,607	1254,73	34	1288,73	1303,50	14,77
	110	11,625	1173,17	34	1207,17	1215,00	7,83
	70	10,821	1105,70	34	1139,70	1155,00	15,30
	40	10,429	1072,45	34	1106,45	1112,50	6,05
	20	10,393	1069,40	34	1103,40	1106,50	3,10
	0	10,393	1069,40	34	1103,40	1112,50	9,10
0,60	235	11,500	1162,69	34	1196,69	1208,50	11,81
	160	12,054	1208,88	34	1242,88	1250,00	7,12
	110	11,429	1156,71	34	1190,71	1203,00	12,29
	70	10,857	1108,75	34	1142,75	1149,00	6,25
	40	10,679	1093,64	34	1127,64	1133,50	5,86
	20	10,590	1086,12	34	1120,12	1124,50	4,38
	0	10,643	1090,62	34	1124,62	1130,50	5,88
0,85	235	11,072	1126,82	34	1160,82	1173,00	12,18
	160	11,429	1156,71	34	1190,71	1203,00	12,29
	110	11,250	1141,83	34	1175,83	1182,00	6,17
	70	10,786	1102,72	34	1136,72	1142,50	5,78
	40	10,679	1093,64	34	1127,64	1137,00	9,36
	20	10,625	1089,11	34	1123,11	1127,50	4,39
	0	10,661	1092,13	34	1126,13	1131,00	4,87
1,40	235	10,000	1035,83	32	1067,83	1080,00	12,17
	160	10,250	1057,27	32	1089,27	1104,50	15,23
	110	10,715	1096,71	32	1128,71	1135,00	6,29
	70	10,750	1099,69	32	1131,69	1138,00	6,31
	40	10,750	1099,69	32	1131,69	1138,00	6,31
	20	10,750	1099,69	32	1131,69	1138,00	6,31
	0	10,750	1099,69	32	1131,69	1138,00	6,31
2,04	235	9,786	1017,42	32	1049,42	1074,00	24,58
	160	10,607	1087,60	32	1119,60	1125,50	5,90
	110	10,679	1093,64	32	1125,64	1129,00	3,36
	70	10,732	1098,20	32	1130,20	1135,00	4,80
	40	10,732	1098,20	32	1130,20	1135,00	4,80
	20	10,732	1098,20	32	1130,20	1135,00	4,80
	0	10,732	1098,20	32	1130,20	1135,00	4,80
2,72	235	10,215	1054,21	32	1086,21	1098,50	12,29
	160	10,679	1093,64	32	1125,64	1129,00	3,36
	110	10,679	1093,64	32	1125,64	1129,00	3,36
	70	10,679	1093,64	32	1125,64	1129,00	3,36
	40	10,679	1093,64	32	1125,64	1129,00	3,36
	20	10,679	1093,64	32	1125,64	1129,00	3,36
	0	10,679	1093,64	32	1125,64	1129,00	3,36
3,19	235	9,929	1029,73	32	1061,73	1080,00	18,27
	160	10,036	1038,94	32	1070,94	1098,50	27,56
	110	10,607	1087,60	32	1119,60	1122,50	2,90
	70	10,715	1096,71	32	1128,71	1129,00	0,29
	40	10,715	1096,71	32	1128,71	1129,00	0,29
	20	10,715	1096,71	32	1128,71	1129,00	0,29
	0	10,715	1096,71	32	1128,71	1129,00	0,29

Teste 4 - Perfil de Concentração de CO em S' = 0,488

(Referente as figura 5.6a - página 71)

Posição		CO (ppm)				
x (mm)	r (mm)	Tomadas			Média	Desvio
0,15	235	227	223	225	225,00	1,33
	160	983	990	1000	991,00	6,00
	110	1100	1090	1094	1094,67	3,56
	70	1115	1113	1112	1113,33	1,11
	40	1111	1110	1109	1110,00	0,67
	20	1113	1110	1109	1110,67	1,56
	0	1111	1108	1106	1108,33	1,78
0,36	235	390	381	393	388,00	4,67
	160	775	734	921	810,00	74,00
	110	890	760	780	810,00	53,33
	70	500	450	510	486,67	24,44
	40	650	650	750	683,33	44,44
	20	900	860	930	896,67	24,44
	0	850	720	700	756,67	62,22
0,60	235	72	82	78	77,33	3,56
	160	51	46	50	49,00	2,00
	110	24	24	20	22,67	1,78
	70	17	22	22	20,33	2,22
	40	24	21	19	21,33	1,78
	20	20	21	20	20,33	0,44
	0	24	22	21	22,33	1,11
0,85	235	18	18	18	18,00	0,00
	160	17	17	17	17,00	0,00
	110	15	15	16	15,33	0,44
	70	13	13	13	13,00	0,00
	40	13	13	14	13,33	0,44
	20	13	13	13	13,00	0,00
	0	13	13	13	13,00	0,00
1,40	235	12	12	12	12,00	0,00
	160	10	10	9	9,67	0,44
	110	16	16	16	16,00	0,00
	70	17	17	18	17,33	0,44
	40	13	13	13	13,00	0,00
	20	12	12	12	12,00	0,00
	0	15	14	14	14,33	0,44
3,19	235	15	15	15	15,00	0,00
	160	15	14	14	14,33	0,44
	110	10	10	10	10,00	0,00
	70	11	10	11	10,67	0,44
	40	12	11	11	11,33	0,44
	20	12	12	12	12,00	0,00
	0	11	12	12	11,67	0,44

Teste 5 - Perfil de Concentração de CO em S' = 1,315

(Referente as figura 5.6b - página 71)

Posição		CO (ppm)				
x (mm)	r (mm)	Tomadas			Média	Desvio
0,15	235	1011	1023	1010	1014,67	5,56
	160	1010	1000	997	1002,33	5,11
	110	875	876	881	877,33	2,44
	70	1015	1014	1014	1014,33	0,44
	40	887	976	900	921,00	36,67
	20	850	996	706	850,67	96,89
	0	1010	1010	970	996,67	17,78
0,36	235	880	870	860	870,00	6,67
	160	1012	1010	1010	1010,67	0,89
	110	707	809	760	758,67	34,44
	70	190	114	112	138,67	34,22
	40	40	38	32	36,67	3,11
	20	16	16	12	14,67	1,78
	0	3	3	5	3,67	0,89
0,60	235	500	380	430	436,67	42,22
	160	650	850	880	793,33	95,56
	110	200	145	170	171,67	18,89
	70	23	8	7	12,67	6,89
	40	16	16	16	16,00	0,00
	20	26	26	26	26,00	0,00
	0	35	36	36	35,67	0,44
0,85	235	250	100	150	166,67	55,56
	160	215	230	370	271,67	65,56
	110	131	70	62	87,67	28,89
	70	8	8	10	8,67	0,89
	40	0	0	0	0,00	0,00
	20	14	13	13	13,33	0,44
	0	9	10	10	9,67	0,44
1,40	235	3	8	10	7,00	2,67
	160	13	13	13	13,00	0,00
	110	10	10	10	10,00	0,00
	70	6	6	7	6,33	0,44
	40	5	5	5	5,00	0,00
	20	3	2	3	2,67	0,44
	0	10	10	10	10,00	0,00
3,19	235	0	0	0	0,00	0,00
	160	13	14	12	13,00	0,67
	110	10	11	11	10,67	0,44
	70	9	9	9	9,00	0,00
	40	7	7	7	7,00	0,00
	20	5	4	4	4,33	0,44
	0	3	3	3	3,00	0,00

Teste 6 - Perfil de Concentração de O₂ em S' = 0,488

(Referente as figura 5.4a - página 69)

Posição		O2 (% volume)				
x (mm)	r (mm)	Tomadas			Média	Desvio
0,15	235	14	14	14	13,83	0,09
	160	14	14	14	14,27	0,04
	110	13	13	13	12,87	0,18
	70	11	11	11	10,70	0,00
	40	9	9	10	9,43	0,04
	20	9	9	9	8,80	0,13
	0	8	9	9	8,57	0,11
0,36	235	14	14	14	13,53	0,04
	160	13	13	13	12,90	0,07
	110	13	12	12	12,60	0,40
	70	12	12	12	11,90	0,00
	40	12	12	12	11,57	0,04
	20	11	11	12	11,43	0,04
	0	12	12	12	11,60	0,07
0,60	235	13	13	13	13,30	0,13
	160	13	13	13	12,70	0,00
	110	12	12	12	12,40	0,00
	70	13	12	12	12,43	0,04
	40	12	12	12	12,23	0,04
	20	12	12	12	12,23	0,04
	0	12	12	12	12,17	0,04
0,85	235	14	14	14	14,00	0,00
	160	13	13	13	13,20	0,00
	110	13	13	13	12,70	0,00
	70	12	12	12	12,30	0,00
	40	12	12	12	12,23	0,04
	20	12	12	12	12,37	0,04
	0	12	12	12	12,20	0,00
1,40	235	13	13	13	13,33	0,04
	160	13	13	13	12,80	0,00
	110	13	13	13	12,60	0,00
	70	12	12	12	12,37	0,04
	40	12	12	12	12,33	0,04
	20	12	12	12	12,30	0,00
	0	13	12	12	12,43	0,04
3,19	235	13	13	13	12,50	0,00
	160	13	13	13	12,50	0,00
	110	13	13	13	12,50	0,00
	70	12	12	12	12,40	0,00
	40	12	12	12	12,40	0,00
	20	12	12	12	12,40	0,00
	0	12	12	12	12,40	0,00

Teste 7 - Perfil de Concentração de O₂ em S' = 1,315

(Referente as figura 5.4b - página 69)

Posição		O ₂ (% volume)				
x (mm)	r (mm)	Tomadas			Média	Desvio
0,15	235	11	11	11	10,57	0,09
	160	11	11	11	10,87	0,09
	110	13	13	13	12,63	0,04
	70	14	14	14	13,67	0,04
	40	13	14	14	13,43	0,09
	20	14	14	14	13,60	0,07
	0	14	14	14	14,20	0,07
0,36	235	11	11	11	11,17	0,04
	160	11	10	10	10,40	0,07
	110	13	13	13	13,37	0,04
	70	14	15	15	14,47	0,04
	40	15	15	15	14,80	0,00
	20	15	15	15	14,70	0,00
	0	15	15	15	14,60	0,00
0,60	235	12	12	12	12,13	0,04
	160	12	12	12	12,10	0,00
	110	13	13	13	13,40	0,00
	70	14	14	14	14,23	0,04
	40	15	15	15	14,53	0,04
	20	15	15	15	14,50	0,00
	0	14	14	14	14,20	0,00
0,85	235	12	12	12	12,40	0,00
	160	13	13	13	12,53	0,04
	110	14	14	14	13,80	0,00
	70	14	14	14	14,30	0,00
	40	14	14	14	14,20	0,00
	20	14	14	14	14,17	0,04
	0	14	14	14	14,13	0,04
1,40	235	14	14	14	14,40	0,00
	160	14	14	14	14,00	0,00
	110	14	14	14	14,00	0,00
	70	14	14	14	14,10	0,00
	40	14	14	14	14,00	0,00
	20	14	14	14	13,77	0,04
	0	14	14	14	13,83	0,04
3,19	235	14	14	14	13,70	0,00
	160	14	14	14	13,50	0,00
	110	14	14	14	13,50	0,00
	70	14	14	14	13,50	0,00
	40	13	13	13	13,20	0,00
	20	14	14	14	13,50	0,00
	0	13	13	13	13,23	0,04

Teste 8 - Perfil de Concentração de NO_x em S' = 0,488

(Referente as figura 5.9a - página 79)

Posição		NO _x (ppm)				
x (mm)	r (mm)	Tomadas			Média	Desvio
0,15	235	46	45	46	45,67	0,44
	160	40	40	41	40,33	0,44
	110	49	49	46	48,00	1,33
	70	65	64	64	64,33	0,44
	40	75	73	75	74,33	0,89
	20	82	79	78	79,67	1,56
	0	82	79	78	79,67	1,56
0,36	235	51	52	47	50,00	2,00
	160	57	59	56	57,33	1,11
	110	59	65	64	62,67	2,44
	70	71	71	71	71,00	0,00
	40	76	76	75	75,67	0,44
	20	75	76	76	75,67	0,44
	0	75	73	73	73,67	0,89
0,60	235	57	54	54	55,00	1,33
	160	63	63	62	62,67	0,44
	110	67	67	66	66,67	0,44
	70	66	66	67	66,33	0,44
	40	69	69	70	69,33	0,44
	20	71	70	71	70,67	0,44
	0	71	71	71	71,00	0,00
0,85	235	53	52	53	52,67	0,44
	160	59	59	60	59,33	0,44
	110	65	65	65	65,00	0,00
	70	70	71	71	70,67	0,44
	40	72	72	72	72,00	0,00
	20	70	70	71	70,33	0,44
	0	71	71	72	71,33	0,44
1,40	235	60	60	60	60,00	0,00
	160	64	65	65	64,67	0,44
	110	68	68	67	67,67	0,44
	70	68	68	69	68,33	0,44
	40	68	69	68	68,33	0,44
	20	69	69	69	69,00	0,00
	0	68	68	68	68,00	0,00
3,19	235	68	68	68	68,00	0,00
	160	63	63	63	63,00	0,00
	110	62	62	62	62,00	0,00
	70	63	63	63	63,00	0,00
	40	64	64	63	63,67	0,44
	20	64	64	64	64,00	0,00
	0	64	63	63	63,33	0,44

Teste 9 - Perfil de Concentração de NO_x em S' = 1,315

(Referente as figura 5.9b - página 79)

Posição		NO _x (ppm)				
x (mm)	r (mm)	Tomadas			Média	Desvio
0,15	235	55	55	56	55,33	0,44
	160	57	56	57	56,67	0,44
	110	50	49	50	49,67	0,44
	70	58	63	61	60,67	1,78
	40	49	48	45	47,33	1,56
	20	45	46	48	46,33	1,11
	0	50	51	50	50,33	0,44
0,36	235	47	47	47	50,33	0,00
	160	51	52	52	47,00	0,44
	110	43	43	42	51,67	0,44
	70	36	37	37	42,67	0,44
	40	35	35	35	36,67	0,00
	20	35	35	35	35,00	0,00
	0	35	35	35	35,00	0,00
0,60	235	49	49	49	49,00	0,00
	160	48	47	48	47,67	0,44
	110	41	42	42	41,67	0,44
	70	37	37	37	37,00	0,00
	40	36	36	36	36,00	0,00
	20	36	36	37	36,33	0,44
	0	37	38	38	37,67	0,44
0,85	235	50	50	49	49,67	0,44
	160	50	50	50	50,00	0,00
	110	42	42	42	42,00	0,00
	70	39	39	39	39,00	0,00
	40	38	38	38	38,00	0,00
	20	39	39	40	39,33	0,44
	0	40	40	40	40,00	0,00
1,40	235	38	38	38	38,00	0,00
	160	40	40	40	40,00	0,00
	110	40	40	40	40,00	0,00
	70	40	40	40	40,00	0,00
	40	40	40	40	40,00	0,00
	20	40	41	41	40,67	0,44
	0	40	42	41	41,00	0,67
3,19	235	43	43	43	43,00	0,00
	160	43	45	42	43,33	1,11
	110	43	42	42	42,33	0,44
	70	43	44	44	43,67	0,44
	40	45	46	45	45,33	0,44
	20	44	45	44	44,33	0,44
	0	46	45	46	45,67	0,44

A.II - DADOS EXPERIMENTAIS A 1175 °C

Teste 10 - Número de Rotação vs Concentração

(Referente as figuras 5.1, 5.2 e 5.3 - páginas 65 e 66)

Tomada	Posição	Número de Rotação	NOx (ppm)						Média	Desvio (ppm)
1	7	0,364	105	108	106	108	107		106,80	1,04
2	9	0,488	104	104	104	102	102		103,20	0,96
3	12	0,684	48	48	49	49	49		48,60	0,48
4	15	0,887	52	52	52	52	53		52,20	0,32
5	17	1,027	52	52	52	51	52		51,80	0,32
6	19	1,170	56	56	56	57	54	56	55,83	0,61
7	21	1,315	56	55	56	55	56	56	55,67	0,44
8	23	1,463	79	79	78	74	76		77,20	1,76

Tomada	Posição	Número de Rotação	O2 (% volume)						Média	Desvio Padrão
1	7	0,364	10,60	10,60	10,50	10,50	10,60		10,56	0,32
2	9	0,488	10,30	10,40	10,40	10,50	10,50		10,42	0,06
3	12	0,684	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80		9,80	0,00
4	15	0,887	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20		10,20	0,00
5	17	1,027	9,90	10,00	10,00	10,00	9,90		9,96	0,05
6	19	1,170	9,80	9,80	9,80	9,80	9,80		9,80	0,00
7	21	1,315	9,70	9,80	9,70	9,70	9,70	9,60	9,70	0,03
8	23	1,463	10,00	9,90	9,90	10,00	9,90		9,94	0,05

Tomada	Posição	Número de Rotação	CO (ppm)						Média	Desvio Padrão
1	7	0,364	34	33	33	33	33		33,20	0,32
2	9	0,488	45	46	46	47	47		46,20	0,64
3	12	0,684	26	27	27	28	28		27,20	0,64
4	15	0,887	35	35	35	35	35		35,00	0,00
5	17	1,027	39	39	39	39			39,00	0,00
6	19	1,170	38	38	38	37	38	39	38,00	0,33
7	21	1,315	18	17	18	18	18		17,80	0,32
8	23	1,463	20	19	21	21	20		20,20	0,64

Teste 11 - Perfil de Temperatura em $S' = 0,488$

(Referente as figura 5.8a - página 75)

Posição		Termopar	Temperatura (graus Celsius)				
x/D	r (mm)	(mV)	Média	Ambiente	Real	Máxima	Flutuação
0,15	235	1139,290	1153,74	30	1183,74	1193,00	9,26
	160	10,071	1041,95	30	1071,95	1084,00	12,05
	110	9,643	1005,07	30	1035,07	1047,00	11,93
	70	11,125	1131,26	30	1161,26	1193,00	31,74
	40	12,857	1275,42	30	1305,42	1341,00	35,58
	20	13,089	1294,58	30	1324,58	1335,00	10,42
	0	13,536	1331,40	30	1361,40	1382,00	20,60
0,36	235	11,321	1147,77	30	1177,77	1186,50	8,73
	160	11,143	1132,76	30	1162,76	1175,00	12,24
	110	11,500	1162,75	30	1192,75	1204,50	11,75
	70	12,679	1260,63	30	1290,63	1323,00	32,37
	40	14,000	1369,67	30	1399,67	1417,50	17,83
	20	14,357	1399,18	30	1429,18	1441,00	11,82
	0	14,500	1411,91	30	1441,91	1452,50	10,59
0,60	235	11,839	1191,00	30	1221,00	1231,50	10,50
	160	12,071	1210,37	30	1240,37	1252,00	11,63
	110	12,518	1247,32	30	1277,32	1290,50	13,18
	70	13,357	1316,68	30	1346,68	1367,00	20,32
	40	13,965	1365,84	30	1395,84	1411,00	15,16
	20	14,250	1389,61	30	1419,61	1429,00	9,39
	0	14,393	1402,36	30	1432,36	1441,00	8,64
0,85	235	12,786	1269,47	30	1299,47	1305,00	5,53
	160	13,071	1293,12	30	1323,12	1335,00	11,88
	110	13,464	1325,53	30	1355,53	1364,50	8,97
	70	13,750	1349,08	30	1379,08	1394,00	14,92
	40	14,071	1375,53	30	1405,53	1417,50	11,97
	20	14,321	1396,18	30	1426,18	1435,00	8,82
	0	14,321	1396,18	30	1426,18	1435,00	8,82
1,40	235	13,607	1337,26	28	1365,26	1374,00	8,74
	160	13,857	1357,87	28	1385,87	1392,00	6,13
	110	14,000	1369,67	28	1397,67	1398,00	0,33
	70	14,179	1384,40	28	1412,40	1424,00	11,60
	40	14,303	1394,69	28	1422,69	1433,00	10,31
	20	14,375	1400,59	28	1428,59	1436,00	7,41
	0	14,393	1402,07	28	1430,07	1439,00	8,93
2,04	235	13,786	1351,96	28	1379,96	1386,00	6,04
	160	14,000	1369,67	28	1397,67	1404,00	6,33
	110	14,107	1378,49	28	1406,49	1409,50	3,01
	70	14,214	1387,35	28	1415,35	1421,00	5,65
	40	14,286	1393,21	28	1421,21	1427,00	5,79
	20	14,321	1396,17	28	1424,17	1433,00	8,83
	0	14,357	1399,12	28	1427,12	1433,00	5,88
2,72	235	13,821	1354,92	28	1382,92	1386,00	3,08
	160	13,893	1360,83	28	1388,83	1392,00	3,17
	110	14,000	1369,67	28	1397,67	1403,50	5,83
	70	14,071	1375,53	28	1403,53	1409,50	5,97
	40	14,089	1377,00	28	1405,00	1415,50	10,50
	20	14,143	1381,44	28	1409,44	1421,00	11,56
	0	14,179	1384,40	28	1412,40	1415,50	3,10
3,19	235	13,321	1313,69	28	1341,69	1368,00	26,31
	160	13,857	1357,87	28	1385,87	1392,00	6,13
	110	13,893	1360,83	28	1388,83	1392,00	3,17
	70	13,928	1363,78	28	1391,78	1398,00	6,22
	40	13,929	1363,80	28	1391,80	1398,00	6,20
	20	14,000	1369,67	28	1397,67	1403,50	5,83
	0	14,000	1369,67	28	1397,67	1403,50	5,83

Teste 12 - Perfil de Temperatura em S' = 1,315

(Referente as figura 5.8b - página 75)

Posição		Termopar	Temperatura (graus Celsius)				
x/D	r (mm)	(mV)	Média	Ambiente	Real	Máxima	Flutuação
0,15	235	14,250	1390,26	26	1416,26	1431,00	14,74
	160	14,750	1431,50	26	1457,50	1472,00	14,50
	110	14,768	1433,00	26	1459,00	1466,50	7,50
	70	14,750	1431,52	26	1457,52	1472,00	14,48
	40	14,429	1405,06	26	1431,06	1448,50	17,44
	20	14,250	1390,26	26	1416,26	1437,00	20,74
	0	14,286	1393,25	26	1419,25	1431,00	11,75
0,36	235	13,322	1313,78	26	1339,78	1348,50	8,72
	160	13,893	1360,85	26	1386,85	1413,50	26,65
	110	14,322	1396,19	26	1422,19	1425,00	2,81
	70	14,393	1402,10	26	1428,10	1431,00	2,90
	40	14,447	1406,53	26	1432,53	1437,00	4,47
	20	14,500	1410,92	26	1436,92	1443,00	6,08
	0	14,500	1410,92	26	1436,92	1443,00	6,08
0,60	235	13,072	1293,12	26	1319,12	1331,00	11,88
	160	13,786	1352,00	26	1378,00	1396,00	18,00
	110	14,143	1381,46	26	1407,46	1419,00	11,54
	70	14,322	1396,20	26	1422,20	1431,00	8,80
	40	14,393	1402,06	26	1428,06	1437,00	8,94
	20	14,465	1408,00	26	1434,00	1443,00	9,00
	0	14,464	1407,97	26	1433,97	1437,00	3,03
0,85	235	13,197	1303,46	26	1329,46	1348,50	19,04
	160	13,804	1353,48	26	1379,48	1390,00	10,52
	110	14,107	1378,47	26	1404,47	1413,50	9,03
	70	14,215	1387,34	26	1413,34	1419,00	5,66
	40	14,322	1396,20	26	1422,20	1431,00	8,80
	20	14,393	1402,06	26	1428,06	1431,00	2,94
	0	14,464	1407,97	26	1433,97	1437,00	3,03
1,40	235	14,071	1375,50	26	1401,50	1430,50	29,00
	160	14,715	1428,63	26	1454,63	1466,50	11,87
	110	14,643	1422,72	26	1448,72	1455,00	6,28
	70	14,571	1416,81	26	1442,81	1448,50	5,69
	40	14,429	1405,00	26	1431,00	1437,00	6,00
	20	14,393	1402,05	26	1428,05	1434,00	5,95
	0	14,357	1399,09	26	1425,09	1431,00	5,91
2,04	235	13,715	1346,12	26	1372,12	1384,00	11,88
	160	14,125	1379,96	26	1405,96	1416,00	10,04
	110	14,250	1390,28	26	1416,28	1422,00	5,72
	70	14,250	1390,28	26	1416,28	1419,00	2,72
	40	14,250	1390,28	26	1416,28	1419,00	2,72
	20	14,250	1390,28	26	1416,28	1419,00	2,72
	0	14,250	1390,28	26	1416,28	1419,00	2,72
2,72	235	12,965	1284,31	26	1310,31	1331,00	20,69
	160	13,946	1365,20	26	1391,20	1395,67	4,47
	110	14,000	1369,67	26	1395,67	1395,67	0,00
	70	14,000	1369,67	26	1395,67	1395,67	0,00
	40	14,000	1369,67	26	1395,67	1395,67	0,00
	20	14,000	1369,67	26	1395,67	1395,67	0,00
	0	14,000	1369,67	26	1395,67	1395,67	0,00
3,19	235	12,000	1204,42	26	1230,42	1260,00	29,58
	160	13,715	1346,12	26	1372,12	1378,00	5,88
	110	13,803	1353,43	26	1379,43	1380,91	1,48
	70	13,821	1354,91	26	1380,91	1380,91	0,00
	40	13,821	1354,91	26	1380,91	1380,91	0,00
	20	13,821	1354,91	26	1380,91	1380,91	0,00
	0	13,821	1354,91	26	1380,91	1380,91	0,00

Teste 13 - Perfil de Concentração de O₂ em S' = 0,488

(Referente as figura 5.5a - página 70)

Posição		O ₂ (% volume)					
x/D	r (mm)	Tomadas				Média	Desvio
0,15	235	16	16	16		16,03	0,09
	160	16	16	16		16,23	0,04
	110	16	16	16		16,27	0,04
	70	14	14	14		14,03	0,04
	40	11	11	11		10,60	0,07
	20	9	9	9		9,40	0,00
	0	10	10	10		10,03	0,09
0,36	235	15	15	15		15,17	0,09
	160	15	15	15		15,13	0,04
	110	14	14	14		14,33	0,04
	70	13	13	13		12,93	0,22
	40	11	11	11		10,77	0,09
	20	10				9,90	0,00
	0	11	11	11		10,97	0,04
0,60	235	15	15	15		14,70	0,00
	160	14	14	13		13,50	0,07
	110	12	12	12		12,10	0,07
	70	11	11	11		11,33	0,04
	40	12	12	12		11,70	0,00
	20	12	12	12		11,67	0,04
	0	11	11	11		11,37	0,04
0,85	235	15	15	15		14,63	0,04
	160	14	14	14		13,77	0,04
	110	13	13	13		12,80	0,00
	70	12	12	12	12	12,18	0,08
	40	12	12	12		11,83	0,04
	20	11	11	11		11,03	0,04
	0	11	11	11		11,33	0,09
1,40	235	15	15	15		14,60	0,00
	160	14	14	14		13,60	0,07
	110	13	13	13		12,97	0,04
	70	12	12	12		12,20	0,00
	40	12	12	12		11,90	0,07
	20	12	12	12		11,63	0,04
	0	12	11	11		11,43	0,04
2,04	235	14	14	14		13,67	0,04
	160	13	13	13		13,13	0,04
	110	13	13	13		12,73	0,04
	70	13	13	13		12,50	0,00
	40	12	12	12		12,13	0,04
	20	12	12	12		11,90	0,00
	0	12	12	12		11,73	0,09
3,19	235	13	13	13		13,23	0,04
	160	12	12	12		12,37	0,04
	110	12	12	12		12,13	0,04
	70	12	12	12		12,03	0,04
	40	12	12	12		11,83	0,04
	20	12	12	12		11,80	0,00
	0	11	12	12		11,47	0,04

Teste 14 - Perfil de Concentração de O₂ em S' = 1,315

(Referente as figura 5.5b - página 70)

Posição		O ₂ (% volume)					
x/D	r (mm)	Tomadas				Média	Desvio
0,15	235	12	12	12		11,83	0,04
	160	12	12	12		12,33	0,04
	110	12	12	12		11,60	0,00
	70	11	11	11	12	11,33	0,18
	40	11				11,20	0,00
	20	11	11	11		11,03	0,04
	0	10	10	10		10,23	0,04
0,36	235	14	14	14	14	14,03	0,07
	160	12	12	13	13	12,45	0,05
	110	12	12	12	12	12,18	0,04
	70	12	12	12	12	11,65	0,05
	40	11	11	11	11	10,80	0,00
	20	11	11	11		11,30	0,00
	0	11	11	11		10,53	0,04
0,60	235	14	14	13		13,47	0,04
	160	12	12	12		11,90	0,00
	110	11	11	11		11,37	0,04
	70	11	11	11		11,13	0,04
	40	11	11	11		11,10	0,00
	20	11	11	11		11,23	0,04
	0	11	11	11		11,40	0,00
0,85	235	12	12	12		11,73	0,04
	160	12	12	12		11,60	0,00
	110	11	11	11		11,40	0,00
	70	11	11	11		11,27	0,04
	40	11	11	11		11,23	0,04
	20	11	11	11		10,97	0,04
	0	11	11	11		10,90	0,00
1,40	235	11	11	11		10,67	0,04
	160	11	11	11		10,70	0,00
	110	11	11	11		11,27	0,11
	70	11	11	11		11,10	0,07
	40	11	11	11		11,03	0,04
	20	11	11	11	11	11,23	0,04
	0	11	11	11	11	11,08	0,04
3,19	235	12	12	12		11,77	0,04
	160	12	12	12		11,50	0,00
	110	11	11	11		11,20	0,00
	70	11	11	11		10,80	0,00
	40	11	11	11		10,90	0,00
	20	11	11	11		11,30	0,00
	0	12	12	12		11,60	0,00

Teste 15 - Perfil de Concentração de NO_x em S' = 0,488

(Referente as figura 5.10a - página 80)

Posição		NO _x (ppm)					
x/D	r (mm)	Tomadas				Média	Desvio
0,15	235	51	52	52		51,67	0,44
	160	45	46	46		45,67	0,44
	110	39	39	39		39,00	0,00
	70	55	55	56		55,33	0,44
	40	179	180	182		180,33	1,11
	20	267	263	262		264,00	2,00
	0	218	210	211		213,00	3,33
0,36	235	66	63	62		63,67	1,56
	160	61	61	60		60,67	0,44
	110	58	57	58		57,67	0,44
	70	61	57	59		59,00	1,33
	40	80	82	82		81,33	0,89
	20	96	94			95,00	1,00
	0	84	84	82		83,33	0,89
0,60	235	59	60	60		59,67	0,44
	160	67	68	68		67,67	0,44
	110	72	73	72		72,33	0,44
	70	72	72	73		72,33	0,44
	40	72	72	72		72,00	0,00
	20	67	67	67		67,00	0,00
	0	68	68	68		68,00	0,00
0,85	235	67	67	68		67,33	0,44
	160	76	77	77		76,67	0,44
	110	82	82	84		82,67	0,89
	70	85	86	87	88	86,50	1,00
	40	88	88	88		88,00	0,00
	20	95	97	97		96,33	0,89
	0	89	90	90		89,67	0,44
1,40	235	72	72	71		71,67	0,44
	160	77	79	79		78,33	0,89
	110	87	87	88		87,33	0,44
	70	95	96	97		96,00	0,67
	40	102	101	100		101,00	0,67
	20	104	105	105		104,67	0,44
	0	107	108	109		108,00	0,67
2,04	235	80	80	80		80,00	0,00
	160	87	87	87		87,00	0,00
	110	91	92	92		91,67	0,44
	70	96	95	96		95,67	0,44
	40	99	99	100		99,33	0,44
	20	103	103	103		103,00	0,00
	0	103	103	105		103,67	0,89
3,19	235	84	85	86	86	85,25	0,75
	160	95	95	94		94,67	0,44
	110	97	96	96		96,33	0,44
	70	97	98	97		97,33	0,44
	40	98	98	98		98,00	0,00
	20	99	100	100		99,67	0,44
	0	105	106	104		105,00	0,67

Teste 16 - Perfil de Concentração de NO_x em S' = 1,315

(Referente as figura 5.10b - página 80)

Posição		NO _x (ppm)					
x/D	r (mm)	Tomadas				Média	Desvio
0,15	235	48	47	47	46	47,00	0,50
	160	51	52	51	52	51,50	0,50
	110	59	59	60		59,33	0,44
	70	54	54	55	56	54,75	0,75
	40	62				62,00	0,00
	20	62	61	62		61,67	0,44
	0	72	71	71	76	72,50	1,75
0,36	235	50	49	49	46	48,50	1,25
	160	70	69	69	69	69,25	0,38
	110	58	61	59	61	59,75	1,25
	70	76	77	76	76	76,25	0,38
	40	53	53	53	53	53,00	0,00
	20	80	79	79	80	79,50	0,50
	0	56	55	54	54	54,75	0,75
0,60	235	38	38	39	39	38,50	0,50
	160	42	42	43	44	42,75	0,75
	110	51	51	50	50	50,50	0,50
	70	51	51	51		51,00	0,00
	40	51	52	52	52	51,75	0,38
	20	50	51	51	51	50,75	0,38
	0	50	49	49	48	49,00	0,50
0,85	235	49	49	50	51	49,75	0,75
	160	55	56	55		55,33	0,44
	110	59	60	60	61	60,00	0,50
	70	79	80	80	79	79,50	0,50
	40	77	76	75	75	75,75	0,75
	20	80	77	77	81	78,75	1,75
	0	76	77	78	78	77,25	0,75
1,40	235	84	83	85	86	84,50	1,00
	160	87	87	86	86	86,50	0,50
	110	73	75	77	83	77,00	3,00
	70	83	82	83	84	83,00	0,50
	40	71	72	74	75	73,00	1,50
	20	70	70	71	76	71,75	2,13
	0	81	77	74	71	75,75	3,25
3,19	235	69	69	70	71	69,75	0,75
	160	58	57	57	56	57,00	0,50
	110	62	64	66	68	65,00	2,00
	70	67	65	64	66	65,50	1,00
	40	68	69	68	68	68,25	0,38
	20	69	69	68	67	68,25	0,75
	0	66	66	66	66	66,00	0,00