

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE UM MEDIDOR DE VELOCIDADE DE
PROPAGAÇÃO DE CHAMA COM VISUALIZAÇÃO DE
OUTROS FENÔMENOS DE COMBUSTÃO**

Eduardo Botelho Lotti
Rafael Inácio dos Santos Ferreira



São Paulo
2005

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO DE UM MEDIDOR DE VELOCIDADE DE
PROPAGAÇÃO DE CHAMA COM VISUALIZAÇÃO DE
OUTROS FENÔMENOS DE COMBUSTÃO**

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de
Graduação em Engenharia.

Eduardo Botelho Lotti
Rafael Inácio dos Santos Ferreira

Orientador:
Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger
Filho

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2005

TF-05
L977p

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011119

FICHA CATALOGRÁFICA

001481265

Lotti, Eduardo Botelho

Ferreira, Rafael Inácio dos Santos

Projeto de um medidor de velocidade de propagação de chama com visualização de outros fenômenos de combustão / E.B.

Lotti, R.I. dos S. Ferreira. -- São Paulo, 2005.

119 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Combustão 2.Termodinâmica 3.Mecânica dos fluidos I.Ferreira, Rafael Inácio dos Santos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Agradecimentos

Agradecemos a preciosa ajuda do Professor Guenther e a paciência nos momentos de dificuldade.

Obrigado aos amigos Douglas e Wilson pela ajuda na construção do equipamento.\

Obrigado ao pessoal da biblioteca da mecânica, Paulo, Clarisse e Márcia.

Resumo

O presente trabalho consiste na construção de um aparato experimental capaz de medir a velocidade de frente de chama laminar e visualizar fenômenos de combustão.

O resultado obtido empiricamente para o Gás Liquefeito de Petróleo – GLP – pode ser comparado com o valor teórico da velocidade laminar de frente de chama. O cálculo se baseia em constantes experimentais, hipóteses de comportamento de escoamento e composição do combustível, para obter uma velocidade de frente de chama.

Realiza-se ainda estudo de outros fenômenos de combustão pela observação de Bicos de Bunsen de diversos diâmetros, tela de alumínio e por um tubo de vidro. Os Bicos de Bunsen permitem a visualização da ponta amarela, formação e fuligem, engolimento, descolamento e apagamento. A tela de alumínio permite observar a região estequiométrica da chama por meio de seu gradiente de temperatura. O tubo de vidro permite visualizar o fenômeno de separação de Smithells, destacando a chama de pré-mistura da chama de difusão.

O diagrama de Fuidge também é levantado neste trabalho. Este diagrama permite observar qual é o ponto de operação, zona de estabilidade da chama, para cada queimador (Bico de Bunsen) dado um combustível. Esta informação permite ao projetista adequar um queimador a suas condições de projeto e verificar a adaptabilidade do mesmo a um novo combustível ou relação ar-combustível.

Abstract

The aim of this project is the design and built an equipment capable of measuring the laminar flame velocity and to study the flame stability.

The final results were obtained for petroleum gas. They can be compared by with the laminar flame combustion theory described in the text. This theory uses Thermodynamics and Fluid Mechanics hypothesis, added with experimental constants to come with a formula for the laminar flame speed.

Bunsen burners are used to visualize flame stability phenomenon such as yellow-tipping, flashback, liftoff, drop-out and blow-out. Each of the Bunsen Burners was designed to enhance few of these experiences. An aluminum net is also used to show where the stoichiometric region is in a flame. This is possible by observing the flame temperature gradient in the net.

The final aim of observing the flame stability is to draw the Fuidge diagram which can help the projectors to choose burners for their projects according to its specification. The Fuidge diagram shows the flame stability zone for a specific air-fuel ratio versus the fuel power capacity.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO.....	1
3. METODOLOGIA.....	2
4. DEFINIÇÃO BÁSICA DO EQUIPAMENTO - ESQUEMA.....	3
5. EQUACIONAMENTO DA VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR.....	10
5.1 CONCEITOS E SIMPLIFICAÇÕES DAS HIPÓTESES.....	12
5.2 DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO DE VELOCIDADE DE FRENTE DE CHAMA.....	15
6. OUTRAS PROPRIEDADES DE CHAMAS LAMINARES PRÉ-MISTURADAS	32
6.1 LIMITES DE INFLAMABILIDADE	32
6.2 ESTABILIZAÇÃO DE CHAMAS EM QUEIMADORES	34
7. TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA	42
7.1 CÁLCULO DA TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA PARA O GLP (GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO).....	44
7.2 CÁLCULO DA TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA PARA O GÁS NATURAL ..	46
7.3 CÁLCULO DA TEMPERATURA ADIABÁTICA DE CHAMA PARA O ACETILENO	47
8. ESTIMATIVA DA VELOCIDADE DE FRENTE DE CHAMA .	49
8.1 GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO.....	49
8.2 GÁS NATURAL	52
8.3 ACETILENO	54
9. EXTINÇÃO DA CHAMA - QUENCHING BY A COLD WALL	57
10. MÍNIMA ENERGIA DE IGNIÇÃO.....	61

10.1 IGNIÇÃO NÃO FORÇADA.	61
10.2 IGNIÇÃO FORÇADA	62
10.3 MODELAGEM DA IGNIÇÃO FORÇADA	63
11. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	65
11.1 VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR.....	65
11.2 DIAGRAMA DE FUIDGE.....	68
11.2.1 <i>Bico de Bunsen 3/4"</i>	68
11.2.2 <i>Bico de Bunsen 1/2"</i>	70
11.2.3 <i>Bico de Bunsen 1"</i>	73
11.2.4 <i>Consolidação dos Diagramas de Fuidge</i>	76
11.2.5 <i>Imagens dos fenômenos da chama</i>	77
12. CONCLUSÃO.....	80
13. BIBLIOGRAFIA.....	82

Lista de figuras

Figura 4.1. – Equipamento preparado para medir a velocidade de frente de chama laminar.	3
Figura 4.2. – Equipamento preparado para os fenômenos de chama.....	4
Figura 4.3. – Esquema do equipamento de medição de velocidade laminar de frente de chama.	4
Figura 4.4. – Bancada de experimentação.	5
Figura 4.5. – Esquema do misturador.	5
Figura 4.6 – Esquema do Botijão de Gás e válvulas de segurança.....	6
Figura 4.7 – Entrada do tubo de visualização da velocidade laminar de frente de chama.	7
Figura 4.8 – Saída do tubo de visualização da velocidade laminar de frente de chama.	7
Figura 4.9 – Motor e interruptor	8
Figura 4.10 – Tela corta chama na entrada do tubo visualizador da velocidade de frente de chama.	8
Figura 4.11 – Tela corta chama na saída do queimador.	9
Figura 5.2.1 – Princípio de conservação de massa.	15
Figura 5.2.2. – Princípio de Conservação das Espécies.....	17
Figura 5.2.3. - Princípio da conservação da energia.	21
Figura 5.2.4 – Comportamento da temperatura em função da espessura δ , da frente de chama.	25
Figura 5.2.5. – Comportamento da reação química em função da espessura δ da chama.	28
Figura 5.3.6 – Comportamento linear da temperatura da reação de combustão.....	29
Figura 6.1.1. – Limites de Inflamabilidade para $\text{CH}_3 + \text{O}_2$ na presença de N_2 ou CO_2 . Fonte: [7]	33
Figura 6.2.1. – Bico de Bunsen. Fonte: [7]	34
Figura 6.2.2. – Linhas de fluxo de uma chama laminar, pré-misturada. A velocidade de chama (S_u) é apresentada em relação à velocidade de fluxo. Fonte: [7]	35
Figura 6.2.3. – Velocidade de queima e velocidade de pré-mistura dentro do tubo queimador. As linhas a, b e c estão definidas no texto, $dT/2$ é o diâmetro de apagamento. Fonte: [7]	36
Figura 6.2.4. – Formação da chama distorcida. Fonte: [7]	37
Figura 6.2.5. – Esquema dos limites de estabilidade de chama. Fonte: [7]	39
Figura 6.2.6. – Diagrama de estabilidade para o gás natural (a) e para o GLP (b) para um queimador de 2,7 mm de diâmetro e 6,35 mm de comprimento. Fonte: [3]	40
Figura 6.2.7. – Esquema representativo dos limites de velocidade do fluxo de combustível para varias estruturas de chama pré-misturada em função da razão de oxigênio do combustível. Fonte: [7]	41
Figura 7. 1. - – Comportamento da reação química em função da espessura δ da chama.	42
Figura 9.1. – Perda de Calor na superfície de um tubo, parede.	58
Figura 11.1.1 - Velocidade de frente de chama laminar média.	66
Figura 11.2.1.1 – Diagrama de Fuidge para o BB 3/4"	70
Figura 11.2.2.1 – Diagrama de Fuidge para o BB 1/2"	73

Figura 11.2.3.1 – Diagrama de Fuidge para o BB 1"	75
Figura 11.4.1 – Diagrama de Fuidge consolidado para o três Bicos de Bunsen do projeto.	77
Figura 12.2.5.1. – Vizualização do cone azul da chama	77
Figura 12.2.5.2. – Visualização da ponta amarela	78
Figura 12.2.5.3. – Engolimento da chama	78
Figura 12.2.5.4. – Descolamento da chama	79

Lista de tabelas

Tabela 6.1.1. – Limites de Inflamabilidade. Fonte: [7]	32
Tabela 8.1.1. – Composição do Gás Liquefeito de Petróleo - GLP	50
Tabela 8.2.1. – Composição do Gás Natural	52
Tabela 8.3.1. – Composição do Acetileno	54
Tabela 9.1. – Distância Mínima de apagamento	59
Tabela 10.1. - Mínima Energia para Ignição Forçada	64
Tabela 11.1.1 – Medições para determinar a velocidade de frente de chama laminar	66
Tabela 11.2.1.1 – Referência para medição e análise de Dados BB 3/4"	68
Tabela 11.2.1.2 – Medições de dados para o BB 3/4"	69
Tabela 11.2.1.3 – Análise do fenômeno de descolamento para o BB 3/4"	69
Tabela 11.2.1.4 – Análise do fenômeno de engolimento para o BB 3/4"	69
Tabela 11.2.1.5 – Análise do fenômeno de ponta amarela para o BB 3/4"	70
Tabela 11.2.2.1 – Referência para medição e análise de Dados BB 1/2"	71
Tabela 11.2.2.2 – Medições de dados para o BB 1/2"	71
Tabela 11.2.2.3 – Análise do fenômeno de descolamento para o BB 1/2"	72
Tabela 11.2.2.4 – Análise do fenômeno de engolimento para o BB 1/2"	72
Tabela 11.2.2.5 – Análise do fenômeno de ponta amarela para o BB 1/2"	72
Tabela 11.2.3.1 – Referência para medição e análise de Dados BB 1"	74
Tabela 11.2.3.2 – Medições de dados para o BB 1"	74
Tabela 11.2.3.3 – Análise do fenômeno de descolamento para o BB 1"	74
Tabela 11.2.3.4 – Análise do fenômeno de engolimento para o BB 1"	75
Tabela 11.2.3.5 – Análise do fenômeno de ponta amarela para o BB 1"	75

Lista de símbolos

- g - Gravidade $9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$;
- ρ - Densidade da mistura $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$;
- $\forall_{vc}$ - Volume de controle $[m^3]$;
- m - Massa $[kg]$
- $\dot{m}$ - Vazão mássica $\left[\frac{kg}{s} \right]$;
- $\dot{m}^{II}$ - Vazão mássica pela área perpendicular ao deslocamento da mistura $\left[\frac{kg}{m^2 * s} \right]$;
- $\dot{m}^{III}$ - Taxa de produção de um elemento dentro do volume de controle;
- h - Entalpia $\left[\frac{kJ}{kmol} \right]$;
- $\dot{Q}^{II}$ - Taxa troca de calor, por segundo, pela área perpendicular ao deslocamento da mistura $\left[\frac{W}{m^2 * s} \right]$;
- T_u - Temperatura da mistura ar-combustível antes da reação, reagentes;
- T_b - Temperatura da mistura ar-combustível depois da reação, produtos;
- T_{ad} - Temperatura adiabática de chama.

1. Introdução

O presente documento constitui o relatório final do 2º semestre de 2005 da disciplina PME 2599 – Projeto Integrado II.

Toda teoria estudada, na engenharia, em sala de aula fica mais bem assimilada quando complementada por um experimento laboratorial, em que se pode visualizar o fenômeno o qual se está estudando. Em se tratando de combustão esse fato é ainda mais evidente, já que estes fenômenos não são somente termodinâmicos, mas também químicos. Observando-se essa necessidade, surgiu este trabalho de formatura.

Dessa forma será projetado e construído um medidor de velocidade de propagação de frente de chama e visualizador de outros fenômenos. Esse equipamento terá fins didáticos e pretende mostrar, de forma visível e a olho nu, os processos de propagação de uma chama laminar, engolimento de chama, formação de fuligem, ponta amarela, descolamento de chama e limites de inflamabilidade. Ao término de sua construção ele será de propriedade da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Assim, com a realização deste trabalho acreditamos que vamos contribuir e retornar para a Universidade Pública e para sociedade uma pequena parcela daquilo que em nós foi investido nesses 5 anos de estudos dedicados a engenharia.

2. Objetivo

O objetivo deste projeto de formatura é projetar e construir um medidor de velocidade de propagação de chama e Bicos de Bunsen. Esse equipamento terá fins didáticos e pretende mostrar, de forma visível a olho nú, os processos de propagação de uma chama laminar, engolimento de chama, formação de fuligem, ponta amarela, descolamento e limites de inflamabilidade.

3. Metodologia

A metodologia definida para esse projeto se constitui na divisão do projeto em etapas distintas, como segue:

- Revisão bibliográfica destes medidores
 - Procura bibliográfica em livros, busca de equipamentos similares na Internet e conversando com profissionais da área;
- Revisão de conceitos de combustão
 - Termodinâmica, chama laminar pré-misturada, propriedades da chama laminar (descolamento, engolimento, ponta amarela e fuligem)
 - Detalhamento do equipamento
- Definição das dimensões, materiais e layout
- Elaboração relatório de custos
- Projeto do misturador
 - Definição das suas dimensões, local de entrada de ar e de combustível, material
- Projeto do ignitor e Bicos de Bunsen
 - Definição do ignitor (centelha) e dos Bicos de Bunsen que irão contemplar as diferentes chamas
- Construção e montagem
- Testes

4. Definição Básica do Equipamento - Esquema

A visualização da velocidade laminar de frente de chama se dará através da observação do deslocamento da frente de chama pelo tubo de plástico. A velocidade deve ser medida a partir de um esquema utilizando-se métodos visuais. A visualização dos outros fenômenos já citados como, por exemplo, o engolimento de chama se dará através do acoplamento do Bico de Bunsen diretamente no misturador com a utilização de um elemento rosqueado.

Os passos para a realização do experimento que visualiza a velocidade laminar de chama e os outros fenômenos associados à combustão estão detalhados no Manual de Utilização.

Esquema do equipamento para realizar equipamentos para medir a velocidade de frente de chama laminar:

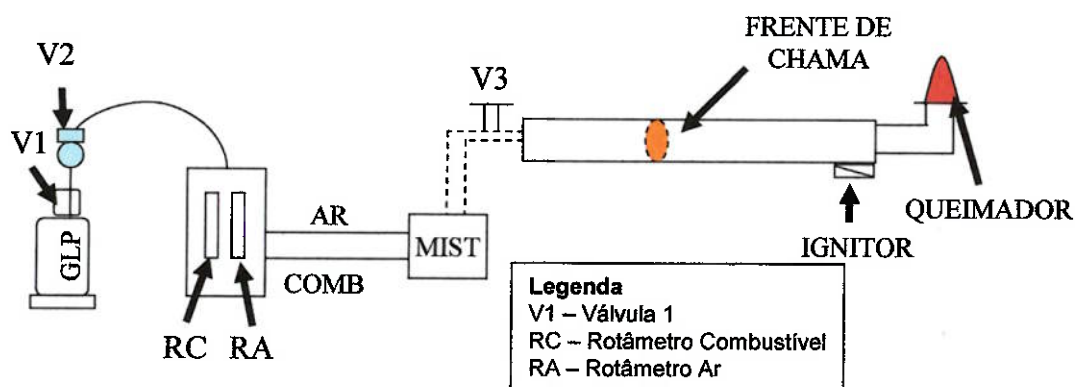


Figura 4.1. – Equipamento preparado para medir a velocidade de frente de chama laminar.

Esquema do equipamento para visualizar fenômenos de chama:

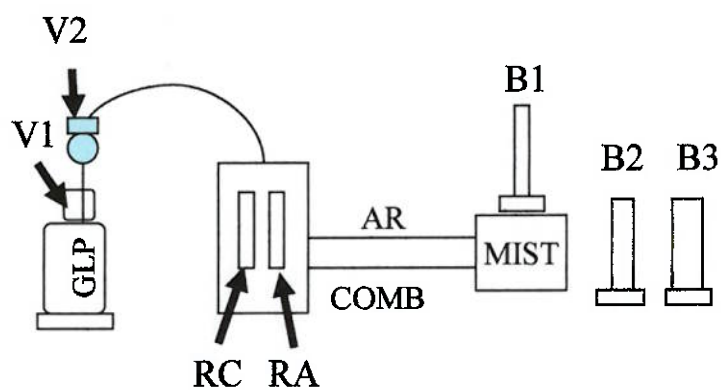


Figura 4.2. – Equipamento preparado para os fenômenos de chama.

Para melhor compreensão destes dois esquemas, a seguir, estão apresentadas fotos do equipamento terminado, com setas indicando os componentes do equipamento:



Figura 4.3. – Esquema do equipamento de medição de velocidade laminar de frente de chama.

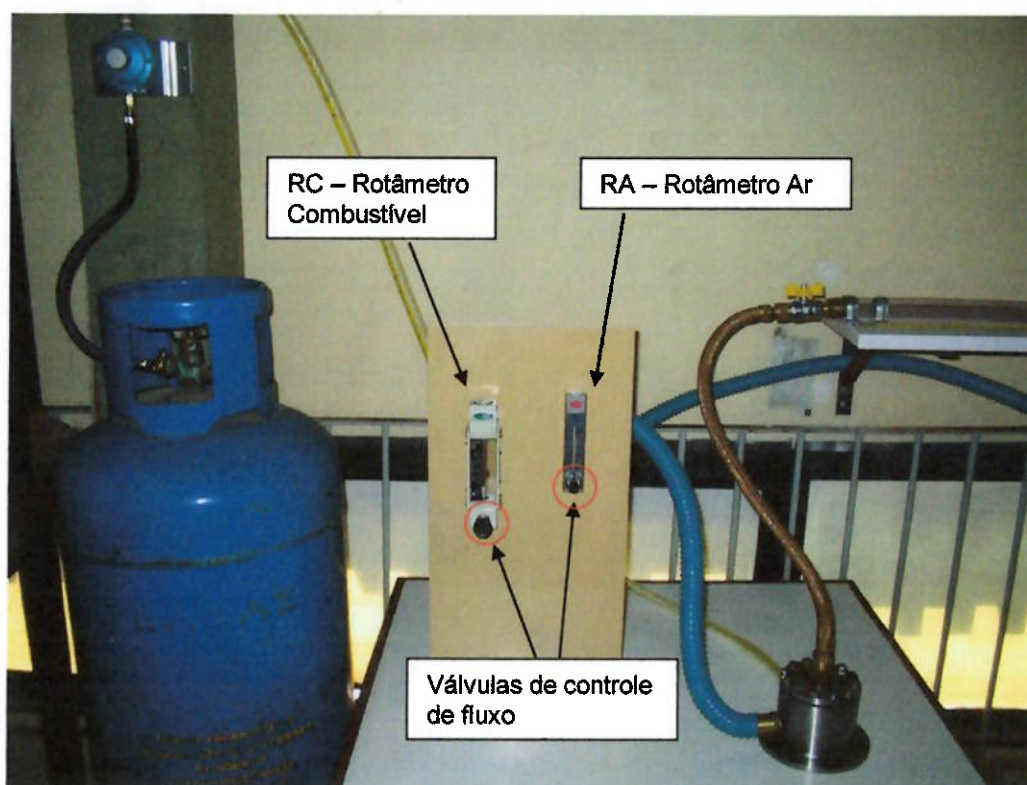


Figura 4.4. – Bancada de experimentação.

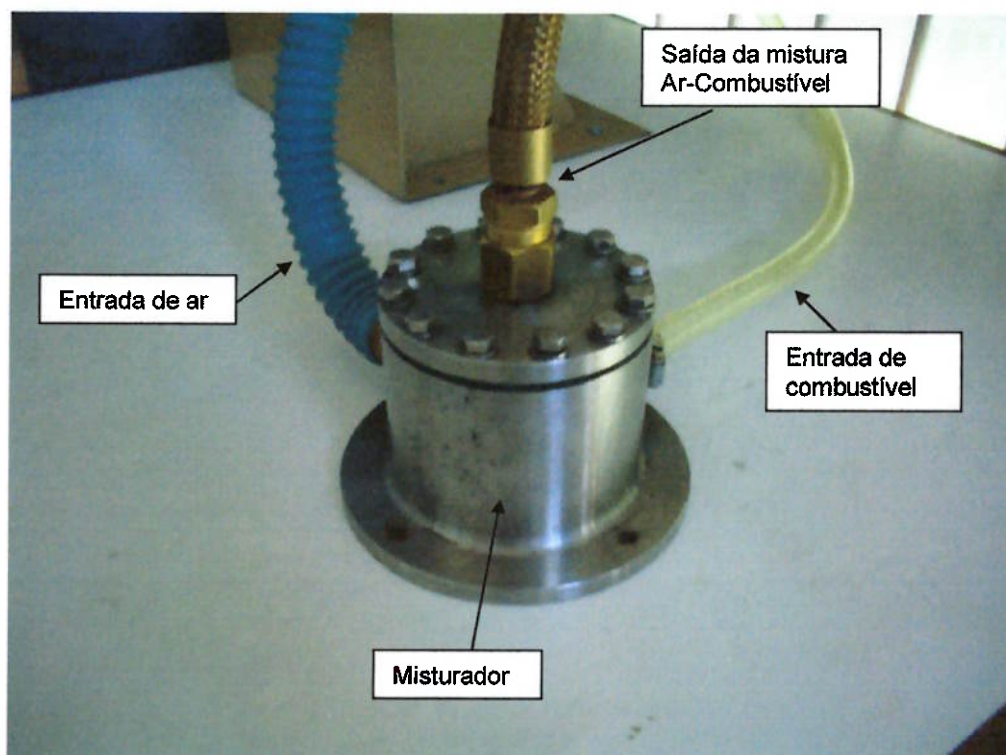


Figura 4.5. – Esquema do misturador.

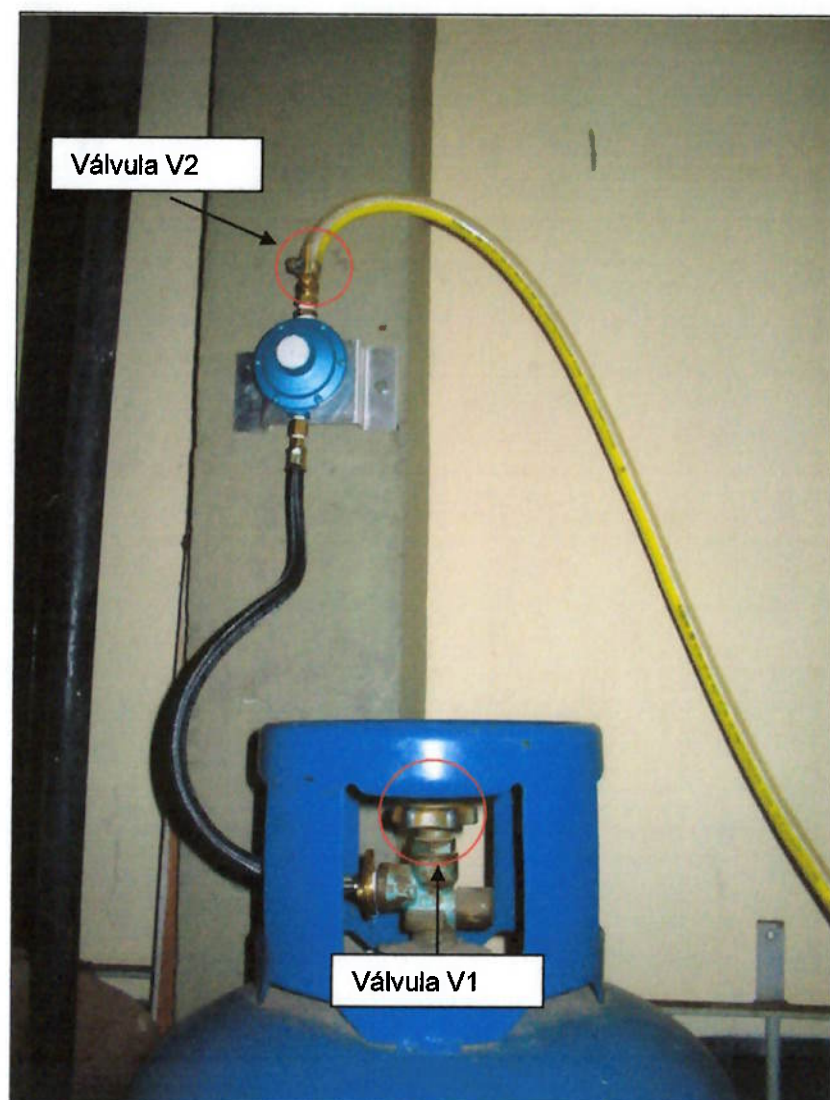


Figura 4.6 – Esquema do Botijão de Gás e válvulas de segurança.

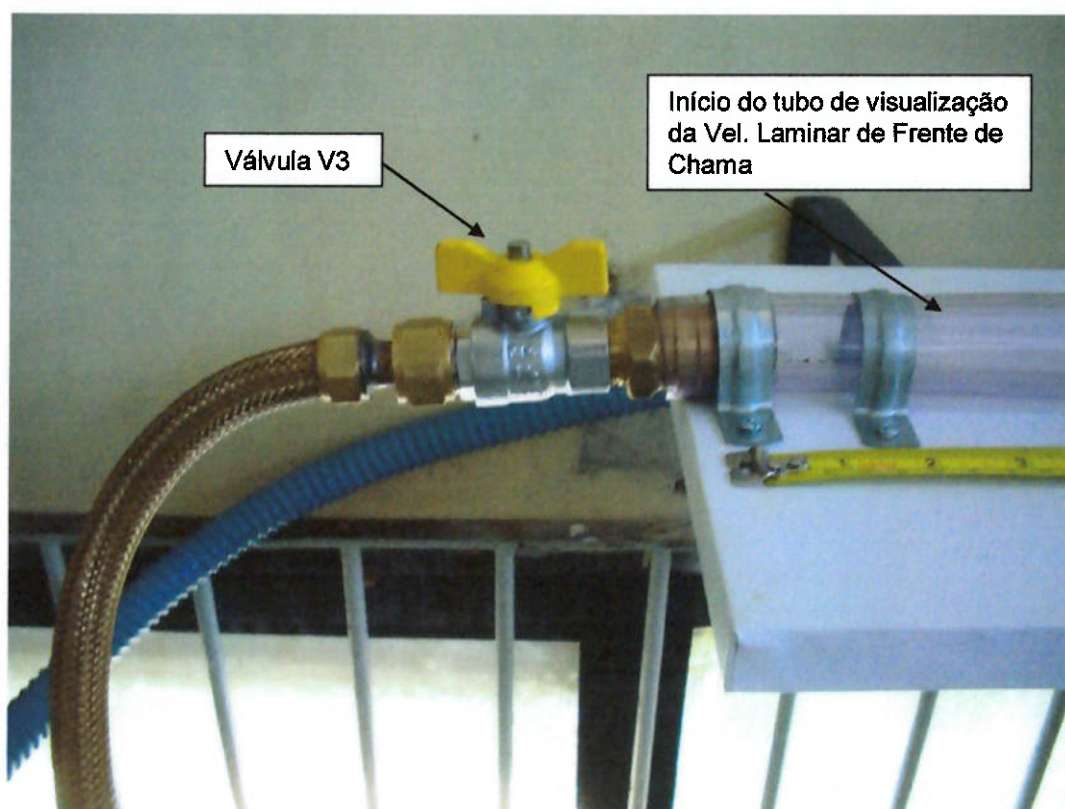


Figura 4.7 – Entrada do tubo de visualização da velocidade laminar de frente de chama.

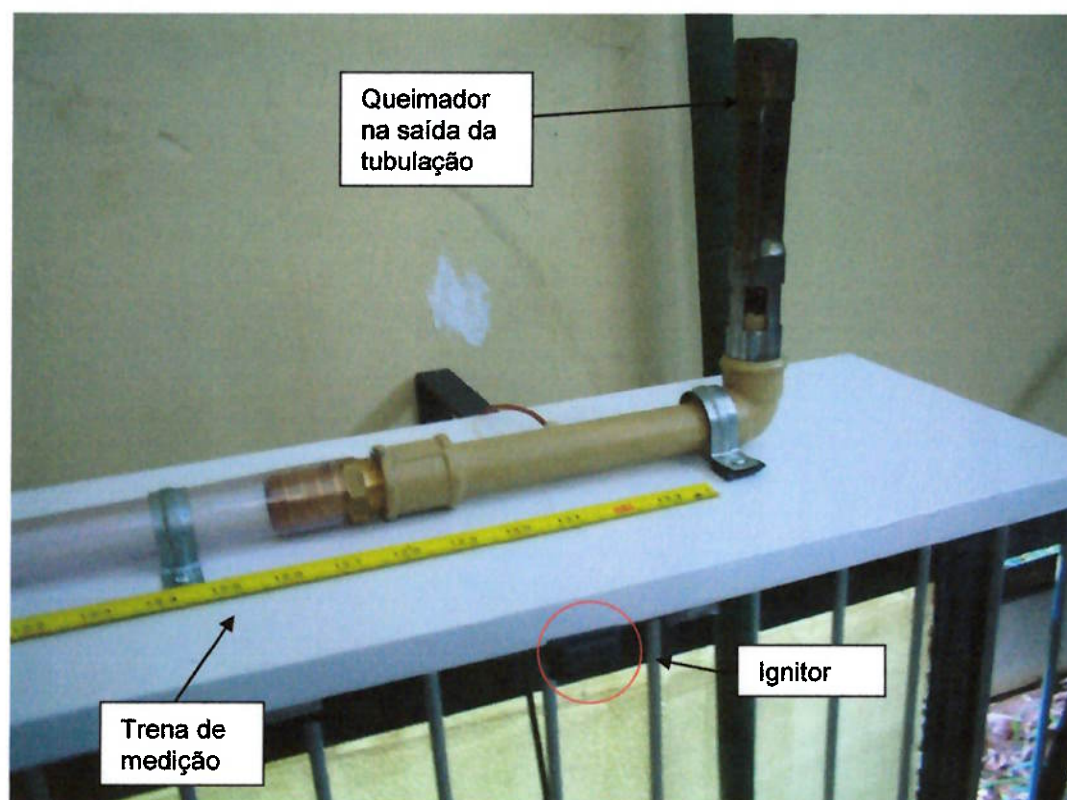


Figura 4.8 – Saída do tubo de visualização da velocidade laminar de frente de chama.

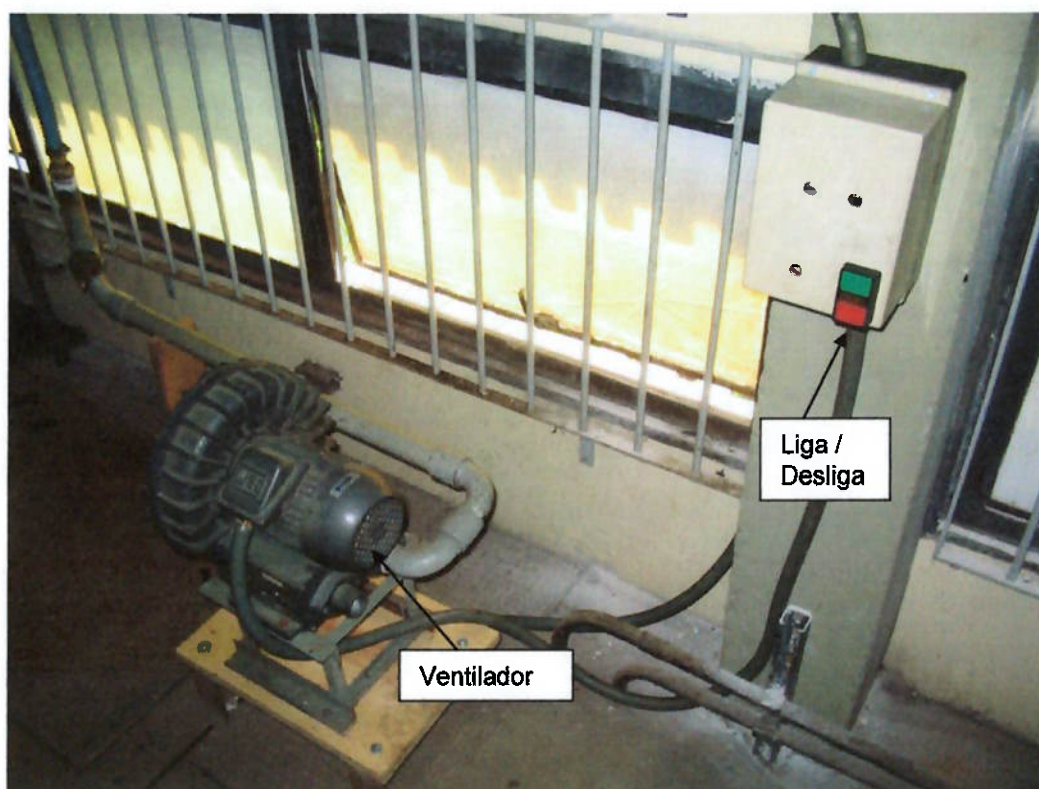


Figura 4.9 – Motor e interruptor .



Figura 4.10 – Tela corta chama na entrada do tubo visualizador da velocidade de frente de chama.

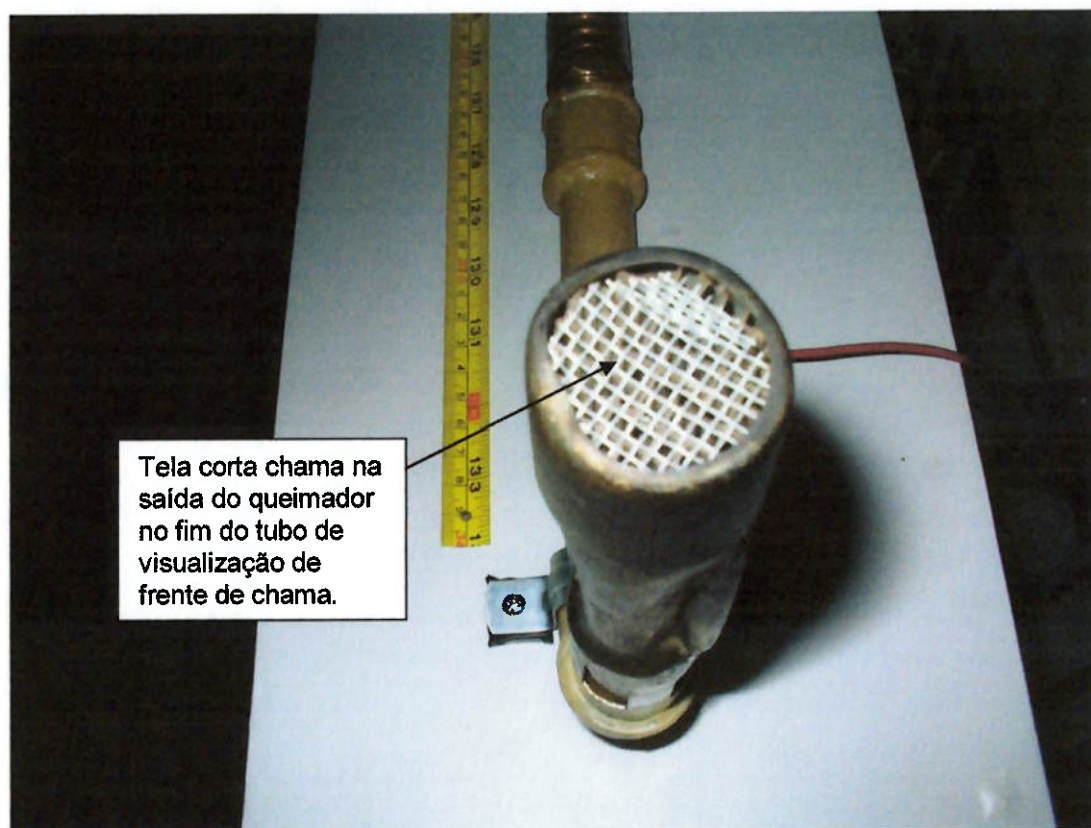


Figura 4.11 – Tela corta chama na saída do queimador.

5. Equacionamento da velocidade de chama laminar

A análise a seguir é feita segundo a proposição realizada por Spalding [3] – aonde o problema é abordado de maneira física sem grandes formulações matemáticas. São analisados os princípios de transferência de calor, transferência de massa, cinética química e termodinâmica para entender os fatores que governam a velocidade de chama e a espessura da mesma (“thickness”).

Hipóteses

- Deslocamento unidimensional de área constante;
- Energia cinética, energia potencial, viscosidade do meio de trabalho, e radiação térmica são desprezíveis;
- Pressão constante – despreza-se a variação de pressão pela chama;
- A difusão de calor e a difusão massa seguem os princípios da Lei de Fourier e Lei de Fick;
- Número de Lewis, que expressa a taxa de difusividade térmica para difusividade mássica é 1 (um);
- O calor específico da mistura não depende da temperatura e pressão – o calor específico da mistura é constante;
- A reação estequiométrica descrita ocorre em um único passo;
- O combustível é completamente consumido pela chama;
- A mistura ar - combustível se comporta como um gás perfeito

Assumindo as hipóteses acima obtém-se a seguinte equação de velocidade de frente de chama:

$$S_L = \left[-2\alpha(\nu + 1) \frac{\bar{m}_F^{III}}{\rho_u} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [5.1]$$

Onde:

S_L - velocidade laminar de chama;

α - difusividade térmica;

ν - taxa estequiométrica ar-combustível;

$\dot{m}_F$ - taxa média de produção de combustível da reação química por unidade de volume;

ρ_u – massa específica da mistura ar-combustível antes da queima;

Para explicar a origem desta fórmula matemática será explicitado a seguir os conceitos e simplificações de cada hipótese. Em seguida será demonstrada a teoria que leva a fórmula [5.1].

5.1 Conceitos e Simplificações das Hipóteses

- **Deslocamento unidimensional de área constante;**

Para ilustrar o fenômeno físico que rege o problema, as equações de conservação serão descritas como se o fenômeno de combustão ocorresse apenas em uma direção do plano cartesiano. Para o experimento descrito esta direção corresponde ao comprimento do tubo aonde a frente de chama pode ser observada.

Contudo, esta simplificação pode ser utilizada coerentemente para o estudo de um escoamento laminar. Em um escoamento turbulento, diferentes gradientes de temperatura provocam altas taxas de difusão de espécies químicas causadas por efeitos térmicos. Este efeito invalida a aproximação de deslocamento unidimensional já que o gradiente de T não é constante no plano perpendicular ao deslocamento.

Esta consideração determina a abordagem que será utilizada para a Lei de Fick. Considerar o escoamento unidimensional restringe que a difusão de espécies também seja unidimensional.

- **Energia cinética, energia potencial, viscosidade do meio de trabalho, e radiação térmica são desprezíveis;**

A radiação térmica não é considerada na lei de conservação de energia. Isto faz com que a troca de calor no volume de controle que delimita a zona de combustão seja definida apenas pela troca por condução devido à diferença de temperatura e a troca de calor devido à difusão das espécies.

A energia cinética é desconsiderada no princípio da conservação de energia porque sua magnitude é infinitesimal comparativamente aos outros termos da equação. Pelo mesmo motivo se desconsidera a energia potencial. Os efeitos de viscosidade não afetam o deslocamento e a velocidade de frente de chama numa magnitude grande o suficiente para que possa ser considerado no trabalho, observando os combustíveis que estão sendo utilizados nas experiências de combustão.

- **Pressão constante – despreza-se a variação de pressão pela chama;**

Desprezar a variação de pressão pela chama significa inicialmente dizer que o gradiente de pressão é nulo. Deste modo, difusão das espécies não é regido pelo fenômeno de difusão por pressão.

Esta consideração é feita porque para os experimentos realizados deste trabalho os efeitos da difusão por pressão são mínimos. Negligenciar o efeito de difusão por pressão permite uma compreensão mais clara dos fenômenos físicos que regem os experimentos.

- **A difusão de calor e a difusão massa seguem os princípios da Lei de Fourier e Lei de Fick**

O princípio de conservação de energia e o princípio de conservação de massa são regidos pelas Leis de Fourier e Fick para a proposição do cálculo de velocidade de frente de velocidade de chama.

- **Número de Lewis, que expressa a taxa de difusividade térmica para difusividade mássica é 1 (um) – resultando em simplificações na equação de energia pois a igualdade $k/c_p = \rho D$ passa a ser válida;**

O cálculo da troca de calor (princípio da conservação de energia) é composto por três parcelas. A primeira se refere à troca por condução em função de um gradiente de temperatura. A segunda se refere à troca por difusão dos elementos da mistura ar-combustível antes e depois da combustão. A terceira parcela se refere a efeitos de radiação desconsiderados neste problema conforme hipótese descrita abaixo.

Para muitos elementos, misturas, presentes em processos de combustão a razão entre a parcela da troca de calor por condução pela parcela de troca por difusividade se aproxima da unidade. A hipótese do número de Lewis ser unitário significa que as duas parcelas descritas têm o mesmo valor.

- **O calor específico da mistura não depende da temperatura e pressão – o calor específico da mistura é constante;**

Para os cálculos realizados de velocidade de propagação de chama é utilizado um valor único de calor específico que não depende das variações de pressão e temperatura da mistura. O calor específico é obtido pela o valor da temperatura média da mistura ar-combustível antes e depois da combustão, isto é, $(T_b + T_U)/2$.

- **A reação estequiométrica descrita ocorre em um único passo;**

Uma reação de combustão é totalmente descrita quando todas as etapas de quebra do comburente são consideradas no processo, isto é, quando todas as equações químicas que regem o processo de combustão são consideradas.

Entretanto, considerar todos os detalhes de uma reação de combustão de vários elementos significa aumentar exponencialmente a complexidade matemática e física que governam o problema.

Seguindo a proposição simplificativa descrita por Spalding, o problema será descrito em equações estequiométricas aonde o comburente é totalmente transformado em produtos de combustão em uma única etapa, sem considerar as etapas intermediárias.

- **O combustível é completamente consumido pela chama;**

O princípio de conservação das espécies assume que a mistura ar-combustível ocorre na proporção estequiométrica sem excesso de ar. O combustível é totalmente consumido, e não existem comburentes após a reação de combustão.

Essa hipótese é feita para simplificar em um segundo momento o princípio de conservação da energia. Se não existem comburentes após a reação, é possível eliminar a resolução de equações de iteração entre os reagentes e produtos por difusão das espécies, simplificando a proposição para obter a velocidade de frente de chama.

- A mistura ar-combustível se comporta como um gás perfeito;

A entalpia da mistura é obtida como se a mesma se comportasse como um gás perfeito. Portanto, o calor específico e a temperatura são as variáveis que determinam qual são os valores de entalpia da mistura antes e depois da combustão.

5.2 Desenvolvimento da Equação de Velocidade de Frente de Chama

- Princípio de conservação de massa

Princípio de Conservação de Massa / Deslocamento Unidimensional

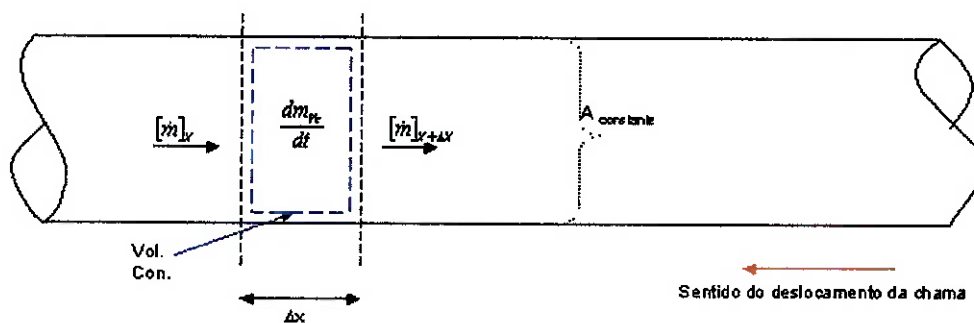


Figura 5.2.1 – Princípio de conservação de massa.

Para demonstrar o princípio de conservação da massa considera-se um deslocamento unidimensional no comprimento do tubo. A massa entra em x e sai em $x+\Delta x$, aonde a diferença entre o fluxo na entrada e na saída significa a taxa de massa que é acumulada ou retirada do volume de controle.

Assim:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = [\dot{m}]_x - [\dot{m}]_{x+\Delta x} \quad [5.2.1]$$

Para o volume de controle considerado é possível obter a massa multiplicando-se o volume de controle pela densidade da mistura. E o volume de controle é dado pela área A (constante) multiplicada por Δx .

Assim:

$$m_{vc} = \rho v_{vc} = \rho A \Delta x \quad [5.2.2]$$

A vazão mássica que entra e sai do sistema é obtida através do fluxo que entra ou sai (velocidade de entrada e saída de gases do volume de controle) multiplicado pela área e densidade.

Assim:

$$[\dot{m}]_x = \rho v_x A \quad \text{e} \quad [\dot{m}]_{x+\Delta x} = \rho v_{x+\Delta x} A \quad [5.2.3]$$

Substituindo as equações [5.2.2] e [5.2.3] em [5.2.1] e dividindo a equação por A (área), finita e positiva, presente nos três termos da equação, tem-se:

$$\frac{d(\rho \Delta x)}{dt} = [\rho v_x] - [\rho v_{x+\Delta x}] \quad [5.2.4]$$

Para estudar a conservação de massa na região de combustão é necessário um volume de controle infinitesimal. Isto é obtido com o limite de $\Delta x \rightarrow 0$. Reorganizando a equação [5.2.4] para a nova condição, tem-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} \quad [5.2.5]$$

Como o escoamento é constante a densidade da mistura de gás não se altera em função do tempo instantaneamente. O que ocorre no fenômeno de combustão do equipamento proposto é que a densidade muda em função da posição do fluxo, já que a densidade dos gases do produto da combustão é muito menor que a densidade da mistura de gases reagentes. Assim a reação [5.2.1.5] é simplificada para a seguinte condição:

$$\boxed{\frac{d(\rho v_x)}{dx} = 0 \quad \therefore \quad \rho v_x = cste.} \quad [5.2.6]$$

A última equação possui o significado físico que o fluxo mássico em função da área $\dot{m}''$ é constante durante todo o escoamento (escoamento é equivalente a

chama percorrendo o tubo, já que a chama consome os reagentes). Portanto, a velocidade do escoamento muda em função da posição x , já que o produto ρv_x é constante. A densidade dos reagentes é maior que a do produto, portanto o inverso ocorre com a velocidade.

- **Princípio da Conservação das Espécies (Transferência de Massa)**

O princípio de conservação das espécies é obtido através da Lei de Fick, que utiliza a taxa de transporte/geração de espécies para desenvolver uma lei de conservação mássica em um volume de controle definido.

A Lei de Fick descreve a taxa de difusão de uma espécie dentro de outra. Através da restrição imposta pela primeira hipótese que a difusão ocorre em uma única direção, podemos simplificar a Lei de Fick através da equação abaixo:

$$\dot{m}_A'' = Y_A (\dot{m}_A'' + \dot{m}_B'') - \rho D_{AB} \frac{dY_A}{dx} \quad [5.2.7]$$

Em um volume de controle definido, uma espécie A atravessa o volume “entrando” e “saindo” do mesmo através da difusão das espécies, de um deslocamento da mistura ou pode ser criada/destruída através de uma reação química. A formação/destruição da espécie A e seu deslocamento em um volume de controle é demonstrado na figura abaixo.

Princípio de Conservação das Espécies / Deslocamento Unidimensional

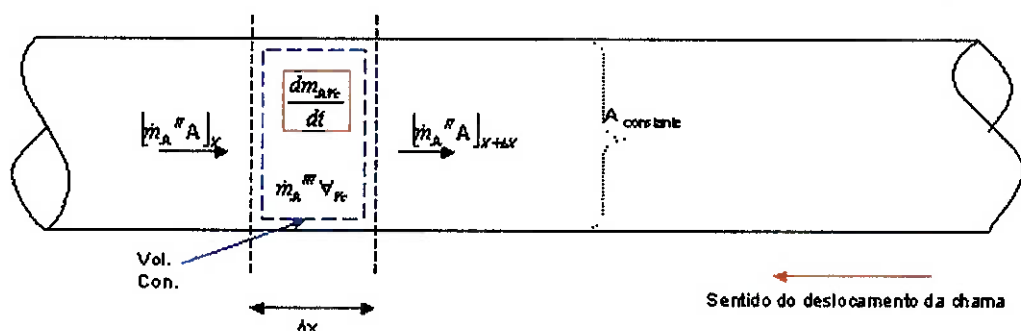


Figura 5.2.2. – Princípio de Conservação das Espécies.

A taxa de aumento de massa da espécie A em um volume de controle pode ser fornecida pela equação a seguir:

$$\frac{dm_{AVc}}{dt} = \left[\dot{m}_A^{II} A \right]_X - \left[\dot{m}_A^{II} A \right]_{X+\Delta X} + \dot{m}_A^{III} \forall_{Vc} \quad [5.2.8]$$

Onde:

- $\frac{dm_{AVc}}{dt}$ → Taxa de aumento de massa da espécie A dentro do volume de controle;
- $\left[\dot{m}_A^{II} A \right]_X$ → Vazão mássica da espécie A que entra / sai no volume de controle em x;
- $\left[\dot{m}_A^{II} A \right]_{X+\Delta X}$ → Vazão mássica da espécie A que entra / sai no volume de controle em x+Δx;
- $\dot{m}_A^{III} \forall_{Vc}$ → Taxa produção / destruição da espécie A através de uma reação química dentro do volume de controle;

A massa contida dentro do volume de controle $\forall_{Vc}$ é dada através da seguinte equação:

$$m_{A,Vc} = Y_A m_{Vc} = Y_A \rho \forall_{Vc} \quad [5.2.9]$$

Utilizando a equação [5.2.9] para simplificar a equação [5.2.8], e dividindo o resultado por $A\Delta x$:

$$\begin{aligned} A\Delta x \frac{\partial(\rho Y_A)}{\partial t} &= A \left[Y_A \dot{m}^{II} - \rho D_{AB} \frac{\partial Y_A}{\partial x} \right]_X - A \left[Y_A \dot{m}^{II} - \rho D_{AB} \frac{\partial Y_A}{\partial x} \right]_{X+\Delta X} + \dot{m}_A^{III} A\Delta x \\ \frac{\partial(\rho Y_A)}{\partial t} &= - \frac{\partial}{\partial x} \left[Y_A \dot{m}^{II} - \rho D_{AB} \frac{\partial Y_A}{\partial x} \right]_{X+\Delta X} + \dot{m}_A^{III} \end{aligned}$$

Como o escoamento é constante, regime permanente, a fração de massa no volume de controle (Y_A) não muda em função do tempo, logo

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho Y_A)}{\partial t} &= 0 \rightarrow \\ \rightarrow \dot{m}_A^{III} - \frac{d}{dx} \left[Y_A \dot{m}^{II} - \rho D_{AB} \frac{dY_A}{dx} \right] &= 0 \\ \rightarrow \dot{m}_A^{III} &= \frac{d}{dx} (\dot{m}^{II} Y_A) - \frac{d}{dx} \left(\rho D_{AB} \frac{dY_A}{dx} \right) \quad [5.2.10]\end{aligned}$$

Onde:

- $\frac{d}{dx} (\dot{m}^{II} Y_A)$ - Fluxo de massa da espécie A por convecção, por unidade de volume;
- $\frac{d}{dx} \left(\rho D_{AB} \frac{dY_A}{dx} \right)$ - Fluxo de massa da espécie A por difusão, por unidade de volume;

O princípio da conservação das espécies para diversos elementos químicos, além de A, pode ser generalizado da seguinte maneira:

$$\frac{d\dot{m}_i^{II}}{dx} = \dot{m}_i^{III} \quad \text{Para } i = 1, 2, \dots, N. \quad [5.2.11]$$

A reação de combustão de um comburente pode ser dividida em três parcelas, o combustível, o oxidante (ar) e os produtos de combustão. A relação molar entre as três parcelas pode ser obtida através da reação estequiométrica sem excesso de ar, condição de estudo do presente trabalho.

Para o combustível e o oxidante, existe uma taxa de consumo das espécies, devido à característica química de uma equação de combustão:

$\dot{m}_F^{III}$ - taxa de consumo do combustível no volume de controle;

$\dot{m}_{OX}^{III}$ - taxa de consumo do oxidante no volume de controle;

Para o produto de combustão existe uma taxa de produção de espécies:

$\dot{m}_{Pr}^{III}$ - taxa de produção dos produtos de combustão no volume de controle;

Para a reação de combustão na proporção estequiométrica, sem excesso de ar, tem-se:

1 Kg combustível + ν Kg de oxidant $\rightarrow$ (1 + ν) Kg produtos de combustão

$$\dot{m}_F^{III} = \frac{1}{\nu} \dot{m}_{OX}^{III} = -\frac{1}{(1 + \nu)} \dot{m}_{Pr}^{III} \quad [5.2.12]$$

Portanto a equação [5.2.1.10] para cada espécie, considerando a equação [5.2.12], é descrita por:

Combustível

$$\dot{m}^{II} \frac{dY_F}{dx} - \frac{d\left(\rho D \frac{dY_F}{dx}\right)}{dx} = \dot{m}_F^{III} \quad [5.2.13.a]$$

Oxidante

$$\dot{m}^{II} \frac{dY_{OX}}{dx} - \frac{d\left(\rho D \frac{dY_{OX}}{dx}\right)}{dx} = \nu \dot{m}_F^{III} \quad [5.2.13.b]$$

Produtos de Combustão

$$\dot{m}^{II} \frac{dY_{Pr}}{dx} - \frac{d\left(\rho D \frac{dY_{Pr}}{dx}\right)}{dx} = -(1 + \nu) \dot{m}_F^{III} \quad [5.2.13.c]$$

O princípio de conservação das espécies é utilizado para simplificar o princípio da conservação de energia como será demonstrado abaixo. A hipótese de assumir um deslocamento unidimensional cuja difusão é regida pela Lei de Fick e a hipótese que o número de Lewis é unitário combinadas eliminam a necessidade de resolver as equações do princípio de conservação das espécies.

• Princípio da Conservação de Energia

Para demonstrar o princípio de conservação da energia considera-se um deslocamento unidimensional de massa no comprimento do tubo. Os fluxos de energia também são considerados no sentido do comprimento, assumindo que não existe troca de calor na parede do tubo no comprimento Δx aonde ocorre à reação de combustão dos reagentes.

Princípio de Conservação de Energia

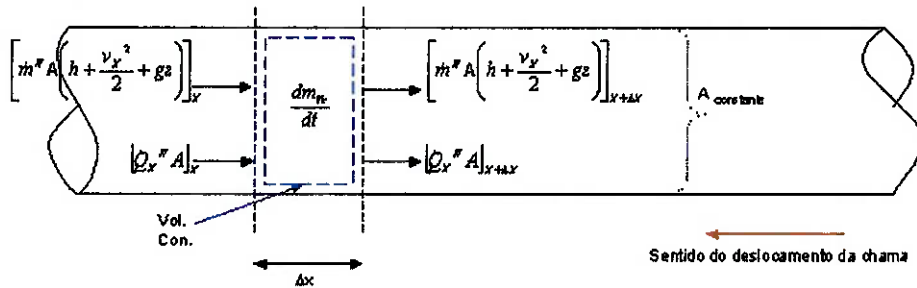


Figura 5.2.3. - Princípio da conservação da energia.

Para as considerações feitas, seguindo o esquema acima, se pode expressar a primeira lei da termodinâmica da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} (\dot{Q}_X'' - \dot{Q}_{X+\Delta X}'')A - \dot{W}_{vc} = \\ = \dot{m}'' A \left[\left(h + \frac{v_X^2}{2} + gz \right)_{X+\Delta X} - \left(h + \frac{v_X^2}{2} + gz \right)_X \right] \end{aligned} \quad [5.2.14]$$

Para o escoamento proposto se assume deslocamento constante, isto é, a velocidade de frente de chama não muda conforme a posição do tubo significando uma mistura de gás-combustível constante dentro do tubo. Portanto não há um acúmulo de energia dentro do tubo, o que permite anular o termo gz da equação. Para o volume de controle considerado também não há trabalho. Utilizando as duas conclusões leva equação [5.2.14] se reduzir a:

$$(\dot{Q}_X'' - \dot{Q}_{X+\Delta X}'')A = \dot{m}'' A \left[\left(h + \frac{v_X^2}{2} \right)_{X+\Delta X} - \left(h + \frac{v_X^2}{2} \right)_X \right] \quad [5.2.15]$$

Dividindo a equação pela A constante nos dois termos da equação e diferente de zero, e re-allocando o primeiro termo da equação:

$$-\left(\dot{Q}_{X+\Delta X}'' - \dot{Q}_X''\right) = \dot{m}'' \left[\left(h + \frac{v_X^2}{2} \right)_{X+\Delta X} - \left(h + \frac{v_X^2}{2} \right)_X \right] \quad [5.2.16]$$

Para o limite de ΔX tendendo a zero, a equação [5.2.15] é escrita na forma diferencial como:

$$-\frac{d\dot{Q}_X''}{dx} = \dot{m}'' \left(\frac{dh}{dx} + v_X \frac{dv_X}{dx} \right) \quad [5.2.17]$$

Para resolução da equação apresentada é necessário observar e resolver o primeiro termo da equação. A troca de calor é composta pela condução térmica causada pela diferença de temperaturas no volume de controle e a parcela da difusão térmica. A radiação não é considerada, vide hipóteses.

A parcela da troca de calor relacionada à difusão das espécies é regida pela Lei de Fick. Utilizando a equação [5.2.7] se explicita o termo $\dot{m}''$ da equação. Considera-se que a difusividade que caracteriza a mistura ar-combustível é única. Assim o primeiro termo da equação é dado por:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_X'' &= -k \nabla T + \sum \dot{m}_i'' \text{ difusão } h_i = -k \frac{dT}{dx} - \sum \rho D \frac{dY_i}{dx} h_i = \\ &= -k \frac{dT}{dx} - \rho D \sum \frac{dY_i}{dx} h_i \end{aligned} \quad [5.2.18]$$

Re-escrevendo a equação, utilizando operações matemáticas de cálculo:

$$\begin{aligned} \frac{(f+g)(p)}{dp} &= \frac{f(p)}{dp} + \frac{g(p)}{dp} \therefore \\ \frac{d \sum h_i Y_i}{dx} &= \sum h_i \frac{dY_i}{dx} + \sum Y_i \frac{dh_i}{dx} \\ \sum \frac{dY_i}{dx} h_i &= \frac{d \sum h_i Y_i}{dx} - \sum Y_i \frac{dh_i}{dx} \end{aligned}$$

Utilizando a definição $h \equiv \sum h_i Y_i$, se simplifica a equação e utilizando a hipótese que a mistura ar-combustível se comporta como um gás perfeito, $h = c_p (T - T_0)$. Assim, a equação [5.2.18] é re-escrita como:

$$\dot{Q}_X'' = -k \frac{dT}{dx} - \rho D \frac{dh}{dx} + \rho D c_p \frac{dT}{dx} \quad [5.2.19]$$

Utilizando a hipótese que o número de Lewis é unitário: $\alpha = D$ onde $\alpha \equiv \frac{k}{\rho c_p}$. Então:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_X'' &= -\alpha \rho c_p \frac{dT}{dx} + \rho \alpha c_p \frac{dT}{dx} - \rho D \frac{dh}{dx} \rightarrow \\ &\rightarrow \dot{Q}_X'' = -\rho D \frac{dh}{dx} \end{aligned} \quad [5.2.20]$$

Substituindo a equação [5.2.20] na equação [5.2.17] tem-se:

$$\frac{d}{dx} \left(\rho D \frac{dh}{dx} \right) = \dot{m}'' \frac{dh}{dx} + \dot{m}'' v_x \frac{dv_x}{dx} \quad [5.2.21]$$

Utilizando a lei de Fick (eq. [5.2.7]) e a definição de entalpia absoluta dada por $h = \sum Y_i h_{f,i}^0 + \int_{T_{ref}}^T c_p dT$, tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \left[\rho D \sum h_{f,i}^0 \frac{dY_i}{dx} + \rho D \frac{d \int c_p dT}{dx} \right] &= \dot{m}'' \sum h_{f,i}^0 \frac{dY_i}{dx} + \dot{m}'' \frac{d \int c_p dT}{dx} + \dot{m}'' v_x \frac{dv_x}{dx} \rightarrow \\ &\rightarrow \dot{m}'' \frac{d \int c_p dT}{dx} - \frac{d}{dx} \left[\rho D \frac{d \int c_p dT}{dx} \right] + \dot{m}'' v_x \frac{dv_x}{dx} = -\frac{d}{dx} \left[\sum h_{f,i}^0 \left(\dot{m} Y_i - \rho D \frac{dY_i}{dx} \right) \right] \end{aligned}$$

Aonde:

$$-\frac{d}{dx} \left[\sum h_{f,i}^0 \left(\dot{m} Y_i - \rho D \frac{dY_i}{dx} \right) \right] = \frac{d}{dx} \left[\sum h_{f,i}^0 \dot{m}_i'' \right] = -\sum h_{f,i}^0 \dot{m}_i'''$$

Então:

$$\dot{m}'' \frac{d \int c_p dT}{dx} - \frac{d}{dx} \left[\rho D \frac{d \int c_p dT}{dx} \right] + \dot{m}'' v_x \frac{dv_x}{dx} = - \sum h_{f,i}^0 \dot{m}_i''' \quad [5.2.22]$$

A hipótese que a energia cinética é negligenciada no princípio da conservação de energia por sua magnitude leva a simplificação da equação acima. Desconsiderando este termo, o princípio da conservação de energia resulta na combinação das parcelas de condução e difusão de elementos químicos igualadas a taxa de produção de entalpia no volume de controle.

A equação [5.2.12] determina os termos da $\sum$. Levando-se em conta as últimas duas considerações:

$$\begin{aligned} \dot{m}'' c_p \frac{dT}{dx} - \frac{d}{dx} \left[\left(\rho D c_p \frac{dT}{dx} \right) \right] &= - \left[h_{f,F}^0 \dot{m}_F''' + h_{f,OX}^0 v \dot{m}_F''' - h_{f,PR}^0 (v+1) \dot{m}_F''' \right] \\ \dot{m}'' c_p \frac{dT}{dx} - \frac{d}{dx} \left[\left(\rho D c_p \frac{dT}{dx} \right) \right] &= - \dot{m}_F''' \Delta h_c \end{aligned}$$

Lembrando que, $\alpha \equiv \frac{k}{\rho c_p}$:

$$\boxed{\dot{m}'' \frac{dT}{dx} - \frac{1}{c_p} \frac{d}{dx} \left[\left(k \frac{dT}{dx} \right) \right] = \frac{- \dot{m}_F''' \Delta h}{c_p}} \quad [5.2.23]$$

• Velocidade de Frente de Chama

O método de Spalding [3] para determinar a velocidade de frente de chama utiliza o princípio da conservação de massa, princípio da conservação das espécies (elementos químicos) e princípio da conservação de energia; já demonstrados acima.

Para determinar a taxa de produção/consumo do comburente ($\dot{m}_F'''$) é necessário determinar as condições de contorno no entorno do volume de controle. Para uma reação de combustão de espessura δ :

Comportamento da combustão em função da espessura δ

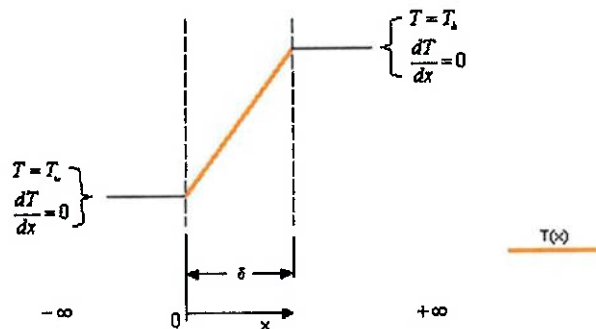


Figura 5.2.4 – Comportamento da temperatura em função da espessura δ , da frente de chama.

Aonde a condição de contorno é dada por:

$$\begin{aligned} T(x \rightarrow -\infty) &= T_u & T(x \rightarrow +\infty) &= T_b \\ \frac{dT}{dx}(x \rightarrow -\infty) &= 0 & \frac{dT}{dx}(x \rightarrow +\infty) &= 0 \end{aligned}$$

A espessura da frente de chama, δ , determina o comprimento x aonde a temperatura vai da $T_{\text{reagentes}}$ a T_{produtos} . A variação de temperatura nesta espessura é simplificada por um aumento de temperatura linear, conforme apresentado na figura acima.

Integrando a equação do princípio de conservação de energia, [5.2.23], em função do comprimento do tubo, x :

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\dot{m}^{\text{II}} \frac{dT}{dx} \right) dx - \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{c_p} \frac{d \left(k \frac{dT}{dx} \right)}{dx} \right) dx &= - \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\dot{m}_F^{\text{III}} \Delta h_C}{c_p} \right) dx \\ \dot{m}^{\text{II}} [T]_{T=T_u}^{T=T_b} - \frac{k}{c_p} \left[\frac{dT}{dx} \right]_{\frac{dT}{dx}=0}^{\frac{dT}{dx}=0} &= - \frac{\Delta h_C}{c_p} \int_{-\infty}^{+\infty} (\dot{m}_F^{\text{III}}) dx \\ \dot{m}^{\text{II}} (T_b - T_u) &= - \frac{\Delta h_C}{c_p} \int_{-\infty}^{+\infty} (\dot{m}_F^{\text{III}}) dx \end{aligned} \quad [5.2.24]$$

Não existe variação de $\frac{dT}{dx}$ nos limites da integral, $-\infty$ e $+\infty$. A temperatura é constante em função de x , sua variação é zero, $\left(\frac{dT}{dx}\right) = 0$. Assim, o resultado da integral da derivada dupla $\frac{dT}{dx}$, observado os limites da integral, se anula. Portanto, o termo da integral do princípio da conservação de energia que considera a conservação por condução (k/c_p) é eliminado.

A taxa de produção/consumo do comburente ($\dot{m}_F^{III}$) só existe dentro da espessura da frente de chama, local da reação química. Assim, é possível modificar os limites da integral para considerar somente esta região já que fora da mesma seu valor é nulo (0).

$$\int_{-\infty}^{+\infty} (\dot{m}_F^{III}) dx = \int_{-\infty}^0 (\dot{m}_F^{III}) dx + \int_0^{\delta} (\dot{m}_F^{III}) dx + \int_{\delta}^{+\infty} (\dot{m}_F^{III}) dx = \int_0^{\delta} (\dot{m}_F^{III}) dx$$

Na região delimitada por $x = 0$ à $x = \delta$ a variação de temperatura é linear e é dada por:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_b - T_u}{\delta}$$

Com a equação acima é possível mudar as variáveis da integral da seguinte maneira:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_c^d f(g(u)) g'(u) du$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x = g(u) ; dx = g'(u) du \\ x = a ; u = c \text{ onde } g(c) = a \\ x = b ; u = d \text{ onde } g(d) = b \end{array} \right.$$

$$\therefore \int_0^{\delta} (\dot{m}_F^{III}) dx = \frac{\delta}{(T_b - T_u)} \int_{T_u}^{T_b} (\dot{m}_F^{III}) dT$$

$$\begin{cases} x = g(T) ; dx = \frac{\delta}{(T_b - T_u)} dT \\ a = 0 ; c = T_u \text{ onde } g(c) = g(T_u) = a = 0 \\ b = \delta ; d = T_b \text{ onde } g(d) = g(T_b) = b = \delta \end{cases}$$

Substituindo a integral após a mudança de variáveis na equação [5.2.24] leva a:

$$\dot{m}'' (T_b - T_u) = -\frac{\Delta h_C}{c_p} \frac{\delta}{(T_b - T_u)} \int_{T_u}^{T_b} (\dot{m}_F''') dT \quad [5.2.25]$$

A definição de taxa de produção/consumo médio de uma reação de combustão determina:

$$\bar{\dot{m}}_F''' \equiv \frac{1}{(T_b - T_u)} \int_{T_u}^{T_b} (\dot{m}_F''') dT$$

Portanto a equação [5.2.25] é reescrita:

$$\dot{m}'' (T_b - T_u) = -\frac{\Delta h_C}{c_p} \delta \bar{\dot{m}}_F''' \quad [5.2.26]$$

A equação [5.2.1.26], usada no cálculo da velocidade de frente de chama, é uma igualdade com duas incógnitas, $\dot{m}''$ e δ . Para resolver este problema é necessário considerar uma segunda equação com estas variáveis.

O esquema que representa o comportamento da reação química é descrito abaixo:

Comportamento da Reação Química em função de δ e $\delta/2$

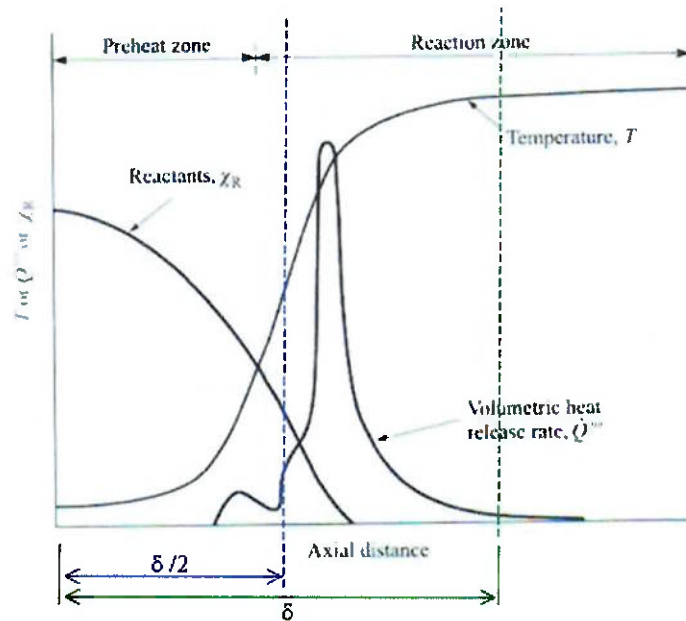


Figura 5.2.5. – Comportamento da reação química em função da espessura δ da chama.

A zona de reação da frente de chama ocorre na segunda metade da espessura da frente de chama, região de alta temperatura. Conseqüentemente, é admissível assumir que a taxa de produção de produtos de combustão, $(\dot{m}_F^{III})$, ocorre predominantemente na região de alta temperatura.

Isto é o mesmo que afirmar que a taxa $(\dot{m}_F^{III})$ é nula na primeira metade da espessura de chama. Esta conclusão leva a segunda equação com as mesmas variáveis necessárias para resolver a equação [5.2.26], a integral da equação do princípio de conservação de energia, [5.2.23], em função do comprimento do tubo, x , para este novo limite de integração.

Então:

Comportamento da combustão em função da espessura $\delta/2$

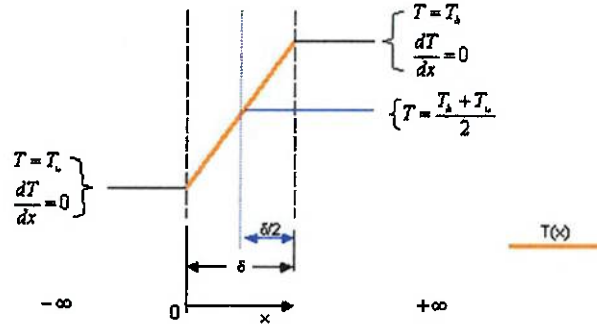


Figura 5.3.6 – Comportamento linear da temperatura da reação de combustão.

Aonde a condição de contorno é dada por:

$$\begin{aligned} T(x \rightarrow -\infty) &= T_u & T\left(x \rightarrow \frac{\delta}{2}\right) &= \frac{T_b + T_u}{2} \\ \frac{dT}{dx}(x \rightarrow -\infty) &= 0 & \frac{dT}{dx}\left(x \rightarrow \frac{\delta}{2}\right) &= \frac{T_b - T_u}{\delta} \end{aligned}$$

A espessura da frente de chama, δ , determina o comprimento x aonde a temperatura vai da $T_{\text{reagentes}}$ a T_{produtos} . A variação de temperatura nesta espessura é simplificada por um aumento de temperatura linear, conforme apresentado na figura acima.

Integrando a equação do princípio de conservação de energia, [5.2.23], em função do novo limite de integração:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\frac{\delta}{2}} \left(\dot{m}'' \frac{dT}{dx} \right) dx - \int_{-\infty}^{\frac{\delta}{2}} \left(\frac{1}{c_p} \frac{d\left(k \frac{dT}{dx}\right)}{dx} \right) dx &= - \int_{-\infty}^{\frac{\delta}{2}} \left(\frac{\dot{m}_F''' \Delta h_C}{c_p} \right) dx \\ \dot{m}'' \left[T \right]_{T=T_u}^{T=\frac{T_b+T_u}{2}} - \frac{k}{c_p} \left[\frac{dT}{dx} \right]_{\frac{dT}{dx}=0}^{\frac{dT}{dx}=\frac{T_b-T_u}{\delta}} &= 0 \\ \dot{m}'' \left(\left(\frac{T_b + T_u}{2} \right) - T_u \right) &= \frac{k}{c_p} \left(\frac{T_b - T_u}{\delta} \right) \rightarrow \dot{m}'' \left(\frac{T_b - T_u}{2} \right) = \frac{k}{c_p} \left(\frac{T_b - T_u}{\delta} \right) \end{aligned}$$

$$\boxed{\delta = \frac{2}{\dot{m}''} \frac{k}{c_p}} \quad [5.2.27]$$

Combinado as equações [5.2.26] e [5.2.27]:

$$\dot{m}^{II}(T_b - T_u) = -\frac{\Delta h_c}{c_p} \frac{2}{\dot{m}^{II}} \frac{k}{c_p} \dot{m}_F^{III} \rightarrow (\dot{m}^{II})^2 (T_b - T_u) = -2 \frac{k \Delta h_c}{c_p^2} \dot{m}_F^{III}$$

$$\boxed{\dot{m}^{II} = \left[-2 \frac{k}{c_p^2} \frac{\Delta h_c}{(T_b - T_u)} \dot{m}_F^{III} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad [5.2.28]$$

A velocidade de chama é relacionada diretamente com a vazão mássica e a densidade dos elementos químicos da mistura ar-combustível antes da reação. Esta relação é dada por:

$$S_L \equiv \frac{\dot{m}^{II}}{\rho_u} \quad [5.2.29]$$

Assim,

$$S_L = \left[-2 \frac{k}{c_p^2} \frac{\Delta h_c}{(T_b - T_u)} \dot{m}_F^{III} \frac{1}{\rho_u^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [5.2.30]$$

Observando que a mistura ar-combustível se comporta como um gás perfeito, tanto antes quanto depois da reação, tem-se:

$$\begin{aligned} \Delta h_c &= h_b - h_u = \nu c_p (T_u - T_0) + c_p (T_u - T_0) - (\nu + 1) c_p (T_b - T_0) \rightarrow \\ &\rightarrow \Delta h_c = (\nu + 1) c_p (T_b - T_u) \end{aligned}$$

A difusividade térmica é equivalente a por:

$$\alpha \equiv \frac{k}{\rho_u c_p}$$

Substituindo o cálculo de entalpia e considerando a difusividade termina, a equação [5.2.28] resulta na equação [5.1] como se queria demonstrar:

$$S_L = \left[-2\alpha(\nu+1) \frac{\dot{m}_F^{III}}{\rho_u} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [5.1]$$

Para determinar a espessura da frente de chama utiliza-se as equações [5.1], [5.2.27] e [5.2.29]:

$$\delta = \frac{2}{\dot{m}^{II}} \frac{k}{c_p} \quad \text{e} \quad S_L \equiv \frac{\dot{m}^{II}}{\rho_u}, \quad \rightarrow \delta = \frac{2}{S_L} \frac{k}{\rho_u c_p} = \frac{2\alpha}{S_L}$$

$$\delta = \frac{2\alpha}{S_L} = \frac{2\alpha}{\left[-2\alpha(\nu+1) \frac{\dot{m}_F^{III}}{\rho_u} \right]^{\frac{1}{2}}} = \left[-\frac{4\alpha^2}{2\alpha(\nu+1)} \frac{\rho_u}{\dot{m}_F^{III}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\delta = \left[-\frac{2\alpha}{(\nu+1)} \frac{\rho_u}{\dot{m}_F^{III}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [5.2.31]$$

6. Outras propriedades de chamas laminares pré-misturadas

6.1 Limites de Inflamabilidade

Chamas somente podem ocorrer dentro de um certo intervalo de composição, denotado pelos limites de inflamabilidade. Estes limites referem-se aos limites superior e inferior da mistura ar-combustível dentro do qual a propagação de chama e a ignição pode ocorrer com a presença de um estímulo externo como, por exemplo, uma faísca. Os limites de inflamabilidade devem ser mensurados em condições não influenciadas pro efeitos de “quenching”, o que significa que o tubo por onde passa a chama deve ter um diâmetro superior ao diâmetro de apagamento. Além disso, a faísca deve prover energia suficiente para iniciar a ignição, caso contrário, a propriedade a ser medida pode ser o limite de ignição e não o de inflamabilidade.

Os limites de inflamabilidade são usualmente expressos em porcentagens de combustível por volume (Tab.1)

Tabela 6.1.1. – Limites de Inflamabilidade. Fonte: [7]

Reagentes	Limites de Inflamabilidade (% volumétrica)		Composição Estequiométrica (% volumétrica)	Temperatura da Chama (K)	Máxima Velocidade de Chama (m s ⁻¹)
H ₂ + O ₂	4.0	94	66	3083	11.0
CO + O ₂	15.5	94	66	2973	1.08
CH ₄ + O ₂	5.1	61	33	3010	4.5
C ₂ H ₂ + O ₂	-	-	-	3431	11.4
H ₂ + ar	4.0	75	28.5	2380	3.1
CO + ar	12.5	74	28.5	2400	0.45
CH ₄ + ar	5.3	15	9	2222	0.45
C ₂ H ₂ + ar	2.5	80	7.4	2513	1.58
C ₂ H ₄ + ar	3.1	32	6.25	2375	0.75
C ₂ H ₆ + ar	3.1	15	5.4	2244	0.40
C ₃ H ₈ + ar	2.2	9.5	3.8	2250	0.43
n-C ₄ H ₁₀ + ar	1.9	8.5	3.1	2365	0.41
C ₆ H ₆ + ar	1.5	7.5	2.7	2365	0.41
C ₂ H ₄ O + ar	3.0	80	7.75	2411	1.05

A variação dos limites de inflamabilidade entre os combustíveis é enorme. Para o CH₃ pode-se observar a seguir (Figura 6.1)

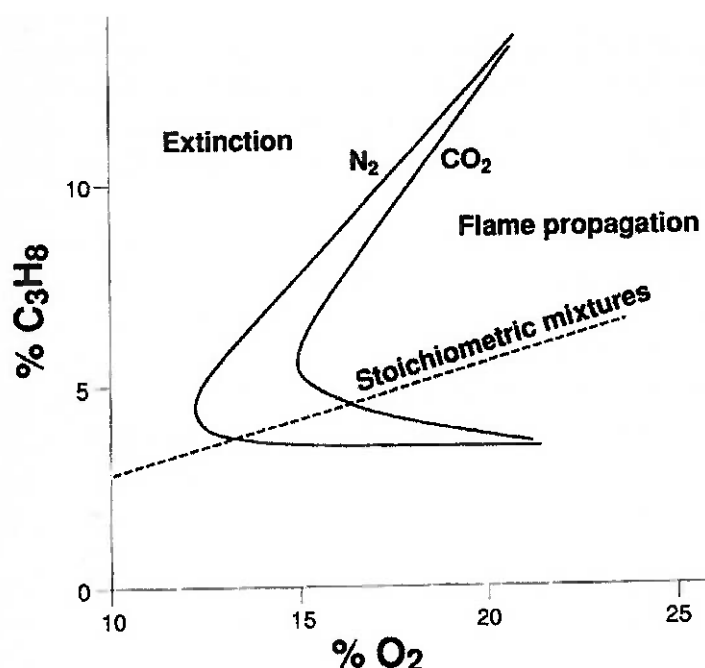


Figura 6.1.1. – Limites de Inflamabilidade para $\text{CH}_3 + \text{O}_2$ na presença de N_2 ou CO_2 . Fonte: [7]

Para o Acetileno o intervalo para o ar é de 2,5 – 80% enquanto para o propano é de 2,2 – 9,5%. O limite inferior apresenta menores variações para muitos combustíveis: ele tende a ser aproximadamente 60% da composição estequiométrica e apresenta o mesmo valor tanto para oxigênio como para ar. À medida que se adicionam quantidades progressivas de gás inerte os limites superior e inferior de inflamabilidade se aproximam e podem, eventualmente, se coincidir (como pode ser observado na Figura 6.1).

A velocidade de propagação de chama tem um máximo próximo à composição estequiométrica e cai à medida que o limite de inflamabilidade se aproxima. Em alguns sistemas os limites parecem estar correlacionados com uma temperatura mínima de chama (por exemplo, 1400K para o metano). A existência de limites de inflamabilidade é precedida por teorias de propagação de chama que mencionam que a perda de calor do gás queimado é incluída no equacionamento. A perda de calor pode ocorrer por condução, convecção ou ainda por radiação e não pode ser normalmente interpretada por uma análise unidimensional, isso porque o tratamento matemático envolvido é muito complexo.

6.2 Estabilização de chamas em queimadores

Uma chama estacionária obtida pelo fluxo de uma pré-mistura à mesma velocidade em direção contrária pode ter somente uma estabilidade neutra e sua posição poderia mudar de maneira incontrolável. Tanto em aplicações domésticas como em industriais, a estabilidade da chama é obtida através do acoplamento de um queimador. Um dos queimadores mais simples é o Bico de Bunsen, como ilustrado na Figura 6.2. Seu desenho é tal que podem ser obtidas chamas laminares e de difusão.

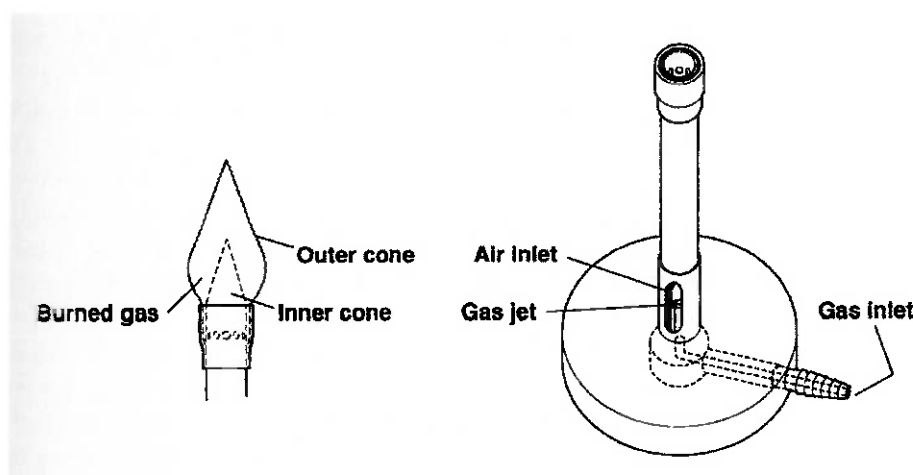


Figura 6.2.1. – Bico de Bunsen. Fonte: [7]

O gás combustível que entra através do duto inferior se une ao ar e os dois gases se misturam à medida que se deslocam para cima dentro do tubo. No cone interior está a zona de reação da chama pré-misturada. Neste ponto a mistura é rica em combustível, então, a composição dos gases de combustão não corresponde à combustão completa. O cone exterior é de chama de difusão entre os gases de combustão e o ar que está ao redor. Apesar de as duas chamas, de difusão e pré-misturada, coincidirem na saída do queimador, elas podem ser separadas utilizando um separador de Smithells.

Para um chama típica laminar e pré-misturada o queimador cumpre três funções:

- Permite a mistura entre combustível e comburente em proporções adequadas
- Provê uma secção adequada para a formação de uma chama laminar
- Restringe o movimento da chama

O efeito de estabilização provocado pelo queimador é provido pela borda de saída por si só, de modo que um anel de metal provocaria o mesmo efeito. O efeito da borda de saída é o de remover calor da chama e, eventualmente, reduzir a velocidade de queima nas vizinhanças.

Para um queimador de chama laminar, a velocidade do fluxo é muito pequena nas proximidades das paredes e acima da borda de saída, mas aumenta em direção ao centro do queimador, apresentando um perfil parabólico. Em todos os pontos dentro da borda de saída e fora da distância de apagamento (quenching distance), a velocidade do fluxo excede a velocidade de queima e a chama é inclinada a partir da borda de saída de forma que a velocidade de queima se iguale à componente normal da velocidade de fluxo da frente de chama. (Figura 6.3)

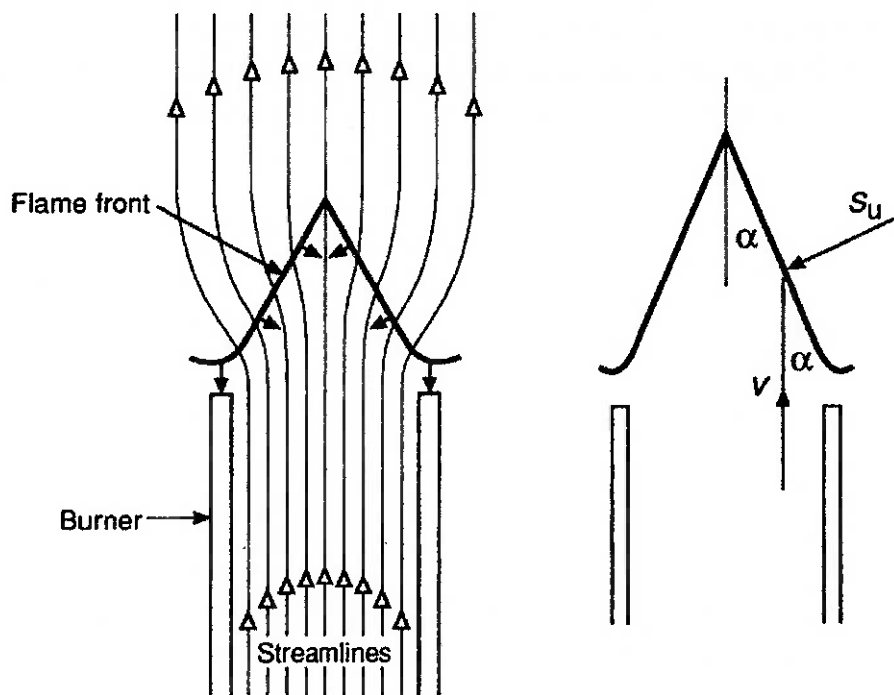


Figura 6.2.2. – Linhas de fluxo de uma chama laminar, pré-misturada. A velocidade de chama (S_u) é apresentada em relação à velocidade de fluxo. Fonte: [7]

A mensuração da velocidade do fluxo de gás e do ângulo do cone usando um perfil linear de velocidade formam a base do método de mensuração da velocidade de propagação de chama.

Uma chama somente pode existir em um queimador dentro de certos limites de vazão. Se a vazão de gás é progressivamente reduzida, será atingindo um ponto em que a velocidade de queima excederá a velocidade do gás. Este é o limite de engolimento (flash-back limit). No limite de engolimento a chama se torna instável de se propaga para dentro do tubo queimador, como ilustrado na Figura 6.4 para vários gradientes de velocidade de propagação da pré-mistura.

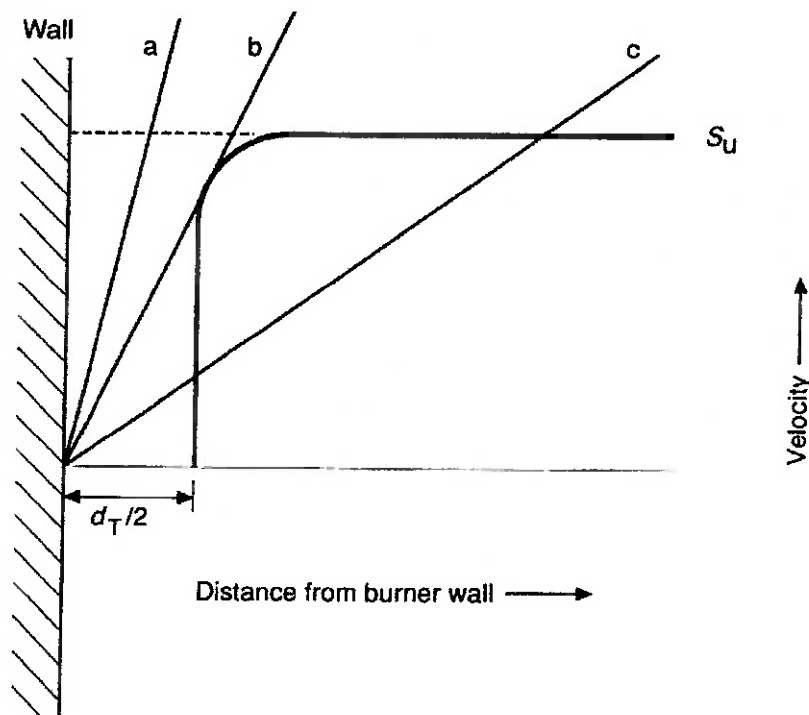


Figura 6.2.3. – Velocidade de queima e velocidade de pré-mistura dentro do tubo queimador. As linhas a, b e c estão definidas no texto, $d_T/2$ é o diâmetro de apagamento. Fonte: [7]

Se a velocidade da pré-mistura varia de acordo com a linha a (alta vazão) a velocidade do fluxo excede a velocidade de queima na zona de apagamento e a chama se forma fora da borda de saída e adota um perfil cônico. Se a velocidade da pré-mistura varia de acordo com a linha c (baixa vazão) a velocidade do queima excede a velocidade de fluxo na zona de apagamento e a chama entra para baixo,

dentro do tubo queimador, ocorrendo o engolimento de chama (flash-back). O gradiente crítico de velocidade de propagação da pré-mistura dentro do tubo é o ilustrado pela linha b, o que corresponde ao limite para o engolimento e é igual a aproximadamente $2S_u/d_T$.

Um pouco acima do limite de engolimento uma chama distorcida (Figura 6.5) pode se formar. A pressão negativa da chama permite uma distorção no fluxo, de forma que a chama pode entrar no tubo queimador em uma região onde a velocidade do fluxo da pré-mistura é reduzido. Assim, a chama distorcida, porém estável, pode se formar devido ao fato de que as paredes do tubo queimador levam a uma menor distorção do fluxo.

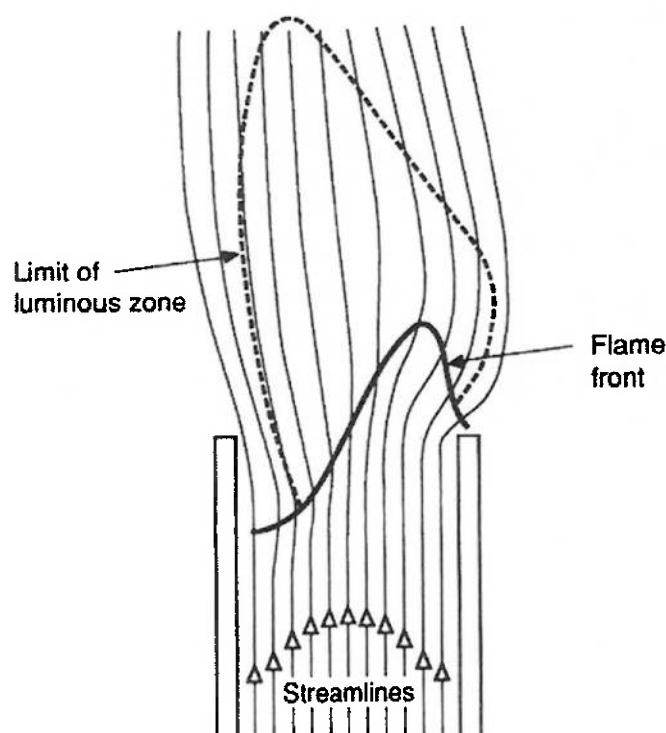


Figura 6.2.4. – Formação da chama distorcida. Fonte: [7]

A chama pode ser afetada pela entrada de ar atmosférico pela região da borda de saída do tubo queimador. Porém isto não é muito importante quando a chama se localiza próximo à borda do tubo queimador. Entretanto, a medida em que a vazão de gás é aumentada a chama sobe para uma região acima da borda de saída do tubo queimador para permitir que a velocidade de queima também aumente. A diluição

ocasionada pelo ar atmosférico faz com que a velocidade que queima diminua. Entretanto, a chama continua a subir até que se torna instável e atinge o limite de extinção da chama (blow-off limit).

Em geral, os valores de velocidades para o engolimento e a extinção dependem das dimensões do queimador e da composição da pré-mistura. Para misturas ricas em combustível e altas vazões de combustível, um segundo fenômeno pode ocorrer. Sendo influenciada pela entrada de ar atmosférico a mistura na borda de saída do tubo queimador pode ficar mais pobre, aproximando-se da mistura estequiométrica. Como a velocidade de queima também é aumentada, uma chama deslocada pode se formar acima da borda de saída do tubo queimador.

A chama deslocada apresenta agora outros dois limites de estabilidade similares àqueles da chama normal. Quando a vazão de pré-mistura é diminuída, ocorre o fenômeno denominado *drop-back*, onde a chama regressa a sua posição em situação normal. Em altas velocidades a chama se extingue, fenômeno denominado *blow-out*. O diagrama de velocidades-composições que apresenta a região estável para cada chama é ilustrado na Figura 6.6. Note que há condições para a ocorrência de cada tipo de chama.

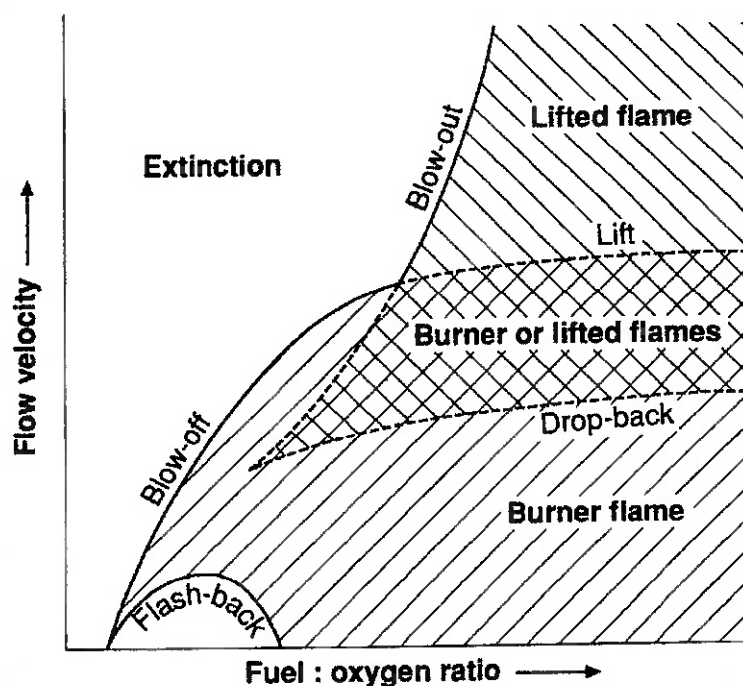


Figura 6.2.5. – Esquema dos limites de estabilidade de chama. Fonte: [7]

Existe ainda outra forma de ilustrar tais fenômenos, o diagrama de estabilidade (Figura 6.7), que apresenta não só as regiões onde ocorre cada fenômeno, mas também a região ótima a ser considerada quando da construção do queimador. Além dos efeitos de *flashback*, *lift-off* neste diagrama é possível visualizar-se o fenômeno conhecido como chama amarela (*yellow-tipping*), em que a vazão de gás combustível é alta mas a mistura é pouco rica em ar o que prejudica a ocorrência de combustão completa, formando, assim, uma chama amarelada. Tal diagrama é apresentado tendo a vazão de combustível em função da porcentagem de ar primário na mistura.

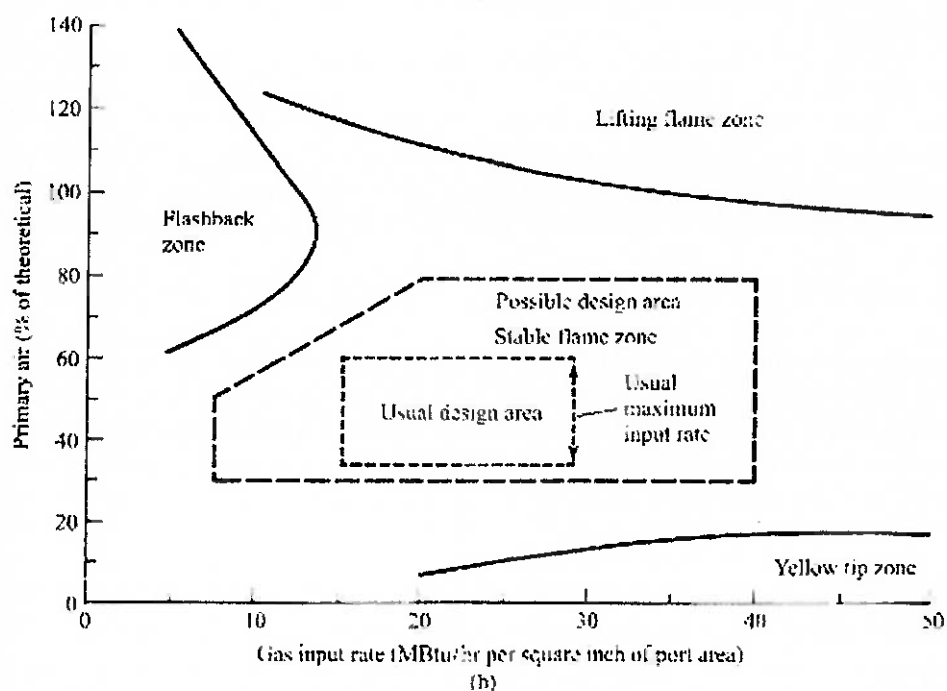
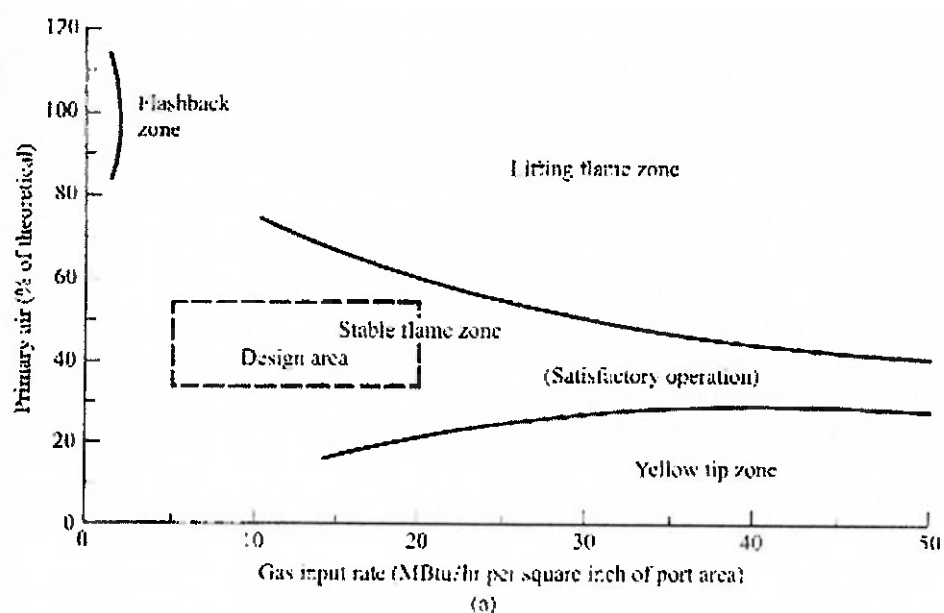


Figura 6.2.6. – Diagrama de estabilidade para o gás natural (a) e para o GLP (b) para um queimador de 2,7 mm de diâmetro e 6,35 mm de comprimento. Fonte: [3]

Segundo o fenômeno de apagamento (quenching) uma chama não pode existir em um queimador que tenha um diâmetro menor que o diâmetro de apagamento (quenching diameter), o que depende da composição do combustível e da pressão. Tal diâmetro é aproximadamente proporcional à pressão o que facilita sua medição através da medição da pressão da chama, quando esta é extinta, para distintos diâmetro de tubo. A vazão para a ocorrência de engolimento (flash-back) e

para a ocorrência de extinção da chama (blow-off) coincidem quando trabalha-se na condição de diâmetro de apagamento (quenching diameter).

Assim, conclui-se claramente que tanto para aplicações industriais como para domésticas o diâmetro do tubo queimador deve ser maior que o diâmetro de apagamento (quenching diameter). Além disso sabe-se que a velocidade do fluxo de combustível costuma variar entre $2S_u$ e $5S_u$, para que se tenha uma forma estável e cônica. Percebe-se assim que os fenômenos de engolimento e apagamento impõem limites à velocidade do fluxo de combustível ao longo do tubo queimador. Outro fato que deve ser lembrado é valor do número de Reynolds do fluxo de combustível dentro do tubo queimador, este valor não deve ultrapassar 2300 e pode ser calculado através da fórmula ($Re = du\sigma / \eta$).

Tais observações podem ser notadas no gráfico da Figura 6.7, na qual a área hachurada representa a região onde o queimador pode operar normalmente.

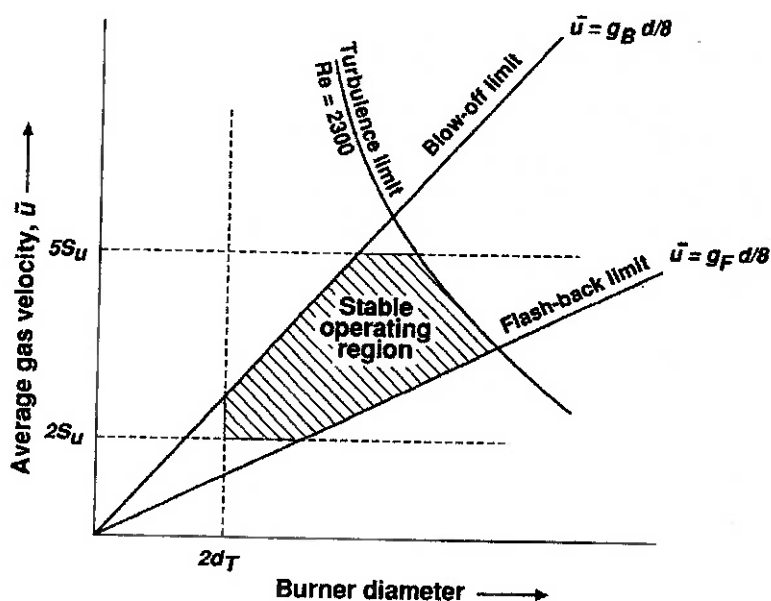


Figura 6.2.7. – Esquema representativo dos limites de velocidade do fluxo de combustível para varias estruturas de chama pré-misturada em função da razão de oxigênio do combustível.
Fonte: [7]

7. Temperatura Adiabática de Chama

Este tópico tem por objetivo obter as temperaturas adiabáticas de chama. Os cálculos teóricos serão feitos para o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), o Acetileno e o Gás Natural. Esta teoria é uma complementação necessária ao cálculo da velocidade de frente de chama.

A simplificação adicional estimando a temperatura da frente de chama também deve ser considerada e é descrita a seguir.

- **Temperatura média da reação**

O esquema que representa o comportamento da reação química é descrito abaixo:

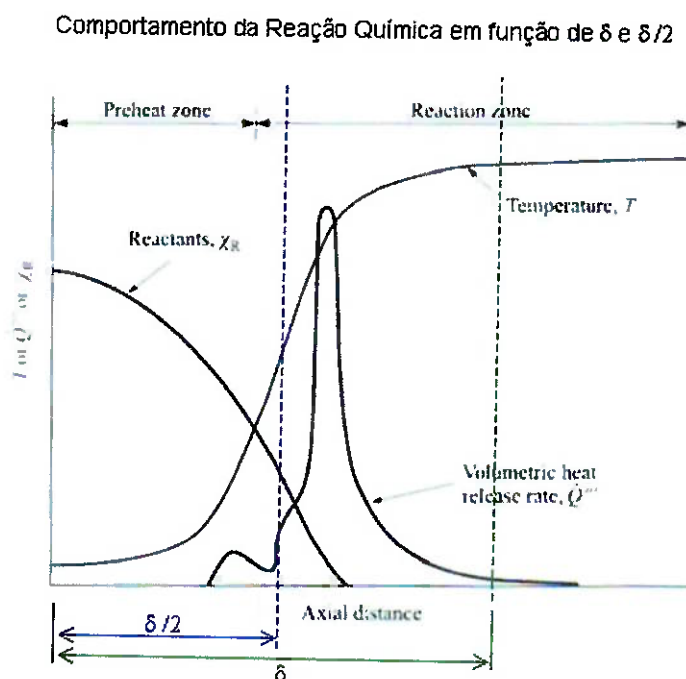


Figura 7. 1. - Comportamento da reação química em função da espessura δ da chama.

A zona de reação da frente de chama ocorre na segunda metade da espessura da frente de chama, região de alta temperatura. Assumindo que a perda de calor para a superfície do tubo seja desprezível, podemos considerar que a reação ocorre num ambiente adiabático.

Assim, a temperatura da reação é descrita como:

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (T_b + T_u) + T_b \right) \quad [7.1]$$

A temperatura dos reagentes é dada pela temperatura adiabática de chama da reação de combustão, $T_b = T_{ad}$.

Para avaliação da densidade, $\rho \left(\left[\frac{kg}{m^3} \right] \right)$, é usado o cálculo de temperatura média na interface de combustão dos reagentes. A temperatura adiabática de chama é utilizada para determinar a temperatura dos produtos de combustão após a reação química.

Esta análise considera um processo de combustão adiabático, sem envolver trabalho ou variações de energia cinética ou potencial. Desse modo, não existe a perda de calor na parede do tubo do experimento e as perdas inerentes do escoamento são desconsideradas. A energia potencial também é desconsiderada devido a sua magnitude infinitesimal diante dos outros elementos da equação.

Observadas estas considerações, é possível concluir que a temperatura adiabática de chama é a máxima temperatura que pode ser atingida pelos produtos de combustão na reação química. Para os cálculos da velocidade de chama é utilizada a mistura estequiométrica (ϕ 1:1) e essa é a condição de máxima temperatura adiabática de chama.

Para o cálculo da temperatura adiabática de chama se utiliza a primeira lei da termodinâmica, cuja demonstração segue abaixo:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum_R n_i (\bar{h}_{fc} + \Delta \bar{h}) = \sum_P n_i (\bar{h}_f + \Delta \bar{h}) + \dot{W}_{vc} \quad [7.1.1]$$

Observando as hipóteses descritas acima se simplifica a equação 7.1.1 em:

$$\begin{aligned} \sum_R n_i (\bar{h}_{fc} + \Delta \bar{h}) &= \sum_P n_i (\bar{h}_f + \Delta \bar{h}) \\ H_R &= H_P \end{aligned} \quad [7.1.2]$$

A equação de combustão é feita na base estequiométrica, sem excesso de ar (ϕ 1:1). Assume-se a hipótese que o ar atmosférico é composto apenas de oxigênio e nitrogênio (21% O₂ e 79%N₂, o que é equivalente para cada mol de O₂ se tem 3,76 mols de N₂).

7.1 Cálculo da temperatura adiabática de chama para o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)

A composição do GLP distribuído em botijão de gases comercializados na cidade de São Paulo é dada em base mássica por (composição química fornecida durante aulas da disciplina PME2511 – Processos e Sistemas de Combustão):

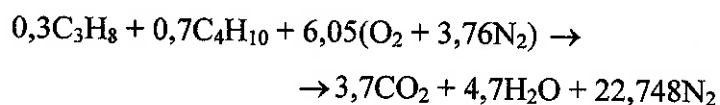
0,03%	- C ₃ H ₆	(Propeno)
30,47%	- C ₃ H ₈	(Propano)
14,34%	- C ₄ H ₈	(Buteno)
31,76%	- C ₄ H ₁₀	(Butano)
23,33%	- C ₂ H ₆	(Etano)
0,07%	- C ₅ H ₁₂	(Pentano)

Entretanto, é possível simplificar o cálculo da velocidade laminar de frente de chama considerando apenas o propano e o butano, já que o resultado obtido é equivalente ao resultado que seria obtido com a composição descrita acima.

Para este trabalho, a composição química do GLP, descrita em base molar, é dada por:

30%	- C ₃ H ₈	(Propano)
70%	- C ₄ H ₁₀	(Butano)

A equação estequiométrica de combustão do GLP é dada por:



Utilizando a equação [7.1.2], observando os reagentes, para 1Kmol de combustível temos:

$$H_R = \sum_R n_i (\bar{h}_{f,i} + \Delta \bar{h}) = 0,3 \bar{h}_{f,C_3H_8} + 0,7 \bar{h}_{f,C_4H_{10}}$$

$$= 0,3(-74.873) + 0,7(-84.740) = -81.799,9 \text{ KJ/Kmolcomb.}$$

Utilizando a equação [7.1.2], observando os produtos;

1a estimativa de TP = 2000K:

$$H_P = \sum_P n_i (\bar{h}_{f,i} + \Delta \bar{h}) = 3,7(-393.522 + \Delta \bar{h}_{CO_2}) + 4,7(-241.826 + \Delta \bar{h}_{H_2O}) + 22,748 \Delta \bar{h}_{N_2}$$

$$= 3,7(-393.522 + 91.439) + 4,7(-241.826 + 72.788) + 22,748(56.137)$$

$$= -635.181,2 \text{ KJ/Kmolcomb.}$$

2a estimativa de TP = 2400K:

$$H_P = \sum_P n_i (\bar{h}_{f,i} + \Delta \bar{h}) = 3,7(-393.522 + \Delta \bar{h}_{CO_2}) + 4,7(-241.826 + \Delta \bar{h}_{H_2O}) + 22,748 \Delta \bar{h}_{N_2}$$

$$= 3,7(-393.522 + 115.779) + 4,7(-241.826 + 93.741) + 22,748(70.640)$$

$$= -116.729,9 \text{ KJ/Kmolcomb.}$$

3a estimativa de TP = 2600K:

$$H_P = \sum_P n_i (\bar{h}_{f,i} + \Delta \bar{h}) = 3,7(-393.522 + \Delta \bar{h}_{CO_2}) + 4,7(-241.826 + \Delta \bar{h}_{H_2O}) + 22,748 \Delta \bar{h}_{N_2}$$

$$= 3,7(-393.522 + 128.074) + 4,7(-241.826 + 104.520) + 22,748(77.963)$$

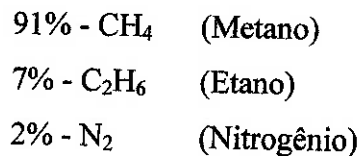
$$= 146.006,5 \text{ KJ/Kmolcomb.}$$

A entalpia do reagente deve ser igual à entalpia do produto ($H_R = H_P$), pela equação [7.1.2]. Utilizando a interpolação linear para obter a temperatura adiabática de chama resulta:

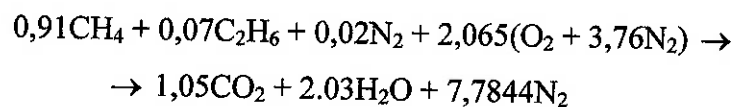
$T_{ad} \text{ GLP} = 2426,60\text{K} \cong 2427\text{K}$

7.2 Cálculo da temperatura adiabática de chama para o Gás Natural

A composição simplificada do Gás Natural, em base molar, da Petrobrás que é fornecida na rede urbana da cidade de São Paulo é dada por:



A equação de combustão do Gás Natural é dada por:



Utilizando a equação [7.1.2], observando os reagentes, para 1Kmol de combustível temos:

$$\begin{aligned} H_R &= \sum_R n_i (\bar{h}_{f,i} + \Delta \bar{h}) = 0,91 \bar{h}_{f,\text{CH}_4} + 0,07 \bar{h}_{f,\text{C}_2\text{H}_6} \\ &= 0,91(-74.873) + 0,07(-84.740) = -74.066,23 \text{ KJ/Kmolcomb.} \end{aligned}$$

Utilizando a equação [7.1.2], observando os produtos;

1a estimativa de TP = 2000K:

$$\begin{aligned} H_P &= \sum_P n_i (\bar{h}_f + \Delta \bar{h}) = 1,05(-393.522 + \Delta \bar{h}_{\text{CO}_2}) + 2,03(-241.826 + \Delta \bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}) + 7,7844 \Delta \bar{h}_{\text{N}_2} \\ &= 1,05(-393.522 + 91.439) + 2,03(-241.826 + 72.788) + \\ & \quad 7,7844(56.137) \\ &= -223.341 \text{ KJ/Kmolcomb.} \end{aligned}$$

2a estimativa de TP = 2400K:

$$\begin{aligned} &= 1,05(-393.522 + 115.779) + 2,03(-241.826 + 93.741) + \\ & \quad 7,7844(70.640) \\ &= -42.352 \text{ KJ/Kmolcomb.} \end{aligned}$$

A entalpia do reagente deve ser igual à entalpia do produto ($H_R = H_P$), pela equação [7.1.2]. Utilizando a interpolação linear para obter a temperatura adiabática de chama resulta:

$T_{ad} \text{ Gás Natural} = 2329,91K \cong 2330K$

7.3 Cálculo da temperatura adiabática de chama para o Acetileno

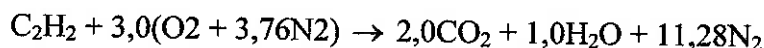
A composição simplificada do Botijão de Acetileno, em base molar, fornecida pelo fabricante é descrita abaixo:

99,5% - C_2H_2 (Acetileno)

0,5% - Outros Gases

Para efeito de cálculo, a composição considerada do botijão é de acetileno puro (100%).

A equação de combustão do Acetileno é dada por:



Utilizando a equação [7.1.2], observando os reagentes, para 1Kmol de combustível temos:

$$H_R = \sum_R n_i (\tilde{h}_{f,i} + \Delta \tilde{h}) = 1 \tilde{h}_{f,C_2H_2} = +226731 \text{ KJ/Kmolcomb.}$$

Utilizando a equação [7.1.2], observando os produtos;

1ª estimativa de $TP = 3000K$:

$$\begin{aligned} H_P &= \sum_P n_i (\tilde{h}_{f,i} + \Delta \tilde{h}) = 2,0(-393.522 + \Delta \tilde{h}_{CO_2}) + 1,0(-241.826 + \Delta \tilde{h}_{H_2O}) + 11,28 \Delta \tilde{h}_{N_2} \\ &= 2,0(-393.522 + 152.853) + 1,0(-241.826 + 126.548) + 11,28(92.715) \\ &= +449.209 \text{ KJ/Kmolcomb.} \end{aligned}$$

2a estimativa de TP = 2800K:

$$\begin{aligned} H_P &= \sum_P n_i (\bar{h}_f + \Delta \bar{h}) = 2,0(-393.522 + \Delta \bar{h}_{CO_2}) + 1,0(-241.826 + \Delta \bar{h}_{H_2O}) + 11,28 \Delta \bar{h}_{N_2} \\ &= 2,0(-393.522 + 140.435) + 1,0(-241.826 + 115.463) + 11,28(85.323) \\ &= +329.906 \text{ KJ/Kmolcomb.} \end{aligned}$$

3a estimativa de TP = 2600K:

$$\begin{aligned} H_P &= \sum_P n_i (\bar{h}_f + \Delta \bar{h}) = 2,0(-393.522 + \Delta \bar{h}_{CO_2}) + 1,0(-241.826 + \Delta \bar{h}_{H_2O}) + 11,28 \Delta \bar{h}_{N_2} \\ &= 2,0(-393.522 + 128.074) + 1,0(-241.826 + 104.520) + 11,28(77.963) \\ &= +211.221 \text{ KJ/Kmolcomb.} \end{aligned}$$

A entalpia do reagente deve ser igual à entalpia do produto (HR = HP), pela equação [7.1.2]. Utilizando a interpolação linear para obter a temperatura adiabática de chama resulta:

$$T_{ad} \text{ Acetileno} = 2626,14\text{K} \approx 2626\text{K}$$

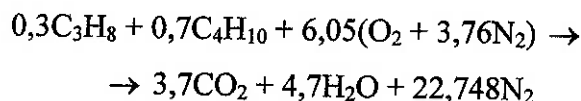
8. Estimativa da velocidade de frente de chama

Este tópico tem por objetivo obter as velocidades de frente de chama de diversos combustíveis através da teoria demonstrada acima. Os cálculos teóricos serão feitos para o GLP (Gás Liquefeito de cozinha), o Acetileno e o Gás Natural.

As hipóteses consideradas para a descrição da teoria são válidas para os cálculos de velocidade de frente de chama apresentados abaixo.

8.1 Gás Liquefeito de Petróleo

A equação estequiométrica de combustão do GLP é dada por:



A temperatura ambiente do laboratório de combustão da Escola Politécnica, Prédio de engenharia Mecânica é de 25°C, 298K. A pressão a 800m de altura é de 98435Pa. E a temperatura adiabática da chama é de 2427K. Assim, a temperatura média de reação do GLP é obtida pela equação [7.1]:

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (T_b + T_u) + T_b \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (2427 + 298) + 2427 \right) = 1894\text{K}$$

Os combustíveis e oxidantes estão presentes apenas nos reagentes da equação. Portanto a concentração média destes elementos é dada por:

$$\bar{Y}_{\text{elemento}} = \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{\text{ele.reagente}} + 0 \right)$$

A concentração mássica dos elementos no reagente é função da % em massa dos mesmos, na mistura ar-combustível.

Tabela 8.1.1. – Composição do Gás Liquefeito de Petróleo - GLP

GLP + Ar	# Mols [Kmol]	Massa Molecular	massa [kg]	Y ele.reagente
C ₃ H ₈	0,3	44,09	13,23	0,015
C ₄ H ₁₀	0,7	58,12	40,68	0,046
O ₂	6,05	32,00	193,59	0,219
N ₂	22,748	28,01	637,24	0,720

A concentração de gases combustíveis na mistura é de:

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{combustiveis} &= \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{C_3H_8} + 0 \right) + \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{C_4H_{10}} + 0 \right) = \\ &= \frac{1}{2} (0,015 + 0) + \frac{1}{2} (0,046 + 0) = 0,0305\end{aligned}$$

A concentração de oxidantes na mistura é de:

$$\bar{Y}_{oxidantes} = \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{O_2} + 0 \right) = \frac{1}{2} (0,219 + 0) = 0,1094$$

A taxa de reação é descrita pela relação abaixo (referência [3]). A teoria é feita para um único gás combustível, porem o GLP é uma mistura de propano e butano. A similaridade química estrutural dos dois gases, no entanto, permite adotar uma hipótese considerando as propriedades como a média das propriedades de seus gases. Assim:

$$\omega \equiv \frac{d[combustivel]}{dt} = -k_G [combustivel]^m [oxidante]^n \quad [8.1.1]$$

Onde, para o GLP:

$$k_G = 4,836 * 10^9 \exp\left(\frac{-15.098}{T}\right) \left[\left(\frac{kmol}{m^3} \right)^{-0.75} \frac{1}{s} \right] \quad [8.1.2]$$

Substituindo a equação [8.1.1] em [8.1.2]:

$$\dot{\omega} = -k_G \left(\bar{T} \right) \bar{\rho}_{ar.}^{m+n} \left(\frac{\bar{Y}_{comb.}}{\bar{M}_{comb.}} \right)^m \left(\frac{\bar{Y}_{oxi.}}{\bar{M}_{oxi.}} \right)^m \quad [8.1.3]$$

Utilizando a tabela [1] do Anexo C:

$$m=0,125 \quad n=1,625$$

$$k_G = 4,836 * 10^9 \exp\left(\frac{-15.098}{1894}\right) = 1,669 * 10^6 \left(\frac{kmol}{m^3}\right)^{-0.75} \frac{1}{s}$$

$$\bar{\rho}_{oxi.} = \frac{P}{\left(\frac{R}{M}\right)\bar{T}} = \frac{98435}{\left(\frac{8315,45}{29}\right)1894} = 0,1813 \frac{kg}{m^3}$$

$$\bar{\omega} = -1,669 * 10^6 (0,1813)^{1,75} \left(\frac{0,0305}{53,91}\right)^{0,125} \left(\frac{0,1094}{32}\right)^{1,625} = -3,244 \frac{kmol}{s * m^3}$$

É possível obter o fluxo mássico por unidade de volume, através da referência [3]:

$$\dot{m}_F^{III} = \bar{\omega}_F M = -3,244 * 53,91 = -174,88 \frac{kg}{s * m^3}$$

A difusividade térmica na equação (utilizando sua turbina) é medida pela equação:

$$\bar{T} = \frac{1}{2}(T_b + T_u) = \frac{1}{2}(2427 + 298) = 1362K$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho_u c_p} = \frac{0,08758}{1,16(1200)} = 6,29 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

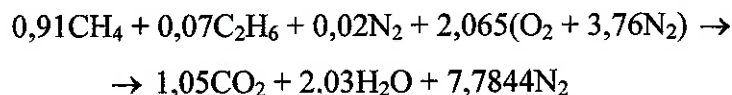
Assim, a velocidade de frente de chama do GLP é dada pela equação [5.1]

$$S_L = \left[-2\alpha(\nu + 1) \frac{\dot{m}_F^{III}}{\rho_u} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{-2 * 6,29 * 10^{-5} * (15,41 + 1) * (-168,74)}{1,16} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,5481 \frac{m}{s}$$

$$S_{LGLP} = 54,81 \frac{cm}{s}$$

8.2 Gás Natural

A equação estequiométrica de combustão do Gás Natural é dada por:



A temperatura ambiente do laboratório de combustão da Escola Politécnica, Prédio de engenharia Mecânica é de 25°C, 298K. A pressão a 800m de altura é de 98435Pa. E a temperatura adiabática da chama é de 2330K. Assim, a temperatura média de reação do Gás Natural é obtida pela equação [7.1]:

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (T_b + T_u) + T_b \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (2330 + 298) + 2330 \right) = 1822\text{K}$$

Os combustíveis e oxidantes estão presentes apenas nos reagentes da equação. Portanto a concentração média destes elementos é dada por:

$$\bar{Y}_{\text{elemento}} = \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{\text{ele.reagente}} + 0 \right)$$

A concentração mássica dos elementos no reagente é função da % em massa dos mesmos, na mistura ar-combustível.

Tabela 8.2.1. – Composição do Gás Natural

GLP + Ar	# Mols [Kmol]	Massa Molecular	Y massa [kg]	ele.reagente
CH ₄	0,91	16,04	14,60	0,049
C ₂ H ₆	0,07	30,08	2,11	0,007
O ₂	2,065	32,00	66,08	0,220
N ₂	7,7844	28,01	218,06	0,725

A concentração de gases combustíveis na mistura é de:

$$\bar{Y}_{\text{combustíveis}} = \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{\text{CH}_4} + 0 \right) + \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{\text{C}_2\text{H}_6} + 0 \right) = \\ = \frac{1}{2} (0,049 + 0) + \frac{1}{2} (0,007 + 0) = 0,028$$

A concentração de oxidantes na mistura é de:

$$\bar{Y}_{oxidantes} = \frac{1}{2}(\bar{Y}_{O_2} + 0) = \frac{1}{2}(0,220 + 0) = 0,110$$

Utilizando a mesma consideração de similaridade entre dois combustíveis da mistura gasosa do Gás Natural, e através da equação [8.1.1]:

$$\omega \equiv \frac{d[combustível]}{dt} = -k_G [combustível]^m [oxidante]^n \quad [8.1.1]$$

Utilizando a tabela [1] do Anexo C e k_G informado na disciplina PME-2515, Processo de Sistemas de combustão da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo:

$$m = -0,271$$

$$n = 1,325$$

$$k_G = 1,9 * 10^9 \exp\left(\frac{-24.372}{1822}\right) = 2947,20 \left(\frac{kmol}{m^3}\right)^{-0,054} \frac{1}{s}$$

$$\dot{\omega} = 2947,20 \left(\frac{0,028}{16,702}\right)^{-0,271} \left(\frac{0,110}{32}\right)^{1,325} = -9,06 \frac{kmol}{s * m^3}$$

É possível obter o fluxo mássico por unidade de volume, através da referência [3]:

$$\dot{m}_F^{III} = \dot{\omega}_F M = -9,06 * 16,702 = -151,32 \frac{kg}{s * m^3}$$

A difusividade térmica na equação (utilizando sua turbina) é medida pela equação:

$$\bar{T} = \frac{1}{2}(T_b + T_u) = \frac{1}{2}(2330 + 298) = 1314K$$

$$\alpha \equiv \frac{k}{\rho_u c_p} = \frac{0,08326}{1,16(1192)} = 6,02 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

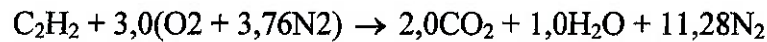
Assim, a velocidade de frente de chama do GLP é dada pela equação [5.1]

$$S_L = \left[-2\alpha(\nu + 1) \frac{\bar{m}_F^{III}}{\rho_u} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{-2 * 6,02 * 10^{-5} * (17,11 + 1) * (-151,32)}{1,16} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,4337 \frac{m}{s}$$

$$S_{LGLP} = 43,37 \frac{cm}{s}$$

8.3 Acetileno

A equação estequiométrica de combustão do Acetileno é dada por:



A temperatura ambiente do laboratório de combustão da Escola Politécnica, Prédio de engenharia Mecânica é de 25°C, 298K. A pressão a 800m de altura é de 98435Pa. E a temperatura adiabática da chama é de 2626K. Assim, a temperatura média de reação do Acetileno é obtida pela equação [7.1]:

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (T_b + T_u) + T_b \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} (2626 + 298) + 2626 \right) = 2044K$$

Os combustíveis e oxidantes estão presentes apenas nos reagentes da equação. Portanto a concentração média destes elementos é dada por:

$$\bar{Y}_{elemento} = \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{ele.reagente} + 0 \right)$$

A concentração mássica dos elementos no reagente é função da % em massa dos mesmos, na mistura ar-combustível.

Tabela 8.3.1. – Composição do Acetileno

GLP + Ar	# Mols [Kmol]	Massa Molecular	massa [kg]	Y ele.reagente
C ₂ H ₂	1,0	26,08	26,08	0,060
O ₂	3,0	32,00	96,00	0,219
N ₂	11,28	28,01	315,99	0,721

A concentração de gases combustíveis na mistura é de:

$$\bar{Y}_{combustiveis} = \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{C_2H_2} + 0 \right) = \frac{1}{2} (0,060 + 0) = 0,030$$

A concentração de oxidantes na mistura é de:

$$\bar{Y}_{oxidantes} = \frac{1}{2} \left(\bar{Y}_{O_2} + 0 \right) = \frac{1}{2} (0,219 + 0) = 0,1094$$

Utilizando a equação [8.1.1] para o Acetileno:

$$\omega \equiv \frac{d[combustivel]}{dt} = -k_G [combustivel]^m [oxidante]^n \quad [8.1.1]$$

Utilizando a tabela [1] do Anexo C e k_G informado na disciplina PME-2515, Processo de Sistemas de combustão da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo:

$$m=0,5 \quad n=1,25$$

$$k_G = 3,9 * 10^{10} \exp\left(\frac{-15.098}{2044}\right) = 2,416 * 10^7 \left(\frac{kmol}{m^3}\right)^{-0,75} \frac{1}{s}$$

$$\bar{\rho}_{oxi.} = \frac{P}{\left(\frac{R}{M}\right) \bar{T}} = \frac{98435}{\left(\frac{8315,45}{29}\right) 2044} = 0,1680 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{\omega} = -2,416 * 10^7 (0,1680)^{1,75} \left(\frac{0,030}{26,08}\right)^{0,5} \left(\frac{0,1094}{32}\right)^{1,25} = -29,86 \frac{kmol}{s * m^3}$$

É possível obter o fluxo mássico por unidade de volume, através da referência [3]:

$$\dot{m}_F^{III} = \dot{\omega}_F M = -29,86 * 26,08 = -778,82 \frac{kg}{s * m^3}$$

A difusividade térmica na equação (utilizando sua turbina) é medida pela equação:

$$\bar{T} = \frac{1}{2}(T_b + T_u) = \frac{1}{2}(2626 + 298) = 1462 K$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho_u c_p} = \frac{0,0966}{1,16(1221)} = 6,82 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

Assim, a velocidade de frente de chama do GLP é dada pela equação [5.1]

$$S_L = \left[-2\alpha(\nu + 1) \frac{\bar{\dot{m}}_F^{III}}{\rho_u} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{-2 * 6,82 * 10^{-5} * (15,66 + 1) * (-778,82)}{1,16} \right]^{\frac{1}{2}} = 1,2352 \frac{m}{s}$$

$$S_{LGLP} = 123,52 \frac{cm}{s}$$

9. Extinção da chama - Quenching by a Cold Wall

Em uma reação de combustão, a chama se extingue ao passar em uma abertura suficientemente pequena. O diâmetro crítico, circular, cuja chama se extingue ao passar é chamado quenching distance, ou distância de apagamento.

Experimentalmente, esta distância é determinada observando qual é o diâmetro de um tubo, para uma chama estável, que impede o fenômeno de engolimento (flash-back).

Analiticamente a distância de apagamento pode ser obtida observando duas regras que governam o fenômeno de combustão: (a segunda regra é utilizada especificamente para a resolução do problema de quenching distance):

- Critério I – A ignição somente ocorrerá quando uma suficiente quantidade de energia é adicionada à mistura ar-combustível para que a mesma chegue a temperatura adiabática de combustão. O volume de controle, amostra de teste, tem a espessura da espessura da frente de chama δ .
- Critério II – A taxa de liberação de calor (energia) em uma reação química dentro do volume de controle, amostra de teste, deve ser equivalente à taxa de perda de calor por condução da mesma amostra.

Utilizando o segundo critério em uma estrutura tubular, ou uma colméia de tubos funcionando como uma tela, é possível escrever a equação de balanço da 1ª Lei da Termodinâmica.

Dado o esquema abaixo:

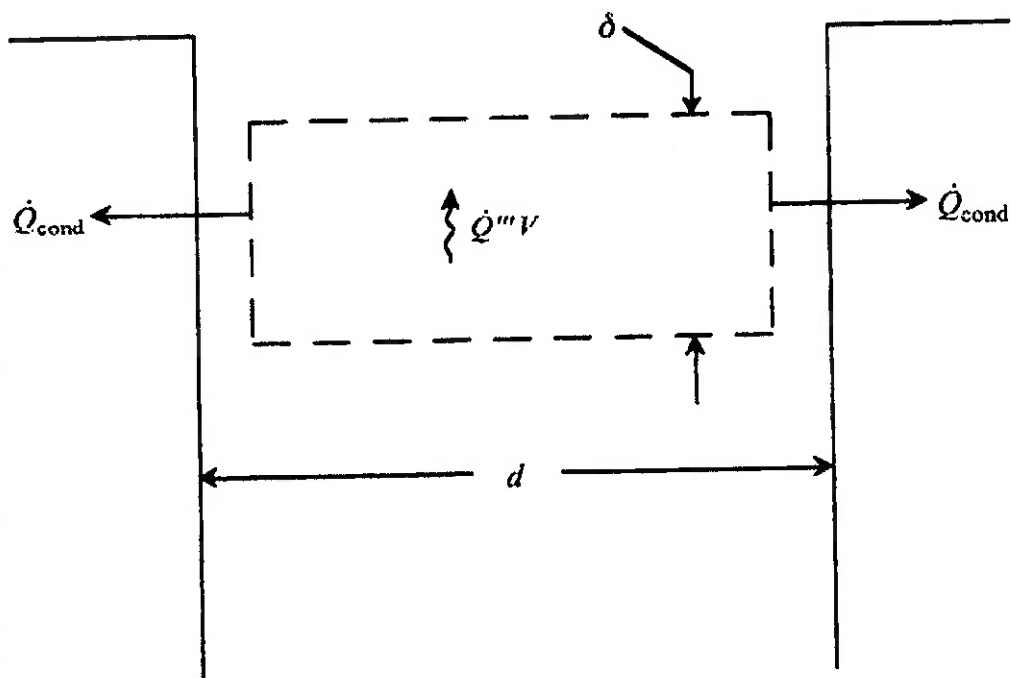


Figura 9.1. – Perda de Calor na superfície de um tubo, parede.

$$\dot{Q}^{iii}_V = \dot{Q}_{\text{condução, total}}$$

E,

$$\dot{Q}^{iii} = -\dot{m}_F^{iii} \Delta h_c$$

Pela teoria descrita na referência [3], a distância de apagamento (quenching distance) pode ser dada por:

$$d = \sqrt{b} \delta \quad [9.1]$$

Onde:

d – distância mínima de apagamento;

b – constante arbitrária, função das perdas de calor (1ª Lei Term.);

δ – espessura de frente de chama laminar;

Em equipamentos industriais, como queimadores, a distância de apagamento é utilizada para criar telas de segurança conhecidas como tela Corta-Chama. Estas

telas são posicionadas nas entradas de queimadores que insuflam combustível ou uma mistura ar-combustível.

Como a distância de apagamento modifica-se com a variação da composição estequiométrica, as telas Corta-Chama são desenvolvidas com um coeficiente de segurança de modo a considerar tais variações que podem ocorrer na operação de um queimador.

Fenômenos de engolimento (flash-back) são perigosos, podendo provocar ondas de detonação dentro das tubulações e uma possível explosão de equipamentos de queima. Assim a importância deste estudo é evidenciada.

Para os combustíveis considerados neste trabalho, a distância de apagamento máxima para garantir segurança em uma instalação industrial é fornecida na tabela abaixo:

Tabela 9.1. – Distância Mínima de apagamento

Distância de Apagamento - Quenching Distance			
Combustível	Composição	Distância $\varnothing=1$ [mm]	Distância Mínima Absoluta [mm]
Acetileno	C_2H_2	2,3	-
Gás Natural	0,91 CH_4	2,5	2,0
	0,07 C_2H_2		
GLP	0,91 C_3H_8	2,0	1,8
	0,07 C_4H_{10}		

É importante observar que a distância muda da relação estequiométrica de ar-combustível ($\varnothing=1$) e a distância mínima absoluta que independe da composição ar-combustível. Tal conclusão foi mencionada anteriormente.

Outra importante consideração diz respeito ao acetileno. Este possui uma ligação química tripla que se rompe facilmente. Portanto é necessário um cuidado especial no dimensionamento da tela Corta-Chama, já que o diâmetro para misturas não-estequiométricas é muito diferente da distância mínima de apagamento para uma mistura em proporções estequiométricas.

Isto foi evidenciado no trabalho com testes de velocidade laminar de frente de chama para o acetileno. A tela Corta-Chama, projetada para um diâmetro 65%

inferior ao máximo de apagamento para uma composição estequiométrica não foi capaz que reter a chama em condições adversas, colocando em risco a integridade do equipamento e dos experimentadores.

10. Mínima Energia de Ignição

Uma reação química de combustão se inicia quando existe uma quantidade de energia mínima para acontecer à reação. A ignição pode ser forçada ou não forçada, sendo a que a ignição forçada é determinada pela Mínima Energia de Ignição.

Ignitores elétricos são os mais comumente utilizados nos aparatos industriais que sofrem processos de combustão. Entre eles destacam-se turbinas a gás, e queimadores industriais e residenciais (fogões). Os ignitores elétricos são os mais utilizados por sua confiabilidade e por não precisar de uma chama pré-existente, como os ignitores piloto.

Antes de apresentar a teoria para obter os valores de mínima energia de ignição, será apresentada uma breve descrição sobre ignição forçada e não forçada.

10.1 Ignição não forçada.

Em uma visão simplificada podemos afirmar que a ignição não forçada ocorre quando a energia que está sendo liberada para dentro do sistema é grande o suficiente para provocar a chama ou a explosão dentro do sistema. Porém esta energia não é fornecida diretamente para este propósito, sendo assim uma ignição não forçada.

A ignição forçada pode ser dividida em duas. A primeira divisão da ignição espontânea é a ignição espontânea em cadeia, aonde existem condições de temperatura e pressão a valores mais elevados que os valores críticos suportados pelo sistema, levando o sistema a explodir.

A segunda divisão é a ignição térmica espontânea. Este processo ocorre quando a taxa de energia térmica inserida no sistema é maior que a taxa de dissipação desta mesma energia. Neste caso existem condições para a explosão do sistema, porque da mesma forma que a ignição não forçada em cadeia o sistema atinge valores críticos e a reação ocorre. Outra importante consideração que deve ser feita, é que o processo de ignição térmica espontânea pode levar horas para ocorrer, dependendo de qual a energia necessária para ignição do combustível e qual é a taxa de energia térmica que esta sendo introduzida no sistema.

Entretanto o estudo da ignição espontânea não é o objetivo deste trabalho. Assim, a explanação teórica detalhada sobre a ignição espontânea e a formulação

para obtenção da energia mínima de ativação espontânea do sistema não serão descritas, podendo ser obtida na referencia [4].

10.2 Ignição forçada

O conceito de ignição forçada pode ser descrito simplificadoamente como a avaliação da quantidade de energia que deve ser liberada dentro de um sistema com ar-combustível para provocar a ignição do mesmo.

Ao contrário do conceito de ignição espontânea, a ignição forçada normalmente está associada com materiais gasosos. Além disso, existem diversas maneiras de provocar a ignição forçada em um material reativo ou mistura, sendo que para este trabalho será estudada a ignição causada pela faísca elétrica.

Um segundo conceito importante é o efeito de deflagração ou detonação causado pela ignição de uma mistura ar-combustível ou material reativo. Dependendo da geometria do equipamento em que a chama foi iniciada, podemos ter a condição uma chama iniciada para provocar uma deflagração, provocar na realidade uma explosão. Como foi descrito durante as aulas da disciplina PME 2515 – Processos e Sistemas de Combustão este fato normalmente ocorre quando a configuração do equipamento leva a um aumento contínuo de pressão dentro do sistema.

Este aumento de pressão pode ser causado por um aumento contínuo da temperatura com um conseqüente aumento da pressão levando a explosão do equipamento, conseqüentemente a uma detonação. Este aumento de temperatura ocorre quando não existe um escape para o calor, isto é, quando a quantidade de calor fornecido é muito maior do que a de calor perdido para o meio. Aliado a esta condição existe a necessidade de o equipamento não possuir uma saída de escape dimensionada corretamente para estes gases de combustão, provocando um aumento da pressão além do aumento da temperatura. Estes fatores combinados levam a detonação.

Em complementação aos conceitos de ignição forçada têm o conceito de “ignitability”, ou facilidade/capacidade de ignição, de uma mistura gasosa. Esta característica pode ser descrita como a “facilidade” ou “dificuldade” de uma mistura gasosa ser deflagrada, e pode ser diretamente relacionada com a energia mínima de

ativação do combustível. Historicamente, está medida para um sistema exotérmico foi estudada experimentalmente com a aproximação de uma compressão adiabática a alta temperatura por ondas de choques que provocavam na mistura altas pressões e temperaturas, até a deflagração. Um segundo método utilizado experimentalmente era o uso de esferas metálicas quentes ou partículas incandescentes dentro de uma mistura reativa fria (misturas a baixa temperatura).

10.3 Modelagem da Ignição Forçada

Para a modelagem da ignição forçada será utilizada a aproximação descrita por Willians (referência [3]).

O sistema mais comum para produção das faíscas elétricas são os modelos que utilizam eletrodos ligados a capacitores para produzir tais faíscas. As durações destas faíscas elétricas variam de $0.01\mu\text{s}$ até $100\mu\text{s}$. O cálculo da energia mínima de ativação considera o uso destes eletrodos.

Hipóteses:

- A ponta da faísca incide sobre um percentual de massa ar-combustível aonde a chama será iniciada
- Esta massa é representada por um volume esférico de gás
- A energia mínima de ignição que deve ser fornecida pela faísca é igual a energia requerida para aumentar a temperatura inicial do volume esférico do gás a temperatura de chama
- A energia mínima é definida para eletrodos posicionados a uma distância mínima possível, distância maior que a distância de apagamento (quenching distance). Abaixo desta distancia a chama não propaga pelo meio.
- O raio crítico do volume esférico de gás é o raio que provoca a igualdade da taxa de liberação de calor provocada pela reação da mistura ar-combustível ao ambiente a taxa de perda de calor por condução do volume esférico, após a reação, para o ambiente.

A seguir seguem a formulação para determinação da energia mínima de ativação de uma pré-mistura ar-combustível e a tabela com os valores mínimos de ignição forçada para os combustíveis considerados neste trabalho, referência [3]:

$$E_{ign} = 61,562 * P_b * \left(\frac{M_{mis,ar-comb}}{R} \right) * \left(\frac{\alpha}{S_L} \right) * c_p * \left(\frac{(T_b - T_u)}{T_b} \right) \quad [10.1]$$

Tabela 10.1. - Mínima Energia para Ignição Forçada

Distância de Apagamento - Quenching Distance			
Combustível	Composição	Energia Mínima para $\varnothing=1$ [10^{-5} J]	Energia Mínima Absoluta [10^{-5} J]
Acetileno	C_2H_2	3,0	-
Gás Natural	0,91 CH_4	33,0	29,0
	0,07 C_2H_2		
GLP	0,91 C_3H_8	30,5	26,0
	0,07 C_4H_{10}		

É importante nesta etapa do trabalho esclarecer que o cálculo descrito acima é uma avaliação aproximada da energia de ativação, devido às hipóteses simplificadoras.

Uma segunda observação importante é a proporcionalidade da energia mínima de ativação do acetileno em relação ao GLP. A importância disto é a necessidade de um cuidado adicional ao lidar com o acetileno. Uma das medidas de segurança obrigatórias é o cuidado ao lidar com o botijão, que em hipótese alguma pode cair no chão pelo perigo de explosão.

11. Análise dos Resultados

A validação do protótipo de visualização de fenômenos de chama e velocidade de frente de chama é feita a partir dos dados teóricos demonstrados acima. Com o equipamento pronto foram realizados diversos testes para ratificar a operabilidade do equipamento bem como a confiabilidade dos resultados obtidos.

Uma importante observação é que especificamente para os gases considerados, ar e GLP, não foram necessárias calibrações para os rotâmetros. Também não foi necessário corrigir os dados através de tabelas de calibração. Porém, para outros combustíveis a diferentes pressões que não a atmosférica, curvas de calibração podem ser utilizadas (Anexo B).

Abaixo seguem as tabelas com os dados obtidos, gráficos e Diagramas de Fuidge para os diversos Bicos de Bunsen. Junto com as tabelas estão textos explicativos dos cálculos realizados para a obtenção destes dados.

11.1 Velocidade de Chama Laminar

A validação do equipamento para a medição do cálculo de velocidade de frente de chama laminar foi feita realizando testes com um botijão de GLP de 45 kg da fabricante Ultragas.

Seguindo o procedimento experimental descrito o Manual de Utilização, anexo A, item 4.1., com 12 medições para determinar a media da velocidade de frente de chama laminar.

Tabela 11.1.1 – Medições para determinar a velocidade de frente de chama laminar

Velocidade Média de Frente de Chama para o GLP			
Medições	Distância [cm]	Tempo [s]	Vel [cm/s]
1	335	5,25	63,81
2	335	6,38	52,51
3	335	5,07	66,07
4	335	6,16	54,38
5	335	7,53	44,49
6	335	6,62	50,60
7	335	6,44	52,02
8	335	7,71	43,45
9	335	7,46	44,91
10	335	6,38	52,51
11	335	6,57	50,99
12	335	4,82	69,50
Média			53,77
Des. Padrão			8,50
Velocidade Teórica de Frente de Chama para o GLP			
Teórica			54,81

Estes resultados permitem traçar um gráfico de velocidade de frente de chama em função de cada medição e traçar a velocidade de frente de chama laminar média obtida para o botijão de GLP:

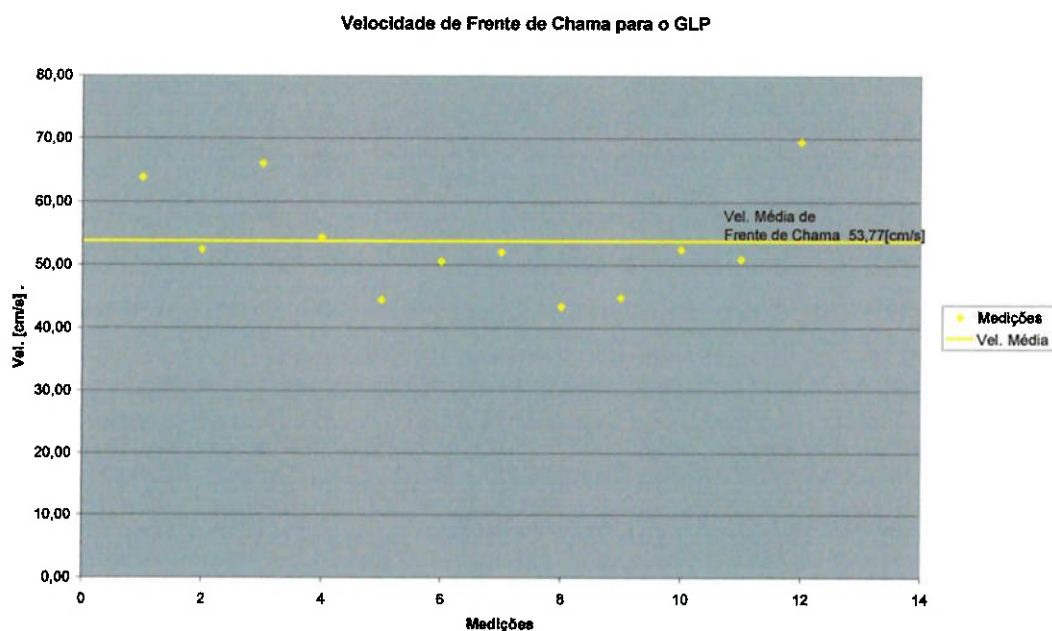


Figura 11.1.1 - Velocidade de frente de chama laminar média.

Os resultados práticos estão de acordo com os resultados teóricos, observando a faixa de erro através do desvio padrão calculado. O alto valor do desvio padrão se deve a dificuldade de garantir que a mistura de ar-combustível seja estequiométrica.

Como foi observado a diferença entre a velocidade laminar de frente de chama teórica e experimental é de menos de 1 [cm/s], mostrando a eficiência do aparato experimental e sua confiabilidade para o GLP.

Fatores que podem influenciar estas medidas ou resultados com o passar do tempo são:

- A composição do combustível muda de acordo com a utilização do botijão de gás. Isto impossibilita garantir que as percentagens de propano e butano utilizadas nos cálculos teóricos sejam as mesmas que a utilizadas nos testes, e dificulta a obtenção de $\phi=1$.
- As pequenas ondulações da tubulação de plástico utilizada para a visualização da frente de chama, e as perdas desconsideradas nas hipóteses, mas presentes no experimento.
- Descalibração dos rotâmetros de medição de vazão.
- Imprecisão da tomada de tempo, já que o usuário possui um tempo de reação para iniciar o cronômetro e parar-lo. Este pequeno intervalo de tempo, de micro-segundos, gera um erro considerável devido a pequena distância de medição (aproximadamente 3 metros). Um maior número de medições pode diminuir e evidenciar este erro sistemático.

O acetileno, considerado inicialmente para obtenção dos dados, não foi utilizado por motivos de segurança, dos usuários e do próprio equipamento. A conclusão deste trabalho descreve mais precisamente os problemas enfrentados no manuseio do equipamento com este tipo de combustível e recomendações futuros para testes.

11.2 Diagrama de Fuidge

A validação do equipamento para a visualização de fenômenos de chama e obtenção do diagrama de Fuidge foi feita realizando testes com o mesmo botijão de GLP de 45 kg da fabricante Ultragas.

Seguindo o procedimento experimental descrito o Manual de Utilização, anexo A, item 4.2., com diversas medições para cada Bico de Bunsen construído. Para cada medição, com uma vazão fixa de combustível, se buscou observar os três fenômenos abordados no diagrama (ponta amarela, descolamento e engolimento). Entretanto, por características construtivas e de escoamento máximo e mínimo, não foi possível observar todos os fenômenos para cada medição.

A relação Ar / Combustível mede a quantidade de ar em função da mistura estequiométrica ($\phi=1$). Excesso de ar provoca uma razão de Ar / Combustível maior que 1 (mistura pobre). Excesso e combustível provoca uma razão de Ar / Combustível menor que 1 (mistura rica). O excesso ou falta de ar em percentagem é dado pelos decimais da relação Ar / Combustível.

A seguir seguem os resultados para cada Bico de Bunsen.

11.2.1 Bico de Bunsen 3/4"

Inicialmente são apresentados os resultados para o Bico de Bunsen de 3/4" por este permitir a visualização dos fenômenos com maior clareza.

Os dados de PCI (Poder Calorífico Inferior) e Massa Molecular são calculados na seção 7 deste trabalho, descrição teórica. O cálculo do Poder calorífico do gás para uma dada vazão é a multiplicação da vazão mássica de combustível pelo PCI, dividido pela área da seção transversal do Bico de Bunsen.

Tabela 11.2.1.1 – Referência para medição e análise de Dados BB 3/4"

Referência				
Gás	AR Estequiométrico	Gás		
Vazão*E-05 [kg/seg]	Vazão [l/min]	Massa Molecular	53,91	[Kg/Kmol]
1,0	7,7	PCS glp	81799,9	[kJ/Kmol comb.]
1,5	11,5		1517,31	[Kj/Kg]
2,0	15,4			
2,5	19,2			
3,0	23,1			
3,5	25,9			
4,0	30,8			

Tabela 11.2.1.2 – Medições de dados para o BB 3/4"

Gás Vazão*E-05 [kg/seg]	Medições				
	AR Estequiometrico Vazão [l/min]	Efeito Observado	Descolamento Vazão [l/min]	Engolimento Vazão [l/min]	Ponta Amarela Vazão [l/min]
1,0	8,0	Ponta Amarela	-	13,5	12,0
1,5	11,0	Ponta Amarela	-	21,0	15,0
2,0	15,0	Ponta Amarela	-	25,0	18,0
2,5	20,0	Ponta Amarela	39,0	-	23,0
3,0	22,5	Ponta Amarela	42,0	-	28,0
3,5	26,0	Ponta Amarela	45,0	-	29,0
4,0	31,0	Ponta Amarela	48,0	-	34,0

A medição de vazão de ar para visualização dos fenômenos de chama em função de uma vazão de combustível fixa também abordou a visualização do estado da chama na mistura estequiométrica. Em todos os casos, em $\phi=1$, observou-se uma ponta amarela na chama, mostrando que era necessário ar de difusão para terminar o processo de combustão.

Uma explicação para este fenômeno é um possível excesso de propano ou butano em relação à composição de gases dentro do botijão, possibilidade já abordada anteriormente na seção 11.1. deste trabalho.

A análise destes dados está exposta a seguir:

Tabela 11.2.1.3 – Análise do fenômeno de descolamento para o BB 3/4"

Gás Vazão*E-05 [kg/seg]	Poder Calorífico/Área [KW/m ²]	Descolamento		
		AR Vazão [l/min]	AR Vazão*E-05 [kg/seg]	Razão AR/Comb x Primario
1,0	53,2	-	-	-
1,5	79,9	-	-	-
2,0	106,5	-	-	-
2,5	133,1	39,0	78,3	2,0
3,0	159,7	42,0	84,3	1,8
3,5	186,3	45,0	90,3	1,7
4,0	212,9	48,0	96,3	1,6

Tabela 11.2.1.4 – Análise do fenômeno de engolimento para o BB 3/4"

Gás Vazão*E-05 [kg/seg]	Poder Calorífico/Área [KW/m ²]	Engolimento		
		AR Vazão [l/min]	AR Vazão*E-05 [kg/seg]	Razão AR/Comb x Primario
1,0	53,2	13,5	27,1	1,8
1,5	79,9	21,0	42,1	1,8
2,0	106,5	25,0	50,2	1,6
2,5	133,1	-	-	-
3,0	159,7	-	-	-
3,5	186,3	-	-	-
4,0	212,9	-	-	-

Tabela 11.2.1.5 – Análise do fenômeno de ponta amarela para o BB 3/4"

Ponta Amarela				
Gás	Poder Calorífico/Área	AR		Razão AR/Comb x
Vazão*E-05 [kg/seg]	[KW/m ²]	Vazão [l/min]	Vazão*E-05 [kg/seg]	Primario
1,0	53,2	12,0	24,1	1,6
1,5	79,9	15,0	30,1	1,3
2,0	106,5	18,0	36,1	1,2
2,5	133,1	23,0	46,2	1,2
3,0	159,7	28,0	56,2	1,2
3,5	186,3	29,0	58,2	1,1
4,0	212,9	34,0	68,2	1,1

Com base nestes resultados é possível traçar o Diagrama de Fuidge para este queimador:

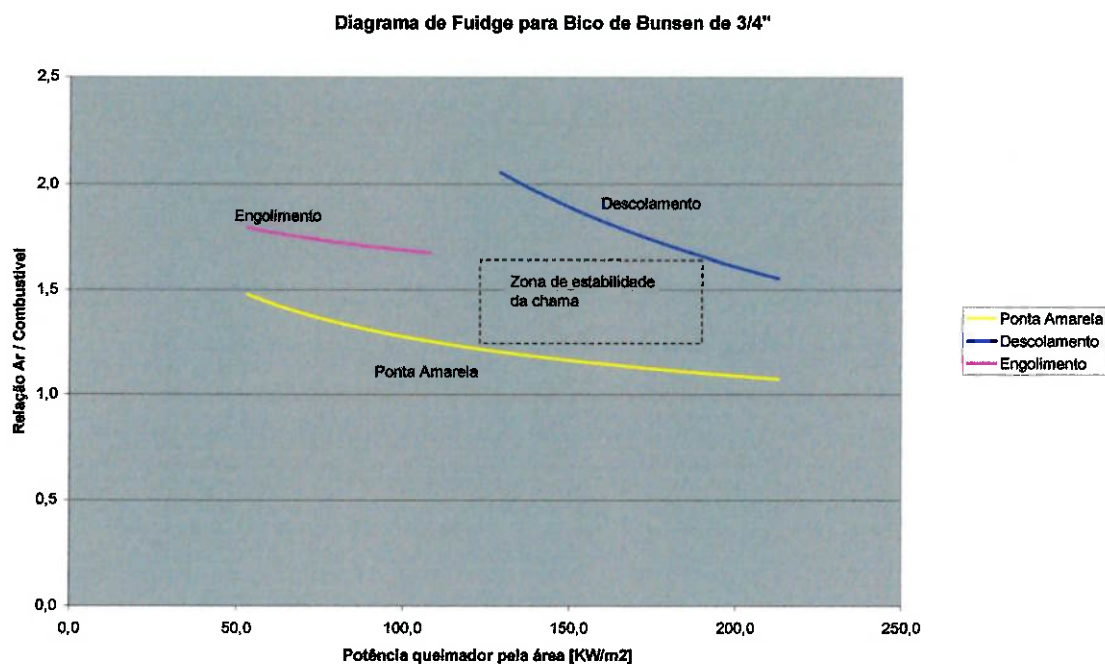


Figura 11.2.1.1 – Diagrama de Fuidge para o BB 3/4"

11.2.2 Bico de Bunsen 1/2"

A seguir são apresentados os resultados para o Bico de Bunsen de 1/2". Este Bico de Bunsen facilita a visualização do fenômeno de descolamento. Isto ocorre devido ao pequeno diâmetro do queimador, que permite maiores velocidades de deslocamento da mistura ar-combustível para as mesmas vazões de ar e combustível das medições realizadas para o Bico de Bunsen de 3/4".

Os dados de PCI (Poder Calorífico Inferior) e Massa Molecular são calculados na seção 7 deste trabalho, descrição teórica. O cálculo do Poder calorífico do gás para uma dada vazão é a multiplicação da vazão mássica de combustível pelo PCI, dividido pela área da seção transversal do Bico de Bunsen.

Tabela 11.2.2.1 – Referência para medição e análise de Dados BB 1/2"

Referência				
Gás	AR Estequiométrico			
Vazão*E-05 [kg/seg]	Vazão [l/min]	Massa Molecular	53,91	[Kg/Kmol]
0,5	3,9	PCS glp	81799,9	[kJ/Kmol comb.]
1,0	7,7		1517,31	[KJ/Kg]
1,5	11,5			
2,0	15,4			
2,5	19,2			
3,0	23,1			
3,5	25,9			
4,0	30,8			

Bico Bunsen		
Diâmetro	1/2	[polegadas]
Área	1,27E-04	[m ²]

Tabela 11.2.2.2 – Medições de dados para o BB 1/2"

Medições					
Gás	AR Estequiométrico		Descolamento	Engolimento	Ponta Amarela
Vazão*E-05 [kg/seg]	Vazão [l/min]	Efeito Observado	Vazão [l/min]	Vazão [l/min]	Vazão [l/min]
0,5	4,0	Ponta Amarela	-	15,0	11,0
1,0	8,5	Ponta Amarela	-	19,0	11,0
1,5	11,0	Ponta Amarela	22,5	-	15,0
2,0	15,0	Ponta Amarela	26,0	-	17,5
2,5	20,0	Ponta Amarela	30,5	-	26,0
3,0	23,0	Ponta Amarela	32,0	-	27,0
3,5	25,0	Ponta Amarela	33,5	-	32,0
4,0	30,0	Ponta Amarela	35,0	-	35,0

Assim como na medição anterior, a tomada de dados de vazão de ar para visualização dos fenômenos de chama em função de uma vazão de combustível fixa também abordou a visualização do estado da chama na mistura estequiométrica. Em todos os casos, em $\phi=1$, observou-se uma ponta amarela na chama, mostrando que era necessário ar de difusão para terminar o processo de combustão.

A explicação deste fenômeno através de um possível excesso de propano ou butano também é válida neste caso.

A análise destes dados está exposta a seguir:

Tabela 11.2.2.3 – Análise do fenômeno de descolamento para o BB 1/2"

Descolamento				
Gás	Poder Calorífico/Área	AR		Razão AR/Comb x
Vazão*E-05 [kg/seg]	[KW/m ²]	Vazão [l/min]	Vazão*E-05 [kg/seg]	Primario
0,5	59,9	-	-	-
1,0	119,8	-	-	-
1,5	179,7	22,5	45,2	1,9
2,0	239,6	26,0	52,2	1,7
2,5	299,4	30,5	61,2	1,6
3,0	359,3	32,0	64,2	1,4
3,5	419,2	33,5	67,2	1,2
4,0	479,1	35,0	70,2	1,1

Tabela 11.2.2.4 – Análise do fenômeno de engolimento para o BB 1/2"

Engolimento				
Gás	Poder Calorífico/Área	AR		Razão AR/Comb x
Vazão*E-05 [kg/seg]	[KW/m ²]	Vazão [l/min]	Vazão*E-05 [kg/seg]	Primario
0,5	59,9	15,0	30,1	3,9
1,0	119,8	19,0	38,1	2,5
1,5	179,7	-	-	-
2,0	239,6	-	-	-
2,5	299,4	-	-	-
3,0	359,3	-	-	-
3,5	419,2	-	-	-
4,0	479,1	-	-	-

Tabela 11.2.2.5 – Análise do fenômeno de ponta amarela para o BB 1/2"

Ponta Amarela				
Gás	Poder Calorífico/Área	AR		Razão AR/Comb x
Vazão*E-05 [kg/seg]	[KW/m ²]	Vazão [l/min]	Vazão*E-05 [kg/seg]	Primario
0,5	59,9	11,0	22,1	2,9
1,0	119,8	11,0	22,1	1,4
1,5	179,7	15,0	30,1	1,3
2,0	239,6	17,5	35,1	1,1
2,5	299,4	26,0	52,2	1,4
3,0	359,3	27,0	54,2	1,2
3,5	419,2	32,0	64,2	1,2
4,0	479,1	35,0	70,2	1,1

Com base nestes resultados é possível traçar o Diagrama de Fuidge para este queimador:

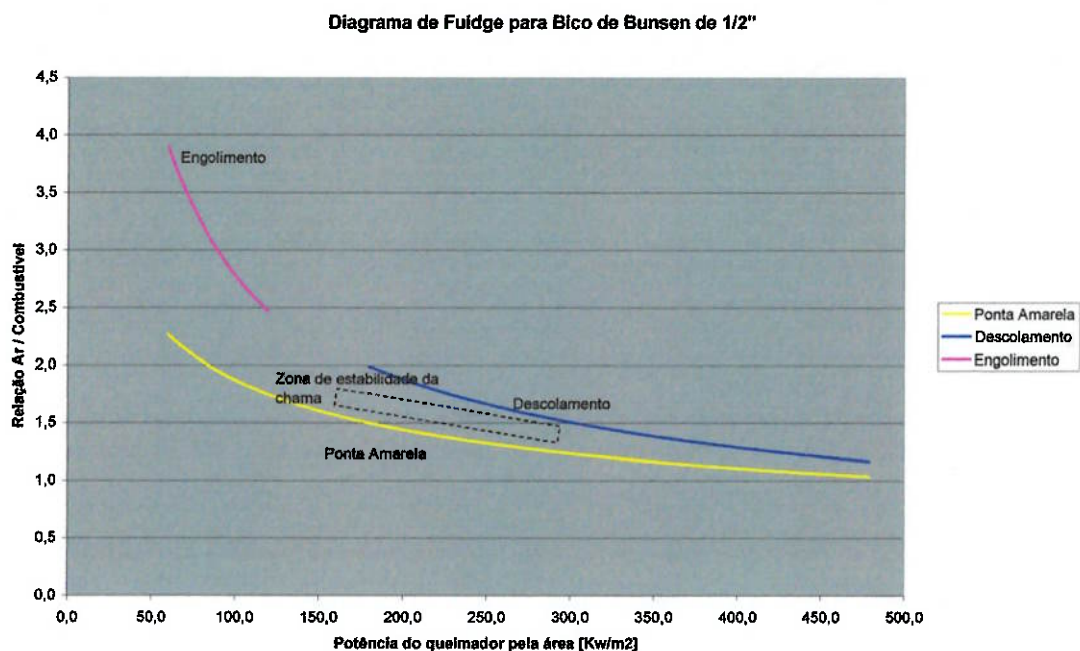


Figura 11.2.2.1 – Diagrama de Fuidge para o BB 1/2"

11.2.3 Bico de Bunsen 1"

A seguir são apresentados os resultados para o Bico de Bunsen de 1". Este Bico de Bunsen facilita a visualização do fenômeno de engolimento. Isto ocorre devido ao grande diâmetro do queimador, que permite menores velocidades de deslocamento da mistura ar-combustível para as mesmas vazões de ar e combustível das medições realizadas para o Bico de Bunsen de 3/4".

Menores velocidades de deslocamento favorecem o engolimento porque a velocidade de frente de chama laminar é constante independentemente do fluxo de escoamento de ar. Assim, um fluxo pequeno faz com que o combustível queime a uma velocidade mais rápida que a velocidade de entrada da mistura ar-combustível. Portanto, a chama tem a tendência de entrar no corpo do queimador que não possui uma tela corta-chama, este caso.

Os dados de PCI (Poder Calorífico Inferior) e Massa Molecular são calculados na seção 7 deste trabalho, descrição teórica. O cálculo do Poder calorífico do gás para uma dada vazão é a multiplicação da vazão mássica de combustível pelo PCI, dividido pela área da seção transversal do Bico de Bunsen.

Tabela 11.2.3.1 – Referência para medição e análise de Dados BB 1"

Referência				
Gás	AR Estequiométrico	Gás		
Vazão*E-05 [kg/seg]	Vazão [l/min]	Massa Molecular	53,91	[Kg/Kmol]
0,5	3,9	PCS glp	81799,9	[kJ/Kmol comb.]
1,0	7,7		1517,31	[Kj/Kg]
2,0	15,4	Bico Bunsen		
3,0	23,1	Diâmetro	1	[polegadas]
4,0	30,8	Área	5,07E-04	[m ²]
5,0	3,9			

Tabela 11.2.3.2 – Medições de dados para o BB 1"

Medições					
Gás	AR Estequiométrico		Descolamento	Engolimento	Ponta Amarela
Vazão*E-05 [kg/seg]	Vazão [l/min]	Efeito Observado	Vazão [l/min]	Vazão [l/min]	Vazão [l/min]
0,5	3,8	Ponta Amarela	-	8,5	8,0
1,0	8,0	Ponta Amarela	-	12,0	10,5
2,0	15,5	Ponta Amarela	-	23,0	20,5
3,0	23,0	Ponta Amarela	-	30,0	27,5
4,0	30,0	Ponta Amarela	-	41,0	37,0
5,0	37,5	Ponta Amarela	-	50,0	44,5

Assim como nas medições anteriores, a tomada de dados de vazão de ar para visualização dos fenômenos de chama em função de uma vazão de combustível fixa também abordou a visualização do estado da chama na mistura estequiométrica. Em todos os casos, em $\phi=1$, observou-se uma ponta amarela na chama, mostrando que era necessário ar de difusão para terminar o processo de combustão.

A explicação deste fenômeno através de um possível excesso de propano ou butano também é válida neste caso.

A análise destes dados está exposta a seguir:

Tabela 11.2.3.3 – Análise do fenômeno de descolamento para o BB 1"

Descolamento				
Gás	Poder Calorífico/Área	AR		
Vazão*E-05 [kg/seg]	[KW/m ²]	Vazão [l/min]	Vazão*E-05 [kg/seg]	Razão AR/Comb x Primário
0,5	15,0	-	-	-
1,0	29,9	-	-	-
2,0	59,9	-	-	-
3,0	89,8	-	-	-
4,0	119,8	-	-	-
5,0	149,7	-	-	-

Tabela 11.2.3.4 – Análise do fenômeno de engolimento para o BB 1"

Engolimento				
Gás	Poder Calorífico/Área	AR		Razão AR/Comb x
Vazão*E-05 [kg/seg]	[KW/m ²]	Vazão [l/min]	Vazão*E-05 [kg/seg]	Primario
0,5	15,0	8,5	17,1	2,2
1,0	29,9	12,0	24,1	1,6
2,0	59,9	23,0	46,2	1,5
3,0	89,8	30,0	60,2	1,3
4,0	119,8	41,0	82,3	1,3
5,0	149,7	50,0	100,3	1,3

Tabela 11.2.3.5 – Análise do fenômeno de ponta amarela para o BB 1"

Ponta Amarela				
Gás	Poder Calorífico/Área	AR		Razão AR/Comb x
Vazão*E-05 [kg/seg]	[KW/m ²]	Vazão [l/min]	Vazão*E-05 [kg/seg]	Primario
0,5	15,0	8,0	16,1	2,1
1,0	29,9	10,5	21,1	1,4
2,0	59,9	20,5	41,1	1,3
3,0	89,8	27,5	55,2	1,2
4,0	119,8	37,0	74,2	1,2
5,0	149,7	44,5	89,3	1,2

Com base nestes resultados é possível traçar o Diagrama de Fuidge para este queimador:

Diagrama de Fuidge para Bico de Bunsen de 1"

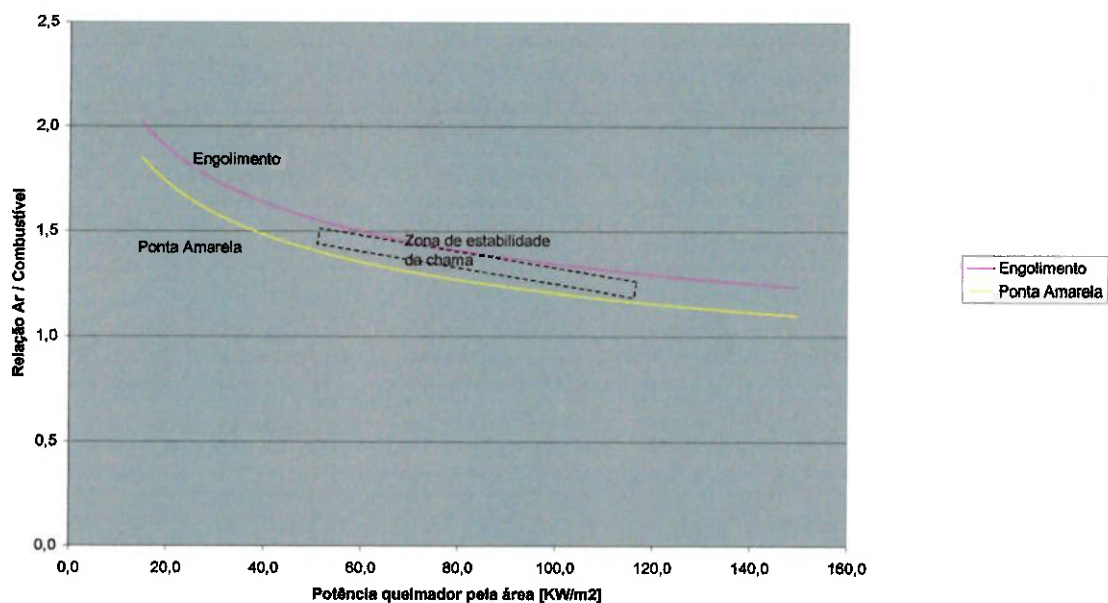


Figura 11.2.3.1 – Diagrama de Fuidge para o BB 1"

É interessante mencionar que não foi possível observar o fenômeno de descolamento para este queimador. Isto porque não é possível elevar a vazão de ar

suficientemente. A limitação o rotâmetro de ar que não permite vazões maiores que 50 [l/min], vazão insuficiente para descolar a chama da superfície do Bico de Bunsen.

11.2.4 Consolidação dos Diagramas de Fuidge

Comparativamente é possível observar as características de cada queimador através do digrama de Fuidge. Outra possível análise é observar o comportamento de um queimador para diferentes tipos de combustível (análise não realizada neste trabalho).

Uma função desta comparação é na escolha de qual é o queimador mais apropriado para a queima de um combustível dado as condições de projeto.

Este diagrama foi feito com todas as medições realizadas nos três testes (um para cada Bico de Bunsen) já apresentados anteriormente nas tabelas das seções 12.2.1, 12.2.2 e 12.2.3 deste trabalho. Assim, a tabela de medições consolidadas não será apresentada, mas somente o diagrama decorrente da mesma.

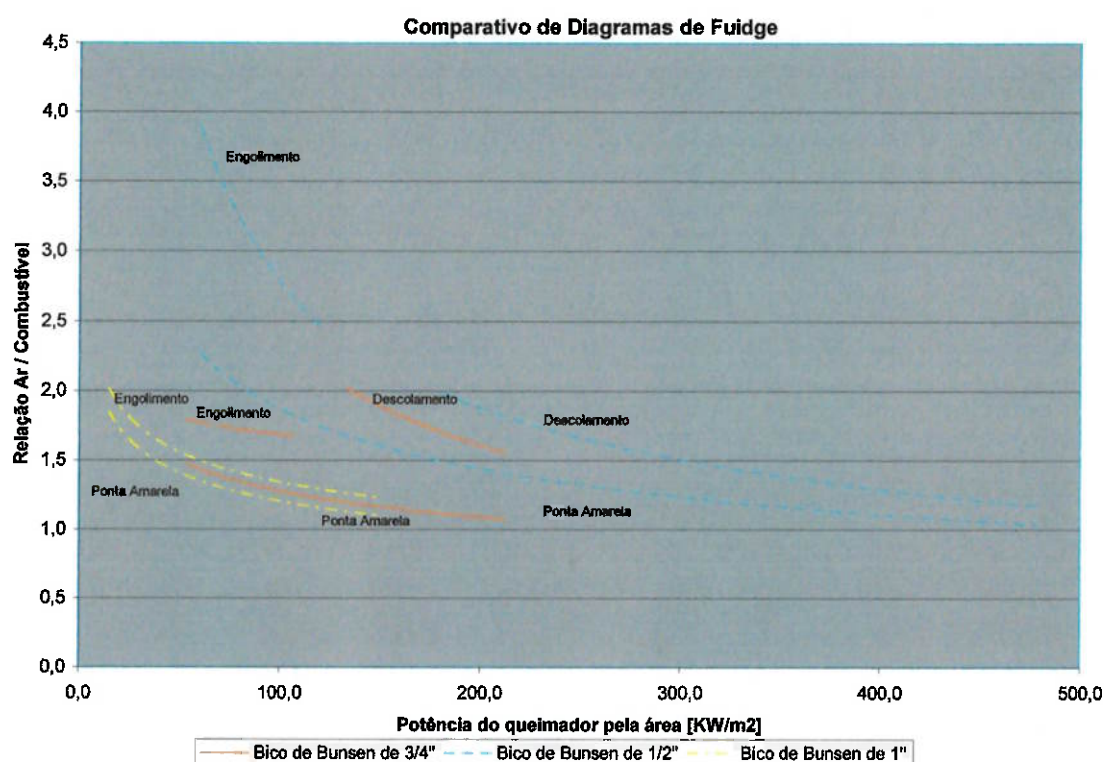


Figura 11.4.1 – Diagrama de Fuidge consolidado para o três Bicos de Bunsen do projeto.

O queimador que permite uma faixa mais ampla de operações para o Gás Liquefeito de Petróleo - GLP, conforme observações anteriores é o Bico de Bunsen de 3/4". A faixa de operação deste queimador é para uma relação de Ar / Combustível de 1,2 a 1,8 (excesso de ar de 20% a 80%). Para uma potência de 100 a 200 [kW/m²].

11.2.5 Imagens dos fenômenos da chama

Para melhor compreensão da teoria e mostrando a operabilidade e ratificar a funcionalidade do equipamento, a seguir será demonstrada fotos com os fenômenos de chama:



Figura 12.2.5.1. – Vizualização do cone azul da chama



Figura 12.2.5.2. – Visualização da ponta amarela

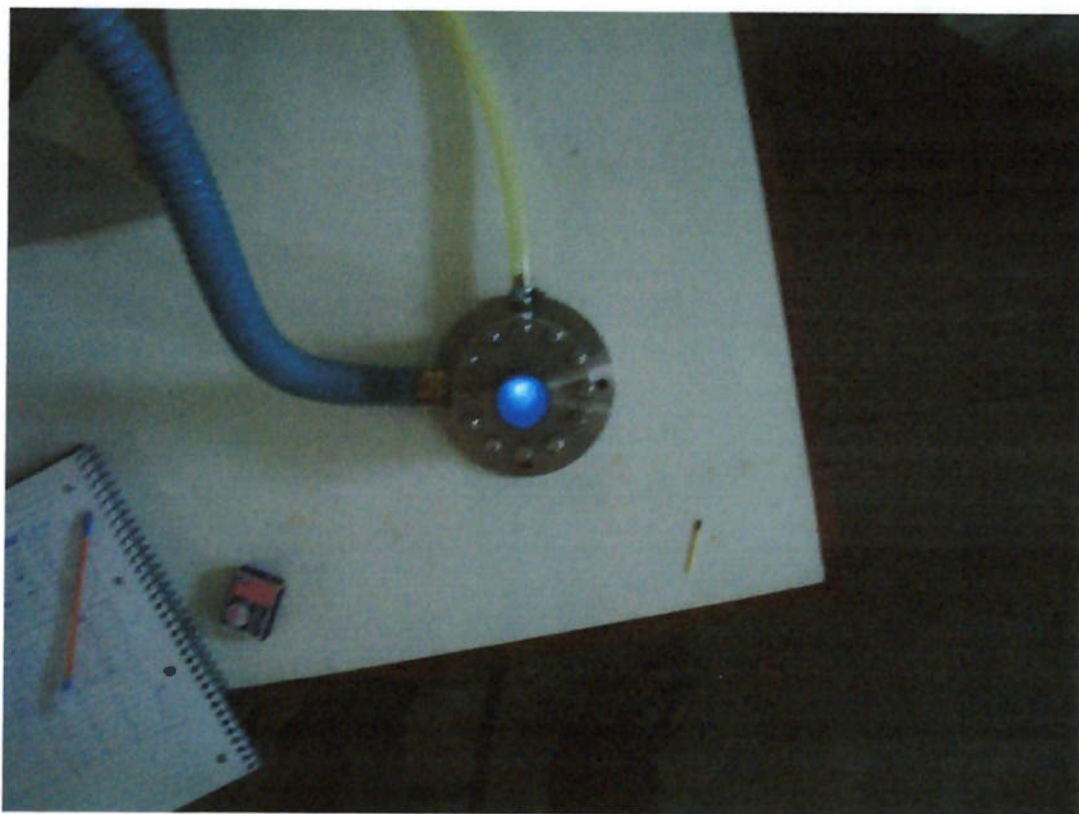


Figura 12.2.5.3. – Engolimento da chama

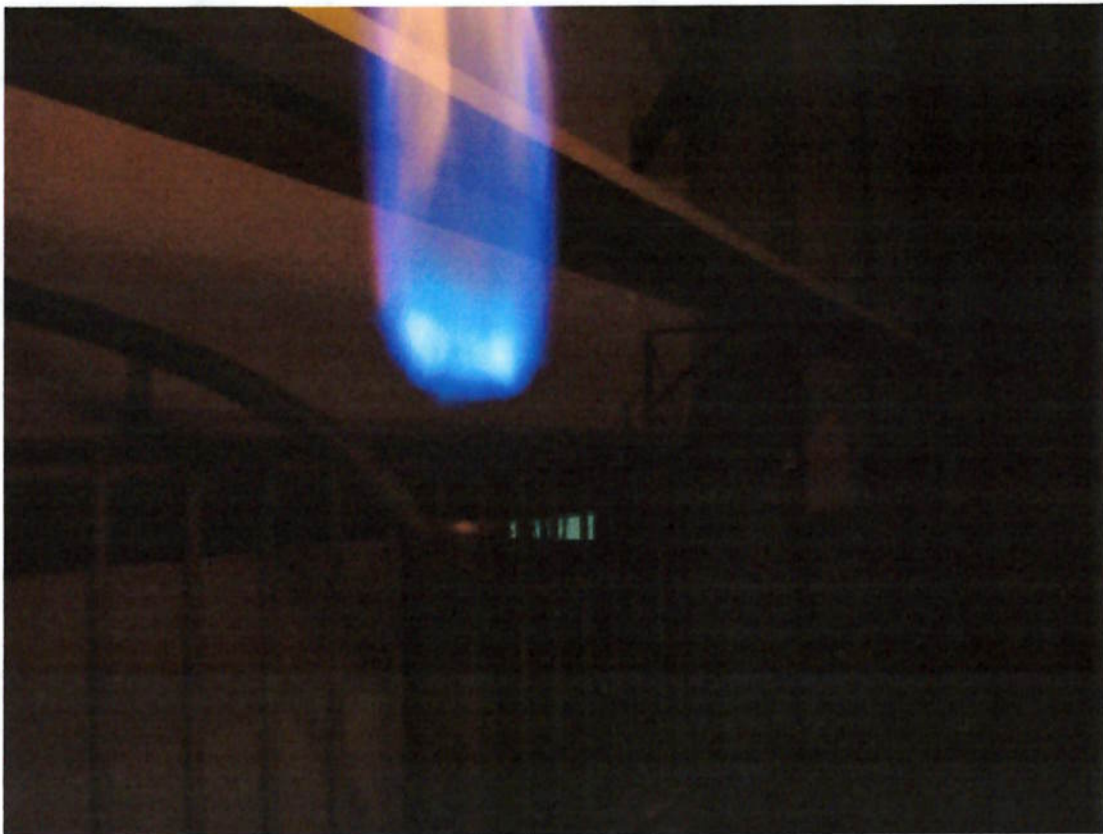


Figura 12.2.5.4. – Descolamento da chama

12. Conclusão

O presente trabalho de formatura apresenta dois focos distintos. O primeiro consiste no estudo da teoria de combustão de uma mistura de ar-combustível. O segundo consiste na construção de equipamento didático para visualização de fenômenos de chama e obtenção da propriedade de velocidade laminar de frente de chama.

Esta divisão está de acordo com o intuito inicial dos autores do trabalho, pois permitiu a construção de um equipamento que será utilizado pelos alunos da Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo em disciplinas de processos de combustão.

O aparato experimental permite a visualização dos seguintes fenômenos combustão, passíveis de ocorrer em queimadores industriais e residenciais: engolimento (flashback); descolamento (liftoff); apagamento (drop-back ou blow-out); ponta amarela (yellow-tipping) que gera formação de fuligem. Além disso, é possível observar a região estequiométrica da chama através da formação de um anel incandescente em uma tela de alumínio, quando esta é posicionada em cima da chama.

A velocidade laminar de frente de chama também pode ser obtida e comparada com seu valor teórico calculado, se conhecida a composição do combustível. Os valores teóricos são calculados para três tipos de combustíveis: Gás Natural, Acetileno e Gás Liquefeito de Petróleo – GLP.

Os estudos teóricos da combustão são complementados com o Diagrama de Fuidge obtido para os diversos Bicos de Bunsen manufaturados para este projeto. Estes diagramas permitem a escolha entre diversos queimadores e o comportamento de um queimador frente a distintos combustíveis.

As dificuldades apresentadas durante a execução do projeto são segurança, construção e localização do aparato experimental. A construção foi prejudicada ainda pela falta de conhecimento dos autores sobre como construir um equipamento didático da forma mais racional possível.

A sala utilizada para a montagem do aparato experimental não está apropriada para receber um grupo de estudantes. A sala não possui instrumentos de segurança básicos para a realização de processos de combustão com 100% de segurança.

A segurança, por sua vez, uma das maiores preocupações dos autores e do orientador do trabalho limitou testes com o Acetileno. O equipamento, da maneira como está disposto, não garante a operação segura deste combustível.

Os testes com o Gás Natural não foram realizados porque este combustível não é disponibilizado pela Comgas dentro do campus Cidade Universitária da Universidade de São Paulo.

Melhorias futuras são necessárias para atingir completamente os objetivos do projeto.

Aumento da segurança, com a instalação de extintores de incêndio dentro da sala de teste e a construção de uma “gaiola” no ambiente externo para posicionar os botijões de GLP e Acetileno são necessários. Para o uso do acetileno é recomendada a inclusão de uma válvula de segurança de impedimento de passagem específica para este combustível.

Recomenda-se ainda a aquisição de um pequeno tubo de vidro com o diâmetro interno de 3/4 de polegada, para efetuar a experiência de separação de Smithells. Este experimento permite visualizar o cone de chama de pré-mistura separadamente da chama de difusão.

Por fim, recomenda-se modificar as instalações acrescentando uma válvula T antes da entrada do rotâmetro de medição de vazão do combustível. Esta válvula permite a operação do equipamento com mais de um tipo de combustível sem a necessidade de desmontar o equipamento para a troca de tubulação ou botijões. Portanto, facilitaria a inclusão de um novo tipo de combustível ao sistema.

13. Bibliografia

[1] VAN WYLEN, G. J.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 5.ed. Edgard Blücher, 1998. v.1.

[2] INCROPERA, F. P.; DE WITT, D.P. **Transferência de Calor e Massa**. 3.ed. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992. v.1.

[3] TURNS, S.R. **An Introduction to Combustion**. 2.ed. New York: McGraw–Hill, 2000. (McGraw–Hill Higher Education)

[4] GLASSMAN, I. **Combustion**. 2.ed. London: Academic Press. Inc., 1987.

[5] LEWIS, B.; VON ELBE, G. **Combustion, Flames and Explosions** 2.ed. New York: Academic Press. Inc., 1951.

[6] SANCHEZ, C. G. **Curso de Especialização Engenharia do Gás Natural – Combustão Estabilidade e Propagação de Chamas**. 2002. 15p. Apostila do Curso – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2002.

[7] Brastemp. São Paulo. Apresenta recursos disponíveis sobre fogões. Disponível em : <www.brastemp.com.br> Acesso em: 26 / 06 / 2004

[8] Dako. São Paulo. Apresenta recursos disponíveis sobre fogões. Disponível em : <www.dako.com.br> Acesso em: 26 / 06 / 2004

[9] Bosch. São Paulo. Apresenta recursos disponíveis sobre fogões. Disponível em : <www.bosch.com.br> Acesso em: 26 / 06 / 2004

[10] JWC. São Paulo. Fabricante de acendedores (ignitores) para fogões.
Disponível em : <www.jwc.com.br> Acesso em: 26 / 06 / 2004

[11] GUIDORIZI, H. L. **Um curso de Cálculo**. 4.ed. Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000. v.1.

[12] GRIFFTHS, J.F. ; BARNARD J.A. **Flame and Combustion**. 3.ed. Blackie Academic & Professional, 1995. v.1.

14. Anexos

A – Manual de utilização

B – Cartas de calibração

C – Parâmetros para cálculo de reações químicas

D – Desenhos técnicos dos bicos de bunsen

Anexo A – Manual de Utilização

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MANUAL DE UTILIZAÇÃO – UNIDADE DE PROPAGAÇÃO E ESTABILIDADE DE CHAMA

EXPERIMENTOS:

MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE CHAMA

FENÔMENOS ASSOCIADOS À COMBUSTÃO

SÃO PAULO
2005

Sumário

1. DESCRIÇÃO DA TEORIA.....	2
1.1. EQUACIONAMENTO DA VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR	4
2. ASPECTOS DE SEGURANÇA E CONTROLE	7
3. EQUIPAMENTO	10
4. PROCEDIMENTO	11
4.1. Experimento: Velocidade de Propagação de Chama	11
4.2. Experimento: Estabilidade de chama	13
4.3. Demonstração de separação de Smithells	17
5. BIBLIOGRAFIA.....	18
6. ANEXO.....	19

1. Descrição da Teoria

O estudo da propagação de uma chama, que engloba a análise de sua composição química, velocidade de propagação, relação ar-combustível e fenômenos como o de descolamento (*lift-off*), engolimento (*flash-back*) e ponta amarela (*yellow-tip*) é de muita utilidade no dimensionamento de sistemas de combustão tais como: queimadores para caldeiras e aquecedores, câmaras de combustão para motores, caldeiras e aquecedores; câmaras de combustão para motores e turbinas a gás, fornalhas, etc.

Em uma combustão, a mistura ar-combustível queima segundo uma frente de chama cuja velocidade depende do grau de reação da mistura. Em outras palavras, depende da temperatura e das concentrações ar-combustível. Normalmente a velocidade de chama é máxima para uma mistura levemente enriquecida, maior do que para a estequiométrica.

O cone interno encontrado na chama de um aquecedor gás/ar é formado pela frente de chama alinhando-se de forma que a componente da velocidade do gás/ar perpendicular a frente de chama é igual à velocidade de chama. O excesso de gás não é queimado, passando através da frente de chama e queimando-se no cone exterior que envolve a chama.

Nas proximidades da parede do tubo queimador a vazão de gás é reduzida pela ação do atrito na parede de maneira que próximo à parede a velocidade pode ser menor que a velocidade de chama. Assim a chama se estabelecerá imediatamente acima da extremidade do tubo. À medida que a chama se aproxima do tubo sua velocidade se reduz pela presença da parede do tubo que lhe retira calor e pelas espécies intermediárias da reação de combustão em cadeia proveniente da chama. Uma posição de estabilidade é obtida com a chama imediatamente acima da extremidade do tubo queimador.

Uma chama pode ser estabilizada pela presença de qualquer corpo que crie turbulência e uma zona de estagnação, dentro da qual a chama pode se estabelecer.

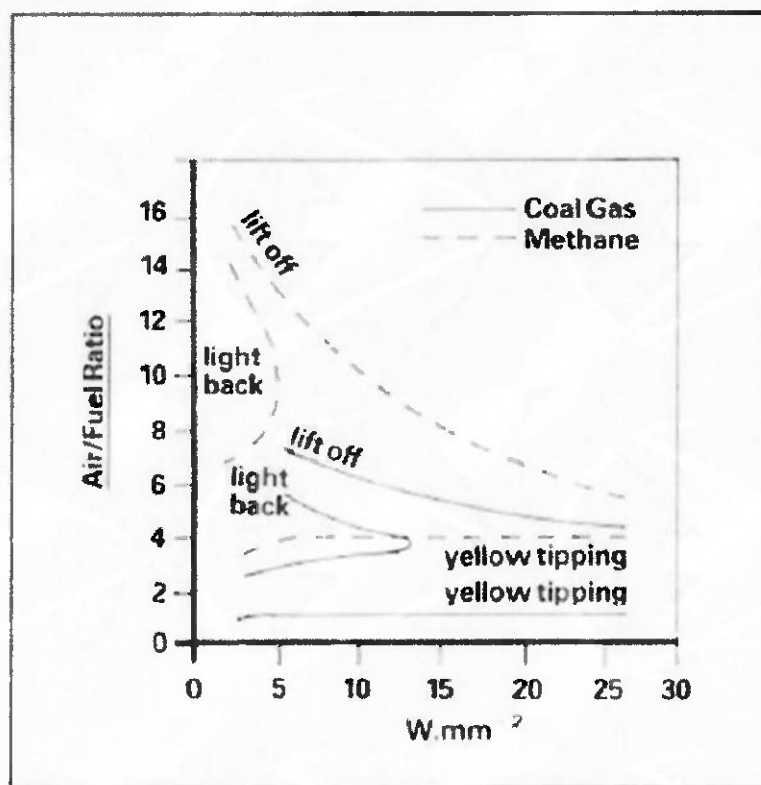
Observando-se os fenômenos associados a uma chama, pode-se dizer que esta estará estável quando sua formação ocorre sobre um tubo queimador entre os limites de descolamento e retorno pelo queimador (engolimento).

O retorno da chama no tubo queimador ocorre quando em algum lugar da base da chama, a velocidade da chama torna-se maior que a velocidade do gás. Desta maneira a onda de combustão irá se mover para dentro do tubo queimador. O retorno da chama é mais sério quando se usa hidrogênio como gás combustível, isso porque sua velocidade de propagação de chama é alta em comparação com outros gases como por exemplo o GLP ou o metano.

O descolamento ocorre quando a velocidade do gás é muito maior que a velocidade da chama, assim, a chama se extingue ao ser deslocada da borda do queimador.

Escape e descolamento podem ser causados por variações na velocidade da mistura no tubo queimador, ou por variações na composição da mistura, o que causa variações na velocidade da chama.

É possível construir um diagrama da velocidade da mistura gasosa versus a composição da mistura ar-combustível e com isto mostrar os limites de estabilidade da chama (Diagrama de Fuidge), como pode ser observado na figura abaixo (Figura 1.1).



Fuidge Diagram

Figura 1.1 – Diagrama de Fuidge

Segue uma breve descrição da teoria necessária para o equacionamento da velocidade de propagação e espessura de chama. Para informações mais detalhadas sobre tal equacionamento consulte a bibliografia.

1.1. Equacionamento da velocidade de chama laminar

A análise a seguir é feita segundo a proposição realizada por Spalding aonde o problema é abordado de maneira física sem grandes formulações matemáticas. São analisados os princípios de transferência de calor, transferência de massa, cinética química e termodinâmica para entender os

fatores que governam a velocidade de chama e a espessura da mesma ("thickness").

Hipóteses

- Deslocamento unidimensional de área constante;
- Energia cinética, energia potencial, viscosidade do meio de trabalho, e radiação térmica são desprezíveis;
- Pressão constante – despreza-se a variação de pressão pela chama;
- A difusão de calor e a difusão massa seguem os princípios da Lei de Fourier e Lei de Fick;
- Número de Lewis, que expressa a taxa de difusividade térmica para difusividade mássica é 1 (um);
- O calor específico da mistura não depende da temperatura e pressão – o calor específico da mistura é constante;
- A reação estequiométrica descrita ocorre em um único passo;
- O combustível é completamente consumido pela chama;
- A mistura ar - combustível se comporta como um gás perfeito

Assumindo as hipóteses acima obtemos a seguinte equação de velocidade de frente de chama:

$$S_L = \left[-2\alpha(\nu + 1) \frac{\dot{m}_F^{III}}{\rho_u} \right]^{\frac{1}{2}}$$

E espessura da chama:

$$\delta = \left[-\frac{2\alpha}{(\nu + 1)} \frac{\rho_u}{\dot{m}_F^{III}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Onde:

- S_L - velocidade laminar de chama;
- α - difusividade térmica;
- ν - taxa estequiométrica ar-combustível;
- $\dot{m}_F$ - taxa média de produção de combustível da reação química por unidade de volume;
- ρ_u - massa específica da mistura ar-combustível antes da queima;

2. Aspectos de Segurança e Controle

Outro aspecto importante a ser considerado quando se trata de combustão é a segurança da operação.

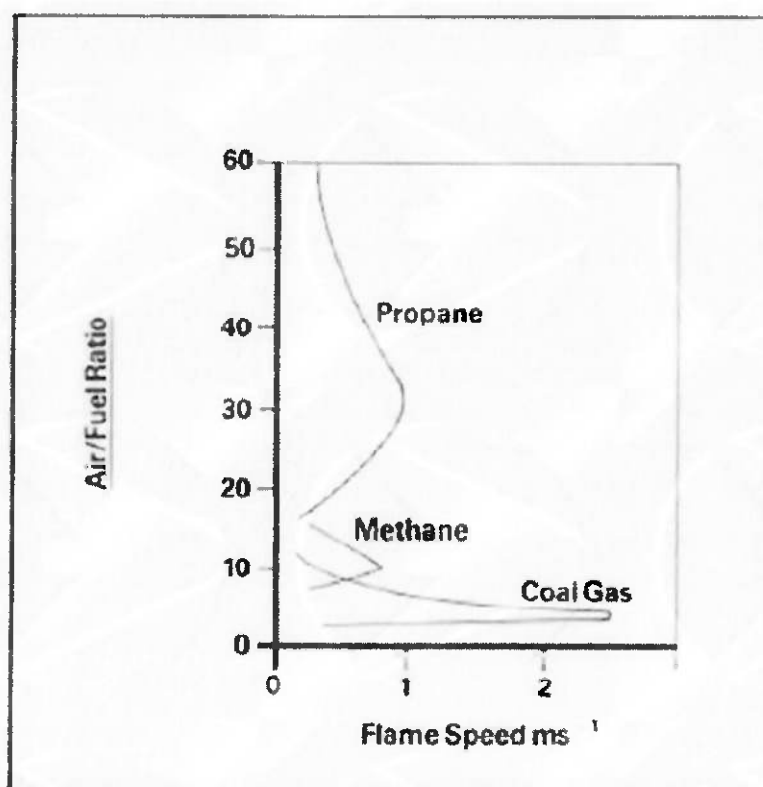
A segurança, neste caso pode ser abordada sob dois pontos de vista.

O primeiro que diz respeito à própria teoria, ou seja, aspectos teóricos que devem ser levados em conta quando da realização de um experimento de combustão.

Para que um experimento desta natureza seja seguro deve-se observar alguns aspectos como:

- Risco de Ignição
- Velocidade de propagação de chama
- Limites de Inflamabilidade
- Diâmetro de esfriamento (*cold wall*)

Para combustíveis que contém Hidrogênio pode-se observar através da figura abaixo (Figura 2.1) que suas velocidades são maiores, assim como seu risco de ignição (devido a sua composição química – reage facilmente).



Horizontal Flame Speeds at NTP and Zero Gas Velocity

Figura 2.1 – Diagrama de velocidade de chama adiabática horizontal pré misturada de diversos gases, nas condições normais.

O diâmetro de esfriamento, diâmetro mínimo do tubo para a chama o atravessasse sem se extinguir, pode ser calculado a partir de formulação disponível na bibliografia . Da mesma maneira, observa-se que gases que contém Hidrogênio apresentam maior periculosidade, visto que possuem menores diâmetros de esfriamento. Tal fato pode ser observado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Diâmetro de esfriamento de diversos gases (valores aproximados)

	Comburente	
	AR	OXIGÊNIO
Metano	1 cm	0,5 cm
Propano	1 cm	0,5 cm
Butano	1 cm	0,5 cm
Gás de Rua	0,5 cm	0,25 cm
Hidrogênio	0,4 cm	0,2 cm

3. Equipamento

O equipamento utilizado para a realização deste experimento foi elaborado por alunos da escola e consiste basicamente de um aparato capaz de medir a velocidade da frente de chama e possibilitar a visualização de outros fenômenos associados à chama como engolimento e descolamento de chama.

O equipamento consiste de uma torre onde se encontram dois rotâmetros responsáveis pela medição da vazão do ar e do combustível, no caso, os combustíveis disponíveis são: GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) e Acetileno (C_2H_2). Tanto ar proveniente do ambiente como combustível proveniente da linha são direcionados para uma caixa de mistura, onde são misturados. Desta caixa de mistura sai um terceiro tubo que está ligado ao tubo queimador por meio de uma válvula.

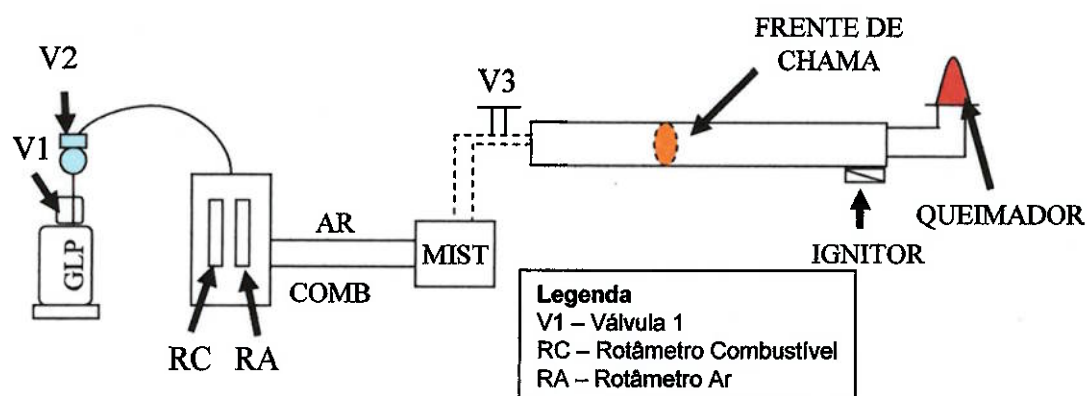
Para a medida da velocidade da frente de chama deve-se preencher o tubo queimador (tubo transparente) com uma mistura conhecida. Deve-se, no final do tubo, dar a ignição para que a chama se estabilize. Após a estabilização* da chama pode-se apagar esta chama e estará garantido que a mistura presente dentro do tubo é homogênea. Então a ignição pode ser dada novamente (desta vez, através do ignitor) e assim pode-se visualizar a olho nu o deslocamento da frente de chama dentro do tubo e pode-se medir a velocidade de propagação da frente de chama de forma manual.

*A estabilização da chama é notada pela consistência da mesma (chama azul)

4. Procedimento

4.1. Experimento: Velocidade de Propagação de Chama

São necessários dois operadores para este experimento. Observe a Figura 4.1.1
 Figura 4.1.1 – Esquema do equipamento



Importante: antes de iniciar o experimento, certifique-se a válvula V3 está bem encaixada.

Seguem os passos a serem seguidos para a realização do experimento.

1. Ligar o ventilador
2. Abrir a válvula de ar do rotâmetro RA até que se alcance uma vazão de 30 l/min
3. Abrir a válvula V1
4. Abrir a válvula V2
5. Abrir a válvula de gás do rotâmetro RC
6. Abrir a válvula V3
7. Observar, no rotâmetro do combustível, uma marca entre 2 e 3×10^{-4} kg/s
8. Acender o gás na saída do queimador (com um fósforo).
9. Ajustar o controle de ar e gás até atingir a relação ar-combustível desejada (Note que há um certo tempo de resposta na chama quando se

atua nos controladores. Deve-se esperar pelo menos 5 segundos após cada ajuste nos controladores)

10. Quando a chama já estiver estável por mais de 10 segundos na razão ar-combustível desejada, fechar a válvula V3 – a chama se apagará.
11. Fechar a válvula V2 – medida de segurança para garantir que o botijão de combustível esteja isolado do restante do sistema.
12. O outro operador dá novamente a ignição (usar o IGNITOR) e desta vez a chama se deslocará em direção ao misturador. O operador anota o tempo que a frente de chama leva para ir de um ponto de referencia a outro. (note que a distância entre o ignitor e a tela corta chama após a válvula V3 é de 335 mm).
13. Voltar ao passo 4 para realizar outras medições de velocidade de frente de chama. A velocidade de frente de chama laminar é obtida através da média das medições realizadas neste experimento.
14. Após realizado o experimento fechar os dois rotâmetros (vazão zero) e TODAS as válvulas (V1, V2 e V3) e desligar o ventilador.

OBS: caso a chama se apague ao longo do seu percurso, reiniciar o experimento.

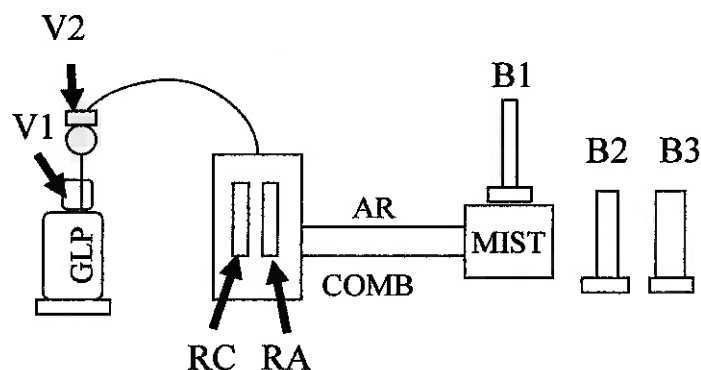
4.2. Experimento: Estabilidade de chama

O estudo de estabilidade de uma chama engloba alguns diferentes fenômenos, sendo que cada um deles pode ser obtido a partir de modificações na relação ar-combustível, na vazão de combustível ou na geometria do queimador. Neste experimento pode-se constatar visualmente a existência dos fenômenos:

- Engolimento (flash-back)
- Descolamento (lift-off)
- Chama amarela (yellow-tip)

Para a visualização destes fenômenos utiliza-se, preferencialmente o Bico de Bunsen intermediário (B2), de 3/4" de diâmetro interno.

Figura 4.2.1 – Esquema do equipamento – bicos de bunsen



Para a realização de qualquer um dos experimentos, para qualquer um dos bicos de bunsen, deve-se primeiramente:

1. Acoplar o bico de bunsen ao misturador (pode ser necessário retirar a mangueira flexível utilizada na experiência de medição de velocidade de frente de chama e antes de acoplar o bico de bunsen).
2. Ligar o ventilador

3. Abrir a válvula de ar do rotâmetro RA até que se alcance uma vazão de 20 l/min
4. Abrir a válvula V1
5. Abrir a válvula V2
6. Abrir a válvula de gás do rotâmetro RC
7. Observar, no rotâmetro do combustível, uma marca entre $2 \text{ e } 3 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$
8. Acender, com um fósforo, a chama na borda do bico de bunsen.

IMPORTANTE: Cuidado ao acender a chama, ela pode alcançar alturas de até 50cm acima do bico de bunsen. Cuidado ao manejar os bicos de bunsen, pois após certo tempo de utilização em experimentos este pode alcançar altas temperaturas.

9. Obter a vazão as vazões de combustível e ar respectivamente conforme a tabela 4.2 abaixo. Iniciar as medições com as vazões mais baixas e aumentar progressivamente.

Tabela 4.2 Referência para experiência de estabilidade da chama

Referência de Ar e Combustível para Experimentos de Estabilidade da Chama					
Bico de Bunsen de 0,5"		Bico de Bunsen de 3/4"		Bico de Busnen de 1"	
Gás	AR Estequiométrico	Gás	AR Estequiométrico	Gás	AR Estequiométrico
Vazão*E-05 [kg/seg]	Vazão [l/min]	Vazão*E-05 [kg/seg]	Vazão [l/min]	Vazão*E-05 [kg/seg]	Vazão [l/min]
0,5	3,9	1,0	7,7	0,5	3,9
1,0	7,7	1,5	11,5	1,0	7,7
1,5	11,5	2,0	15,4	2,0	15,4
2,0	15,4	2,5	19,2	3,0	23,1
2,5	19,2	3,0	23,1	4,0	30,8
3,0	23,1	3,5	25,9	5,0	3,9
3,5	25,9	4,0	30,8	-	-
4,0	30,8	-	-	-	-

10. Com a vazão de combustível estável, varie a vazão de ar anotando os valores de vazão de ar para os quais ocorre a transição de chama azul para ponta amarela, engolimento e descolamento. Observe que os três fenômenos não necessariamente ocorrem em uma determinada vazão de combustível para um determinado Bico de Bunsen.

11. Monte uma tabela de dados com a vazão de combustível, vazão de ar estequiométrica e vazões de ar que provocam os fenômenos de ponta amarela, descolamento e engolimento.
12. Com a tabela pronta, utilizar a referência [1] para obter o PCI do combustível e achar a potência fornecida para cada vazão de combustível em função da Área ($[W/mm^2]$); e referência [3] para determinar a relação Ar / Combustível em função da mistura estequiométrica, e com esses dados montar o diagrama de Fuidge.
13. Após realizado o experimento fechar os dois rotâmetros (vazão zero) e TODAS as válvulas (V1 e V2) e desligar o ventilador.

4.3. Experimento: Visualização da região de mistura estequiométrica

Através deste experimento pode-se visualizar com clareza a região da chama onde ocorre uma queima completa sob as condições estequiométricas o que leva a uma temperatura superior à de outras regiões da chama.

Procedimento:

1. Repita os passos 1 a 8 do experimento de estabilização de chamas.
2. Pegue, com um alicate, a tela corta-chamas disponível no laboratório e posicione-a dentro da chama, a cerca de 1cm da borda do bico de bunsen.
3. Segure-a nesta posição por alguns segundos e perceba que haverá uma região incandescente – esta é a região onde ocorre a queima completa do combustível na proporção estequiométrica ($\phi=1$) $\equiv$ região de maior temperatura da chama.
4. Retire a tela de cima do bico de bunsen
5. Após realizado o experimento fechar os dois rotâmetros (vazão zero) e TODAS as válvulas (V1 e V2) e desligar o ventilador.

4.4. Demonstração de separação de Smithells

A separação de Smithells é um procedimento no qual pode-se visualizar, em separado, as chamas de difusão e de pré-mistura. Procedimento:

1. Selecionar o Bico de Bunsen de 3/4".
2. Repita os passos 1 a 8 do experimento de estabilização de chamas.
3. Mudar a vazão de ar e combustível até obter uma chama de cone azul bem definido, sem ponta amarela.
4. Pegar o tubo de vidro com o anel de latão, com um alicate.
5. Posicionar o tubo, com sua superfície inferior apoiada no topo do Bico de Bunsen.
6. A chama envolvente pode ser capturada pelo tubo de vidro. Será visualizado o cone azul da pré-mistura dentro do tubo de vidro e a chama de difusão na superfície superior do tubo de vidro.

5. Bibliografia

[1] VAN WYLEN, G. J.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 5.ed. Edgard Blücher, 1998. v.1.

[2] INCROPERA, F. P.; DE WITT, D.P. **Transferência de Calor e Massa**. 3.ed. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992. v.1.

[3] TURNS, S.R. **An Introduction to Combustion**. 2.ed. New York: McGraw–Hill, 2000. (McGraw–Hill Higher Education)

[4] GLASSMAN, I. **Combustion**. 2.ed. London: Academic Press. Inc., 1987.

[5] LEWIS, B.; VON ELBE, G. **Combustion, Flames and Explosions**. 2.ed. New York: Academic Press. Inc., 1951.

[6] SANCHEZ, C. G. **Curso de Especialização Engenharia do Gás Natural – Combustão Estabilidade e Propagação de Chamas**. 2002. 15p. Apostila do Curso – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2002.

[7] ANP. Rio de Janeiro. Apresenta recursos disponíveis sobre GLP. Disponível em : <www.anp.org.br> Acesso em: 20 / 09 / 2005

6. Anexo

Informações a respeito dos combustíveis considerados neste experimento.

- GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)
- Acetileno (etino)

	GLP (Gás Liquefeito de Petróleo)	Acetileno
Fórmula Molecular	$C_3H_8 + C_4H_{10}$	C_2H_2
Limites de Inflamabilidade (%)		
Ar	2,1 a 9,5%	2,3 a 82%
Oxigênio	2,8 a 4,7%	3 a 93%
Peso Específico	2,173 Kg/m ³	1,171 Kg/m ³
Velocidade de Propagação de Chama		
Ar	53 cm/seg	130 cm/seg
Oxigênio	450 cm/seg	1310 cm/seg

Anexo B – Carta de calibração

Reference Tables

AREA OF CIRCLES IN FT ²			
Diam. in Inches	Area Square Feet	Diam. in Inches	Area Square Feet
1	.0054	20	4.909
1.1	.0123	21	5.281
2	.0176	22	5.580
2.2	.0341	23	5.848
3	.0491	24	6.306
3.4	.0649	25	6.871
4	.0873	26	7.089
4.4	.1100	27	7.491
5	.1364	28	7.876
5.4	.1550	29	8.256
6	.1864	30	8.727
6.6	.2366	41	9.168
7	.2613	42	9.421
7.6	.3068	43	9.608
8	.3491	44	9.934
8.4	.3840	45	11.04
9	.4410	46	11.34
9.4	.4923	47	12.03
10	.5454	48	12.57
11	.6000	49	13.12
12	.6554	50	13.64
13	.7218	51	14.19
14	.7899	52	14.75
15	.8587	53	15.32
16	.9282	54	15.90
17	.9984	55	17.18
18	1.0693	56	17.36
19	1.1600	60	19.63
20	1.182	62	20.91
21	1.295	64	22.34
22	1.440	66	23.76
23	1.665	68	25.22
24	1.742	70	26.73
25	1.880	72	28.27
26	1.987	74	29.81
27	2.070	76	31.53
28	2.218	78	33.16
29	2.363	80	34.91

VOLUME EQUIVALENTS	
1 Cu. Ft. =	1.356 Cu. M.
	7.481 Gal. (U.S.)
	28.317 Liters
	28.317 Cu. Cm.
1 GAL. (U.S.) =	.751 Cu. M.
	135.7 Cu. Ft.
	3.785 Liters
	3785 Cu. Cm.
1 LITER =	.00333 Cu. Ft.
	.2642 Gal. (U.S.)
	1000 Cu. Cm.

ALTITUDE PRESSURE TABLE		
Mercury at 32°C (90°F)		
Altitude in Feet	Inches of Mercury	In Millimeters of Mercury
1,000	30.00	762.0
2,000	29.92	759.6
3,000	29.85	757.2
4,000	29.78	754.8
5,000	29.72	752.4
6,000	29.65	749.9
7,000	29.58	747.5
8,000	29.52	745.1
9,000	29.45	742.6
10,000	29.38	740.2
11,000	29.32	737.8
12,000	29.25	735.4
13,000	29.18	732.9
14,000	29.12	730.5
15,000	29.05	728.1
16,000	28.98	725.7
17,000	28.92	723.3
18,000	28.85	720.8
19,000	28.78	718.4
20,000	28.72	716.0

SPECIFIC GRAVITIES OF GASES		
(BASED ON 60°F AND 14.7 LBS. ABS.)		
ACETYLENE	C ₂ H ₂	.897
AIR		1.000
AMMONIA	NH ₃	.587
ARGON	Ar	1.378
BUTANE	C ₄ H ₁₀	2.550
BUTANE ISO	CH ₃ CH ₂ CH ₂ CH ₃	1.990
CARBON DIOXIDE	CO ₂	1.517
CARBON MONOXIDE	CO	.967
CHLORINE	Cl ₂	2.452
ETHANE	C ₂ H ₆	1.026
HELIUM	He	.138
HYDROGEN	H ₂	.072
METHANE	CH ₄	.553
NATURAL GAS		.605
(Approx. Avg.)		
NITRIC OXIDE	NO	1.000
NITROGEN	N ₂	.968
NITROUS OXIDE	N ₂ O	1.514
OXYGEN	O ₂	1.103
PROPANE	C ₃ H ₈	1.550
SULFUR DIOXIDE	SO ₂	2.209

FLOW EQUIVALENTS			
1 Cu. Ft./hr.		1 Cu. Ft./Min.	
0166	Cu. Ft./Min.	60	Cu. Ft./Min.
4719	LPM	100000	Cu. Ft./Min.
28316	LPM	100000	Cu. Ft./Min.
471947	CC/Min.	100000	Cu. Ft./Min.
28317	CC/Min.	100000	Cu. Ft./Min.
1247	Gal/Min.	100000	Cu. Ft./Min.
7.48	Gal/Min.	100000	Cu. Ft./Min.
1 LPM		1 Gal/Min.	
60	LPM	100000	Gal/Min.
3785	Cu. Ft./Min.	100000	Gal/Min.
21189	Cu. Ft./Min.	100000	Gal/Min.
1000	L/Min.	100000	Gal/Min.
60000	CC/Min.	100000	Gal/Min.
254	Gal/Min.	100000	Gal/Min.
15.83	Gal/Min.	100000	Gal/Min.
1 LPM		1 Gal/Min.	
60	LPM	100000	Gal/Min.
3785	Cu. Ft./Min.	100000	Gal/Min.
21189	Cu. Ft./Min.	100000	Gal/Min.
1000	L/Min.	100000	Gal/Min.
60000	CC/Min.	100000	Gal/Min.
254	Gal/Min.	100000	Gal/Min.
15.83	Gal/Min.	100000	Gal/Min.

Anexo C – Parâmetros para cálculo de reações químicas

Table S.1 Single-step reaction rate parameters for use with Eqn. 5.2 (Adapted from Ref. [6])

Fuel	Pre-exponential Factor, A^a	Activation Temperature, E_a/R_u (K)	m	n
CH_4	$1.3 \cdot 10^5$	24,358 ^b	-0.3	1.3
CH_2	$8.3 \cdot 10^5$	15,098 ^c	-0.3	1.3
C_2H_2	$1.1 \cdot 10^{12}$	15,098	0.1	1.65
C_3H_4	$8.6 \cdot 10^{11}$	15,098	0.1	1.65
C_4H_{10}	$7.4 \cdot 10^{11}$	15,098	0.15	1.6
C_4H_{12}	$6.4 \cdot 10^{11}$	15,098	0.25	1.5
C_5H_{12}	$5.7 \cdot 10^{11}$	15,098	0.25	1.5
C_5H_{16}	$5.1 \cdot 10^{11}$	15,098	0.25	1.5
C_6H_{18}	$4.6 \cdot 10^{11}$	15,098	0.25	1.5
C_6H_{18}	$7.2 \cdot 10^{12}$	20,131 ^d	0.25	1.5
C_6H_{20}	$4.2 \cdot 10^{11}$	15,098	0.25	1.5
$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	$3.8 \cdot 10^{11}$	15,098	0.25	1.5
CH_3OH	$3.2 \cdot 10^{12}$	15,098	0.25	1.5
$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$1.5 \cdot 10^{12}$	15,098	0.15	1.6
C_6H_6	$2.0 \cdot 10^{11}$	15,098	-0.1	1.85
C_7H_8	$1.6 \cdot 10^{11}$	15,098	-0.1	1.85
C_7H_8	$2.0 \cdot 10^{12}$	15,098	0.1	1.65
C_7H_8	$4.2 \cdot 10^{11}$	15,098	-0.1	1.85
C_7H_8	$6.5 \cdot 10^{12}$	15,098	0.5	1.25

^aUnits of A are consistent with concentrations in Eqn. 5.2 expressed in units of gmol/cm^3 , i.e., $A = [\text{gmol}/\text{cm}^3]^{1-m-n}/\text{s}$.

^b $E_a = 48.4 \text{ kcal/gmol}$.

^c $E_a = 30.1 \text{ kcal/gmol}$.

^d $E_a = 40.1 \text{ kcal/gmol}$.