

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE CHAMA PLANA LAMINAR DE MISTURAS
METANO/AR E GÁS NATURAL/AR UTILIZANDO O MÉTODO DE FLUXO DE
CALOR

por

Fernando José Vinhas Sousa Coelho

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, abril de 2014

MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE CHAMA PLANA LAMINAR DE MISTURAS
METANO/AR E GÁS NATURAL/AR UTILIZANDO O MÉTODO DE FLUXO DE
CALOR

por

Fernando José Vinhas Sousa Coelho

Licenciado em Física

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Aprovada por:

Prof. Dr. Leonel Rincón Cancino UFSC

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Sérgio Viçosa Möller PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 25 de abril de 2014

Agradecimentos

À CAPES pelo Aporte.

À minha família pelo apoio e à Caren Fontella pelo suporte, carinho, compreensão.

RESUMO

A velocidade de queima laminar adiabática de reações de combustão é um parâmetro chave, relacionado à cinética química do combustível, a qual define características importantes como a forma e a faixa de estabilidade de uma chama. Nos últimos anos, um grande esforço vem sendo direcionado para a determinação precisa desse parâmetro para diferentes combustíveis, porém a grande diversidade de técnicas e metodologias de medição existente acarreta em uma grande dispersão entre os resultados encontrados na literatura. Dentre as várias técnicas disponíveis, o método do fluxo de calor destaca-se por fornecer medidas de velocidade de chama adiabática com boa precisão. O método, diferentemente dos demais existentes, não depende de extrapolações e é capaz de obter chamas aproximadamente adiabáticas. Neste estudo, foi construída uma bancada de trabalho baseada no método do fluxo de calor com a finalidade de medir a velocidade de chama plana laminar adiabática de diferentes misturas entre combustível e comburente. Foram realizadas medições para pré-misturas metano/ar e gás natural/ar em diferentes razões de equivalência (0,65 a 1,5) para a temperatura de 298 K e pressão atmosférica. Uma análise das possíveis fontes de erro é apresentada utilizando-se 95 % de intervalo de confiança, resultando em uma incerteza de 2,8 % para a pré mistura estequiométrica metano/ar para a qual a velocidade de chama encontrada foi de 35,4 cm/s. Nas mesmas condições, para a mistura gás natural/ar foi obtido o resultado de 34,8 cm/s, para a proporção estequiométrica com uma incerteza de 3,1 %. O experimento apresenta incertezas de medição tanto maiores quanto mais afastadas da condição estequiométrica a chama se apresenta, chegando a 20 % para chamas ricas com razão de equivalência 1,5. As medições obtidas para diferentes razões de equivalência mostram-se de acordo com os resultados encontrados na literatura, apresentando valor absoluto e de incertezas dentro dos padrões do método.

Palavras-chave: Velocidade de chama; fluxo de calor; pré mistura, metano, gás natural.

ABSTRACT

The adiabatic laminar burning velocity of a fuel/oxidant mixture is a key parameter in combustion. It defines important flame characteristics like its shape and stability range. In the last years, a great effort has been employed on the precise determination of this parameter for different fuels. The diversity of techniques and extrapolation methods for achieving adiabatic flame data results in the large scatter found in literature. Among various techniques available, the heat flux method is known to provide adiabatic burning velocity measurements with good accuracy. The method does not depend on extrapolations and is able to produce flames that closely reach the adiabatic condition. In this study, a workbench was built based on the heat flux method aiming at measuring the adiabatic laminar flame velocity of different fuel and oxidant mixtures. Data were obtained for methane/air and natural gas/air mixtures for different equivalence ratios (0.65 to 1.5) at 298 K and 1 atm. An analysis of possible error sources is also presented using 95% of confidence interval. For a stoichiometric methane/air mixture the flame speed was found to be 35.4 cm/s with 2.8% of uncertainty. Under the same conditions, for a stoichiometric natural gas/air mixture the value obtained was 34.8 cm/s with an uncertainty of 3.1%. The experiment shows that the uncertainties increase as the premixture deviates from the stoichiometric condition, reaching 20% for an equivalence ratio of 1.5. The measurements obtained for different equivalence ratios are consistent with results found in the literature and with acceptable uncertainties for the method.

Keywords: Flame velocity; heat flux method; methane; natural gas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Apresentação	1
1.2	Objetivos.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Conceitos Básicos.....	3
2.1.1	Velocidade de chama plana laminar	3
2.1.2	Razão de Equivalência.....	4
2.2	Técnicas de Medição de velocidade de chama plana	4
2.2.1	Queimador de Jatos Opostos	4
2.2.2	Queimador Tipo Bunsen.....	6
2.2.3	Queimador de chama plana.....	7
2.2.4	Método da Câmara Fechada	8
2.3	Método do Fluxo de Calor.....	9
2.3.1	Introdução	9
2.3.2	Fundamentação Teórica do Método	11
2.3.2.1	Solução para a Temperatura na Placa.....	11
2.3.3	Medição Típica de Velocidade de Chama	13
2.3.4	Vantagens e Desvantagens	14
3	EXPERIMENTO	16
3.1	Bancada de Testes	16
3.1.1	Sistema de Alimentação	17
3.1.2	Controladores de Vazão.....	17
3.1.3	Sistemas de Arrefecimento	18
3.1.4	Termopares e Aquisição dos Dados.....	18
3.1.5	Queimador	19
3.1.5.1	Cabeçote	21
3.1.5.2	Câmara de Pré Mistura (plenum)	23
3.1.5.3	Placa Perfurada	24
3.2	Procedimentos de Obtenção dos Resultados.	27
4	ANÁLISE DOS DADOS E ESTIMATIVAS DE INCERTEZAS	31
5	RESULTADOS	40
5.1	Pré Mistura Metano/Ar.....	40
5.2	Pré Mistura Gás Natural/Ar.....	44
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	48

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICE A - Análise de erro	55
APÊNDICE B – Fator de Conversão nos Medidores de Vazão	57
APÊNDICE C - Constante Geométrica.....	58
APÊNDICE D - Dados Tabulados	59
D.1 – Velocidade de Chama Laminar Adiabática SL° Para Metano/Ar	59
D. 2 – Velocidade de Chama Laminar Adiabática SL° Para Gás Natural/Ar	60
D. 3 – Medidas de temperatura dos gases não queimados	60
APÊNDICE E – Foto da Bancada Experimental	61
APÊNDICE F – Desenhos do Queimador	62
F.1 - Cabeçote.....	62
F.2 - Plenum	68
F.3 - Tampa Inferior	70
F.4 - Placa Perfurada	71
F.5 - Queimador.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Chama unidimensional de propagação livre onde V é a velocidade de entrada dos reagentes e S_L a velocidade da frente de combustão na direção dos gases de entrada.....	3
Figura 1.2	Desenho esquemático da configuração dos bicos de injeção da pré-mistura para o método dos jatos opostos	5
Figura 2.3	Fotografia de uma chama estabilizada em um queimador tipo Bunsen (esquerda). Exemplo de uma imagem obtida com a técnica de Schlieren (direita) [adaptado de Bouvet et al, 2011]	6
Figura 2.4	Imagem de um queimador de chama plana (esquerda) e sua respectiva representação em corte transversal (direita). [Adaptado de http://www.flatflame.com/bronze.htm]	8
Figura 2.5	Evolução de uma frente de chama em um reator de volume constante utilizando a técnica shadowgraf [Adaptado de Pasinejad, 2005]	9
Figura 2.6	Representação esquemática do queimador utilizado no método do fluxo de calor.....	10
Figura 2.7	Representação esquemática em perspectiva da placa perfurada do queimador (esquerda) e configuração da simetria e sistema de coordenadas utilizado para a análise do perfil de temperatura	12
Figura 2.8	(a) Diferentes perfis de temperatura medidos para uma mistura de metano e ar com $\phi = 1,5$ para diferentes velocidades dos reagentes e (b) coeficientes parabólicos referentes às curvas de ajuste em função das velocidades dos reagentes	14
Figura 3.1	Representação esquemática da bancada experimental.....	16
Figura 3.2	Representação em perspectiva 3D do queimador (esquerda) e corte transversal evidenciando suas partes internas (direita) com cada cor representando uma peça distinta	19
Figura 3.3	(a e b) Fotos do queimador montado sobre a base de apoio e (c) da configuração final com os termopares, as linhas de gás e de arrefecimento acopladas ao queimador	20
Figura 3.4	Representação tridimensional da modelagem do queimador.....	21
Figura 3.5	Esquema do fluxo de calor entre a chama, a placa perfurada e os gases não queimados. A chama atinge a condição adiabática quando todo o calor perdido	

	por ela é transmitido para os gases não queimados devido ao fato de a placa não possuir gradiente radial de temperatura. Temperaturas típicas são mostradas	22
Figura 3.6	Foto da parte externa (esquerda) e interna (direita) do cabeçote. A foto da direita mostra também os termopares já encaixados na placa perfurada, passando pelos orifícios da parte inferior do cabeçote	23
Figura 3.7	(a) Representação da placa e do padrão de perfuração hexagonal seguido na fabricação e (b) foto da placa perfurada	25
Figura 3.8	(a) Posição dos termopares (círculos vermelhos) fixados a placa e (b) posição radial dos termopares, em milímetros a partir do centro da placa	26
Figura 3.9	Esquema de fixação dos termopares na placa perfurada. A placa é usinada com furos não passantes e com diâmetros reduzidos (~0,2 mm) exatamente na posição onde deveria haver uma perfuração na placa. Devido as dimensões aproximadas entre o termopar e o orifício, a fixação ocorre sem o uso de substancias entre a junta fria e a parede da placa.....	27
Figura 3.10	(a) Chama plana e (b) visivelmente não plana para a razão estequiométrica de metano e ar. A perda da condição plana ocorre devido ao aumento da vazão dos gases reagentes	30
Figura 4.1	Medidas de temperatura em função da posição radial dos termopares para diferentes velocidades de chama para a razão estequiométrica. Nota-se uma significativa variação entre os dados obtidos e a curva ajustada	31
Figura 4.2	Gráfico do coeficiente parabólico α em função das velocidades de chama S_L medidas para $\phi = 1$ para uma mistura entre metano e ar. A velocidade de chama plana adiabática $S_L^\circ = 35,6$ cm/s é encontrada para $\alpha = 0$	32
Figura 4.3	Medidas de temperatura em função da posição radial dos termopares para diferentes velocidades de chama para a $\phi = 0,65$	33
Figura 4.4	Diferenças de temperatura ΔT_s em função de α . As retas ajustadas aos pontos fornecem os parâmetros necessários para a correção dos valores de temperatura medidos. A flutuação observada em torno da reta representa erros aleatórios associados aos termopares	34
Figura 4.5	(a) Medidas de temperatura corrigidas para $\phi = 0,65$ e (b) $\phi = 1$. Pode-se perceber que para a razão estequiométrica a dispersão nos valores foi praticamente eliminada, no entanto, as diferenças permanecem para misturas muito ricas e muito pobres	35
Figura 4.6	Estimativa do erro no coeficiente parabólico. As duas situações extremas acima representam as curvas que ainda seriam aceitáveis em uma situação onde os	

	termopares deveriam marcar a mesma temperatura T_{tp} , representada pelos pontos pretos	36
Figura 4.7	Incerteza nas medições de velocidade de chama $\sigma_1(S_L^\circ)$ em cm/s em função da razão de equivalência ϕ para pré misturas de metano e ar (azul) e gás natural e ar (vermelho).....	38
Figura 5.1	Valores obtidos para a velocidade de chama plana adiabática S_L° (cm/s) em função da razão de equivalência ϕ para a pré mistura metano/ar na temperatura inicial de 298 K. $S_L^\circ = 35,4$ cm/s para $\phi = 1$	42
Figura 5.2	Medições recentes de velocidade de chama plana laminar adiabática S_L° (Bosschaart e de Goey, 2004; Hermanns et. al, 2010; Rau, http://cms.heatfluxburner.org/ ; Gowami et. al, 2013) em função da razão de equivalência ϕ , comparadas com as obtidas no presente trabalho	43
Figura 5.3	Fotos representativas de chamas obtidas para diferentes razões de equivalência	44
Figura 5.3	Medidas da velocidade de chama laminar adiabática em função da razão de equivalência para a pré mistura gás natural/ar na temperatura inicial de 298 K. Velocidade máxima $S_L^\circ = 37,2 \pm 1,1$ cm/s para $\phi = 1,1$. Para a razão estequiométrica $\phi = 1$ o valor encontrado foi $S_L^\circ = 34,8 \pm 1,1$ cm/s.....	45
Figura 5.4	Comparação da velocidade de chama laminar adiabática em função da razão de equivalência entre metano e gás natural. Diferença média de aproximadamente 1 cm/s para ϕ entre 0,75 e 1. Para ϕ de 1,1 à 1,5 diferença média de 4,5 cm/s	46
Figura A.1	Fotografia da bancada de trabalho evidenciando (a) os controladores/medidores de vazão, (b) os banhos termostáticos, (c) o queimador e a base de apoio (c) e (d) a capela que compõem a bancada	61
Figura F.1	Parte superior do cabeçote - vista de cima (desenho 1)	62
Figura F.2	Seção transversal E-E referente a parte superior do cabeçote	63
Figura F.3	Parte superior do cabeçote – vista de cima (desenho 2)	63
Figura F.4	Seção transversal D-D referente a parte superior do cabeçote	64
Figura F.5	Vistas em perspectiva de (a) cima e (b) de baixo da parte superior do cabeçote	64
Figura F.6	Parte inferior do cabeçote – vista de cima	65
Figura F.7	Seção transversal E-E referente a parte inferior do cabeçote	65
Figura F.8	Parte inferior do cabeçote – vista de lado	66

Figura F.9	Seção transversal D-D referente a parte inferior do cabeçote evidenciando os orifícios de entrada dos termopares	66
Figura F.10	Peça de material termicamente isolante vista de cima (esquerda) e de lado (direita).....	67
Figura F.11	Seção transversal A-A referente a peça de material isolante.....	67
Figura F.12	Tubo interno do plenum – (a) vista de lado, (b) de baixo e (c) em perspectiva	68
Figura F.13	(a e b)Tubo externo do plenum vistas de lados opostos, (c) vista de baixo e (d) vista em perspectiva	69
Figura F.14	Tampa inferior do queimador – vista da parte interna.....	70
Figura F.15	Seção transversal A-A da tampa inferior do queimador	70
Figura F.16	Placa perfurada – vista frontal (esquerda) e lateral (direita).....	71
Figura F.17	Corte transversal em vista explodida do queimador	72
Figura F.18	Vista explodida, em perspectiva, do queimador	73
Figura F.19	(a) Vista superior, (b) corte transversal A-A, (c) vista lateral e (d) vista em perspectiva do queimador	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.	Médias de temperaturas de cada termopar ($^{\circ}\text{C}$) para diferentes velocidades de chama em uma mesma razão de equivalência ($\phi = 1$). T1 representa o termopar mais próximo do centro e T7 o mais afastado.	29
Tabela 3.2	Composição média para o gás natural da Bolívia.	30
Tabela 5.1	Valores de velocidade de chama adiabática de metano e ar na razão estequiométrica encontrados na literatura e em ordem cronologia de obtenção.	41
Tabela A.1	Relação entre o intervalo da variável e a probabilidade de encontrar a medida dentro do intervalo.	55
Tabela D.1.1	Velocidade de chama laminar adiabática para a pré mistura metano/ar para diferentes razões de equivalência com as respectivas incertezas experimentais.	59
Tabela D.2.1	Velocidade de chama laminar adiabática para a pré mistura gás natural/ar para diferentes razões de equivalência com as respectivas incertezas experimentais.	60
Tabela D.3.1	Medidas da temperatura ambiente T_{amb} , da temperatura do banho térmico $T_{\text{b},1}$ (referente ao banho conectado a câmara de pré mistura), e da temperatura dos gases não queimados T_{u} , referentes a quatro medições realizadas em dias diferentes.	60

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GN	Gás Natural
LDA	Laser Doppler Anemometry
LDV	Laser Doppler Velocimetry
PIV	Particle Image Velocimetry
PFA	Perfluoralcoxi
PROMECC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PTFE	Politetrafluoretileno
Vol.	Volume
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
1D	Unidimensional
3D	Tridimensional

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Número de moles de ar
a_s	Número de moles de ar para uma mistura estequiométrica
A	Área de saída do queimador, m^2
A_c	Área de chama, m^2
c_p	Calor específico, $J/kg \cdot K$
F	Fator de conversão
h	Espessura da placa, m
k	Taxa de estiramento, m^2/s
m_{fu}	Massa de combustível, kg
m_{ox}	Massa de oxidante, kg
N_i	Número de moles da espécie i
N_{tot}	Número total de moles
\dot{Q}	Vazão volumétrica, m^3/s
q	Fluxo de calor, W
r	Posição radial, m
r_{max}	Raio máximo, m
s	Sensibilidade, $K/m^2 (m/s)^{-1}$
S_L°	Velocidade de chama laminar adiabática, m/s
S_L	Velocidade de chama laminar, m/s
S_u	Velocidade de chama, m/s
T_c	Temperatura no centro da placa, K
T_m	Temperatura medida, K
T_F	Temperatura dada pelo polinômio de ajuste, K
T_g	Temperatura dos reagentes, K
T_p	Temperatura da placa perfurada, K
\bar{T}_p	Temperatura média da placa, K
T_{tp}	Temperatura medida pelo termopar central, K
V	Velocidade dos reagentes, m/s

x	Posição axial, m
X_i	Fração molar da espécie i

SÍMBOLOS GREGOS

α	Coeficiente parabólico, K/m^2
ΔT_s	Diferenças sistemáticas de temperatura, K
ΔT_a	Diferenças residuais aleatórias de temperatura, K
ϕ	Razão de equivalência
γ	Coeficiente volumétrico de transferência de calor, $W/K \cdot m^3$
λ_p	Condutividade da placa, $W/K \cdot m$
$\lambda_{p,r}$	Condutividade na direção radial, $W/K \cdot m$
$\lambda_{p,x}$	Condutividade na direção axial, $W/K \cdot m$
ρ_u	Massa específica dos gases não queimados, kg/m^3
σ	Desvio padrão
σ_α	Incerteza no coeficiente parabólico, K/m^2
$\sigma(\phi)$	Incerteza na razão de equivalência
$\sigma(S_L)$	Incerteza na velocidade de chama plana, m/s
σ_1	Incerteza na velocidade de chama laminar adiabática devido às diferenças de temperatura, m/s
σ_2	Incerteza na velocidade de chama laminar adiabática devido aos instrumentos, m/s

1 INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação

O Balanço Energético Nacional 2011 (EPE 2011) mostra que cerca de 80 % da oferta interna de energia em 2010 é originada a partir de recursos naturais que dependem de processos de combustão para o seu uso, tendo o petróleo como a principal fonte de combustível. A inevitável redução de reservas naturais de combustíveis fósseis gera um crescente interesse em fontes alternativas, sobretudo as renováveis como o gás de gaseificação de biomassa (também conhecido como gás de síntese - *syngas*) e o biogás. Gases residuais de processos industriais também são de grande interesse, como é o caso do gás residual de refinaria.

Uma ampla variedade de matérias-primas e processos origina uma vasta gama de composições e propriedades. Diante desse cenário, é de vital importância o uso racional e econômico das muitas formas de energia disponíveis, bem como a garantia de um desempenho adequado de equipamentos de combustão, reduzindo as emissões de poluentes atmosféricos e, conseqüentemente, os efeitos ambientais desses processos. Assim, existe uma crescente demanda de equipamentos de combustão flexíveis, economicamente viáveis, energeticamente eficientes e com menores emissões de poluentes. Para isso, o estudo e controle dos parâmetros de combustão é uma necessidade.

A velocidade de chama plana adiabática (S_L°) é uma característica fundamental do processo de combustão. Muitas características importantes de chamas pré-misturadas como a forma da chama, a faixa de estabilidade e os fenômenos de retorno (*flashback*) e descolamento (*blow-out*) de chama estão relacionados com a velocidade da chama. Esse parâmetro, juntamente com a temperatura de chama adiabática, é uma característica única de cada mistura combustível/comburente. Por esse motivo, a velocidade de chama também desempenha um importante papel como dado de referência em simulações computacionais. Mecanismos cinéticos detalhados ou globais devem ser capazes de reproduzir S_L° dentro das suas faixas de validação.

A gama de combustíveis alternativos disponíveis ou em desenvolvimento, em geral apresentando grande variação nas suas composições químicas, renovou o interesse por métodos de medição de velocidade de chama. Um grande esforço para obter dados confiáveis

de velocidade de chamas planas adiabáticas vem sendo despedido nos últimos anos, com o objetivo principal de testar e ajustar os mecanismos cinéticos disponíveis.

As diversas técnicas existentes para a medição de S_L° , assim como as inúmeras variações nas montagens das bancadas experimentais encontradas na literatura resultam em uma dispersão significativa no valor da velocidade de chama. Muitas dessas técnicas de medição exigem correções e extrapolações, gerando importantes incertezas experimentais nos resultados. Dentre as diversas técnicas empregadas, o método do fluxo de calor [*heat flux method* – Van Maaren et. al., 1994, Bosschaart e de Goey, 2003] destaca-se por produzir dados onde tais correções não se fazem necessárias.

O presente trabalho vai explorar diversos aspectos do método do fluxo de calor para medição de velocidade de chama plana laminar. Especial atenção será dada à estimativa das incertezas de medição da bancada de teste construída. Chamas pré-misturadas de metano e ar em condições atmosféricas serão usadas como referência para a validação da montagem experimental. Por fim, a velocidade de chama de misturas de gás natural e ar, também em condições atmosférica, será estudada.

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é construir e validar uma bancada para medição da velocidade de chama plana laminar adiabática utilizando o método do fluxo de calor.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Construir e instrumentar uma bancada de testes para medição de velocidade de chama plana laminar adiabática utilizando o método do fluxo de calor.
- Validar a bancada, comparando os resultados obtidos para chamas de pré-mistura entre metano e ar frente aos encontrados na literatura.
- Determinar as incertezas de medição do método.
- Medir a velocidade de chama plana laminar adiabática para pré-misturas de gás natural e ar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Conceitos Básicos

2.1.1. Velocidade de chama plana laminar

A velocidade de chama plana laminar é definida para uma situação unidimensional (1D) - de acordo com Coelho e Costa, 2007 e Law e Sung, 2000 - como a velocidade com a qual os reagentes se movem na direção perpendicular em relação à frente de chama. A Figura 2.1 representa uma mistura de combustível e oxidante, que entra no sistema no lado dos gases não queimados com certa velocidade V .

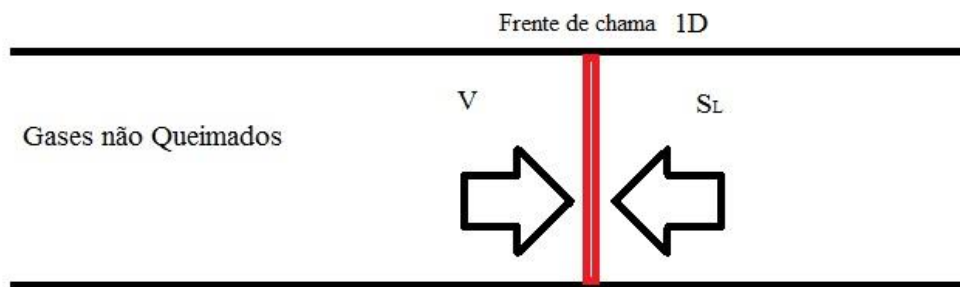


Figura 2.1- Chama unidimensional de propagação livre onde V é a velocidade de entrada dos reagentes e S_L a velocidade da frente de combustão na direção dos gases de entrada

A frente de chama, região onde ocorrem as reações de combustão, se propaga com certa velocidade S_L paralela aos gases de entrada. A chama permanecerá em uma posição fixa no espaço, ou seja, caracterizará uma chama estabilizada, apenas quando a velocidade de entrada V dos reagentes for igual à velocidade da frente de chama S_L caracterizando-se como a velocidade de queima laminar da mistura. Nessa situação S_L é obtida por

$$S_L = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2.1)$$

Onde \dot{Q} é a vazão volumétrica dos reagentes e A a área da seção transversal por onde os gases escoem. Em uma situação de perda de calor zero, quando todo o calor gerado pelas reações químicas é completamente transferido para a mistura de gases não queimados, é

caracterizada uma chama adiabática onde S_L° é a velocidade de chama laminar adiabática. A velocidade da chama para uma dada composição de gases depende das condições iniciais da mistura (temperatura dos gases não queimados, pressão e a razão de equivalência ϕ).

2.1.2. Razão de Equivalência

A razão de equivalência de uma dada mistura é dada por

$$\phi = \frac{\frac{m_{fu}}{m_{ox}}}{\left(\frac{m_{fu}}{m_{ox}}\right)_s} \quad (2.2)$$

onde m_{fu} é a massa de combustível e m_{ox} é a massa de oxidante. O subscrito "s" refere-se à proporção estequiométrica, que é caracterizada por ter a quantidade exata de oxidante necessária para a combustão completa do combustível. Uma mistura de gases onde $\phi < 1$ é chamada de uma mistura pobre, e é caracterizada pelo excesso de ar, enquanto que uma mistura com $\phi > 1$ é chamada de mistura rica, com combustível em excesso. Uma razão de equivalência igual a 1 significa uma proporção estequiométrica de combustível e ar.

2.2. Técnicas de Medição de velocidade de chama plana

Esta seção é dedicada a uma breve apresentação de alguns métodos experimentais já consagrados para a obtenção de velocidade de chama, discutindo vantagens e desvantagens dos mesmos. São eles: queimador de bunsen, queimador de chama plana, queimador de jatos opostos e reator a volume constante. Por fim, uma atenção maior é dada para a descrição do método do fluxo de calor onde são apresentadas as fundamentações teóricas em que se baseiam a técnica bem como uma breve descrição do queimador utilizado.

2.2.1. Queimador de Jatos Opostos

O método de medição de velocidades de chama por jatos opostos, também conhecido como *counterflow*, baseia-se na estabilização da chama entre dois jatos opostos de misturas de combustível e comburente como se mostra esquematicamente na Figura 2.2. Duas chamas

pré-misturadas se estabilizam entre os injetores e um plano de estagnação se forma entre eles. A velocidade de chama é igual à velocidade do escoamento imediatamente à montante do ponto em que se observa a expansão dos gases devido à chama. Essa velocidade é obtida por técnicas não intrusivas como LDA (*Laser Doppler Anemometry*) ou LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) [Dong et. al, 2002; van Maaren e de Goey, 1994b].

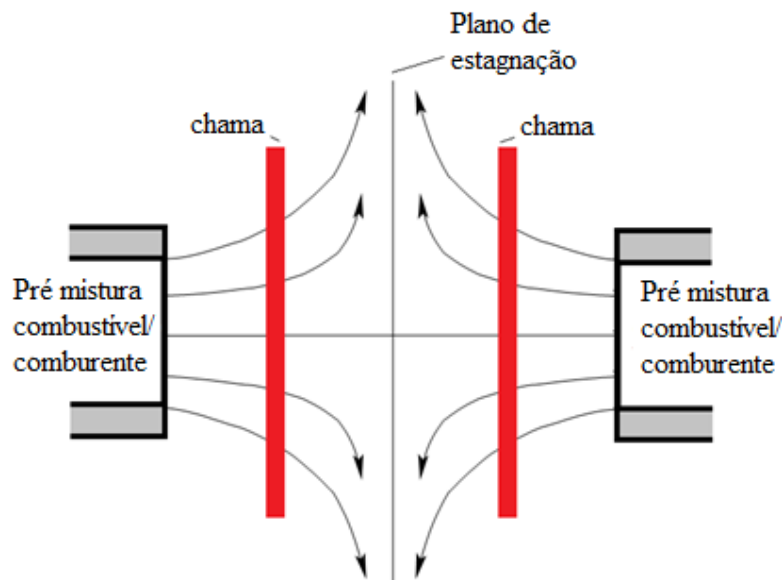


Figura 1.2 - Desenho esquemático da configuração dos bicos de injeção da pré-mistura para o método dos jatos opostos

Como pode ser visto, as linhas de corrente não são perpendiculares à frente de chama. Com isso, a zona de reação sofre uma deformação denominada taxa de estiramento (k) de chama que, segundo Law, 2006, é uma taxa normalizada de deformação da área da chama causada por não uniformidades no escoamento, curvatura da chama e efeitos transientes na chama ou no escoamento e é proporcional à componente do escoamento tangencial à frente de chama. Ainda segundo Law, é possível avaliar essas influências através da relação

$$k = \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \quad (2.3)$$

onde A é a área da chama. A taxa de estiramento da chama pode ser controlada pelo ajuste da vazão da mistura ar combustível bem como pela variação da distância entre os bicos injetores. Experimentalmente repete-se o método para diferentes taxas de estiramento e a velocidade de

chama é obtida extrapolando-se os resultados para taxa de estiramento nulo (mais detalhes sobre o efeito do estiramento na velocidade de chama podem ser encontrados em Law, 2006).

Ao contrário da maioria dos métodos, a chama estabilizada por essa técnica não sofre nenhuma perda de calor, pois não há contato direto da chama com as paredes do queimador. A condição de simetria no plano de estagnação também implica em perda de calor nula nesta direção. Porém, a necessidade de extrapolar a curva acrescenta imprecisão ao método e, além disso, este apresenta alta sensibilidade para diferentes modelos de extrapolação [Davis e Searby, 2002].

2.2.2. Queimador Tipo Bunsen

A característica principal de uma chama estabilizada em um bico de Bunsen é seu formato cônico [Young He, 2011] que pode ser conferido na Figura 2.3. A mistura entre combustível e comburente é injetada junto à base do queimador e dirigida por um tubo cilíndrico até o bocal onde ocorre a queima.

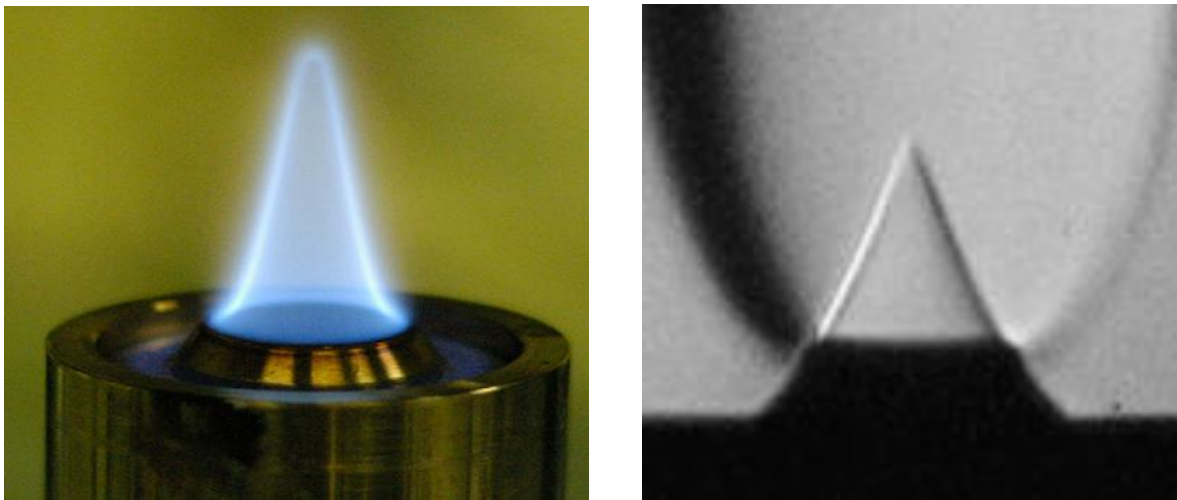


Figura 2.3 - Fotografia de uma chama estabilizada em um queimador tipo Bunsen (esquerda). Exemplo de uma imagem obtida com a técnica de Schlieren (direita) [adaptado de Bouvet et al., 2011]

Após a estabilização de uma chama em um bico de Bunsen, assumindo que a velocidade de combustão é a mesma ao longo de toda a área da superfície da chama, a velocidade da chama S_u pode ser obtida em função da vazão e da área [Bouvet et. al., 2011] aplicando-se o equilíbrio de conservação de massa conforme

$$\rho_u S_u A_c = \rho_u \dot{Q} \quad (2.4)$$

onde ρ_u é a massa específica do gás não queimado e \dot{Q} a vazão volumétrica total da mistura não queimada. Este método requer que a área total da superfície da chama A_c seja determinada com precisão, residindo aí a maior dificuldade do método. Essa determinação é feita por análise de imagem onde métodos do tipo *shadowgraph* e *schlieren* (Parsinejad, 2005) são empregados para obter uma melhor definição da frente de chama. Assim, a escolha da área de superfície e conseqüentemente o valor da velocidade medida estão claramente condicionadas pelo método óptico que é utilizado.

Como mostrado por Echehki e Mungal, 1990, outra dificuldade do método é que a taxa de queima de uma chama de Bunsen é, por natureza, não constante sobre toda a superfície da chama, pois ocorrem perdas de calor próximas às paredes do queimador e efeitos de estiramento no ápice do cone de chama.

A simplicidade das equações que envolvem o método, que utiliza o queimador de Bunsen, evidencia a facilidade na obtenção da velocidade de chama conforme citado em Coelho e Costa, 2007. Além disso, é um equipamento simples e possui facilidade para se adaptar a diferentes pressões e temperaturas. Entretanto, existe uma grande dificuldade em se obter resultados precisos a partir do método uma vez que, conforme mostrado por Kuo, 2005, medições da área da chama podem variar até 10% dependendo da técnica de medição empregada.

2.2.3. Queimador de chama plana

Em um queimador convencional de chama plana, após a ignição, a vazão da pré-mistura é ajustada para que a chama estabilize-se sobre um disco poroso. Logo, a velocidade de chama é determinada através do quociente entre a vazão volumétrica da mistura e a área da chama plana. Um problema, no entanto, é que a chama perde calor para o meio poroso, se afastando muito da condição adiabática.

Variações desse queimador podem incluir a estabilização da chama unidimensional em um disco de metal poroso arrefecido por um fluxo de água conforme o da Figura 2.4. Este arrefecimento adicional aproxima a chama do disco poroso. Botha e Spalding, 1954, mediram o aumento da temperatura da água do sistema de arrefecimento devido à transferência de calor a partir da chama. Uma dificuldade do método é justamente a quantificação desse aumento de temperatura uma vez que o mesmo apresenta variações muito pequenas [Kuo, 2005].

A fim de determinar a velocidade de queima de chamas planas laminares adiabáticas, várias medições são realizadas para diferentes taxas de transferência de calor. Os valores das velocidades são plotados contra as taxas de perda de calor da chama. A curva é então extrapolada para a situação de perda de calor zero para obter a velocidade de chama adiabática [Egolfopoulos et. al., 1989].

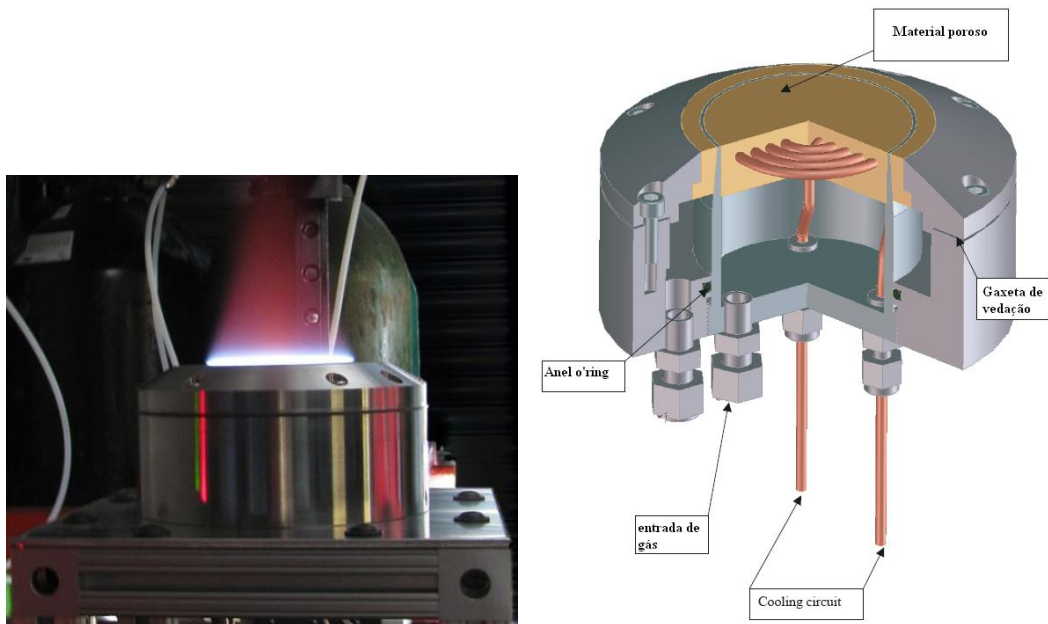


Figura 2.4 - Imagem de um queimador de chama plana (esquerda) e sua respectiva representação em corte transversal (direita) [Adaptado de <http://www.flatflame.com/bronze.htm>]

2.2.4. Método da Câmara Fechada

O método da câmara fechada (*closed vessel method*) também é geralmente chamado de "bomba de combustão". Ao contrário das outras técnicas aqui apresentadas, que produzem chamas estacionárias, a frente de chama se propaga no interior de um volume fechado que é preenchido com a mistura quiescente de combustível e oxidante. No interior dessa câmara, geralmente no centro, está um dispositivo de ignição que dá início às reações. Como pode ser visto na Figura 2.5, uma frente de chama esférica se propaga a partir do centro na direção das paredes do compartimento, queimando a mistura.

A velocidade de queima laminar pode agora ser determinada usando sistemas óticos de medição e sondas de pressão. Após correções para a expansão dos gases, a velocidade de chama laminar pode ser obtida por determinação do raio da chama como uma função do

tempo [Gu et. al., 2000 e Halter et. al., 2005]. Nota-se que nesta chama esférica em expansão os efeitos de estiramento de chama estão presentes e precisam ser corrigidos.

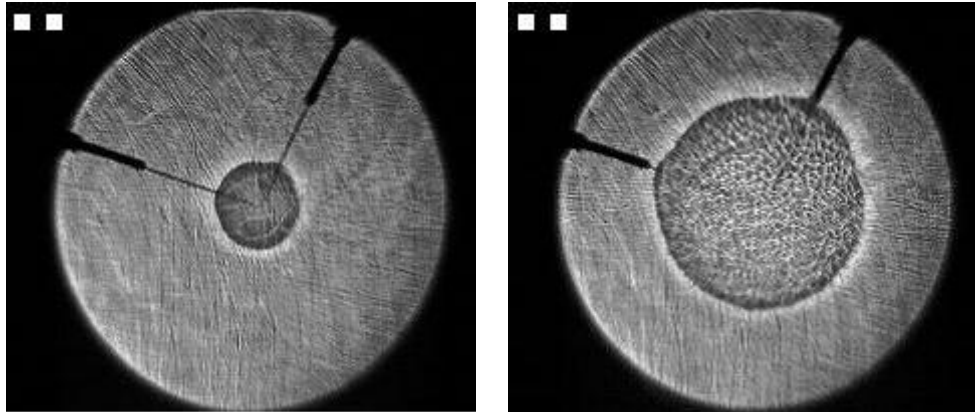


Figura 2.5 - Evolução de uma frente de chama em um reator de volume constante utilizando a técnica shadowgraf [Adaptado de Pasinejad, 2005]

Devido ao fato da queima ocorrer em um ambiente fechado, correções para o aumento da pressão devido ao aumento da temperatura precisam ser feitas quando a variação da pressão em função do tempo é utilizada para se obter o valor da velocidade de chama laminar.

2.3. Método do Fluxo de Calor

2.3.1. Introdução

O método de fluxo de calor é um aperfeiçoamento do queimador de chama plana mostrado por Botha e Spalding, 1954, e foi inicialmente introduzido por de Goey et. al., 1993. A ideia básica por trás do método é compensar a perda de calor, inerente à estabilização da chama sobre uma superfície, por um ganho de calor equivalente quando os reagentes escoam através do meio poroso sobre o qual a chama se estabiliza (no caso, uma placa metálica perfurada). Essa compensação é alcançada através do controle da vazão dos reagentes e da temperatura na borda da placa sobre a qual a chama se encontra. A medição da distribuição radial de temperaturas nessa placa revela quando a chama se aproxima de uma condição unidimensional. Assim como no método de chama plana convencional, a velocidade de chama é encontrada dividindo-se a vazão volumétrica dos reagentes pela área da chama.

A Figura 2.6 mostra um esquema do queimador usado no método. Trata-se de uma estrutura com uma chapa de metal perfurado na sua parte superior onde a chama se estabiliza.

A placa perfurada é montada em um cabeçote onde existe uma câmara por onde circula água aquecida (tipicamente a 358 K).

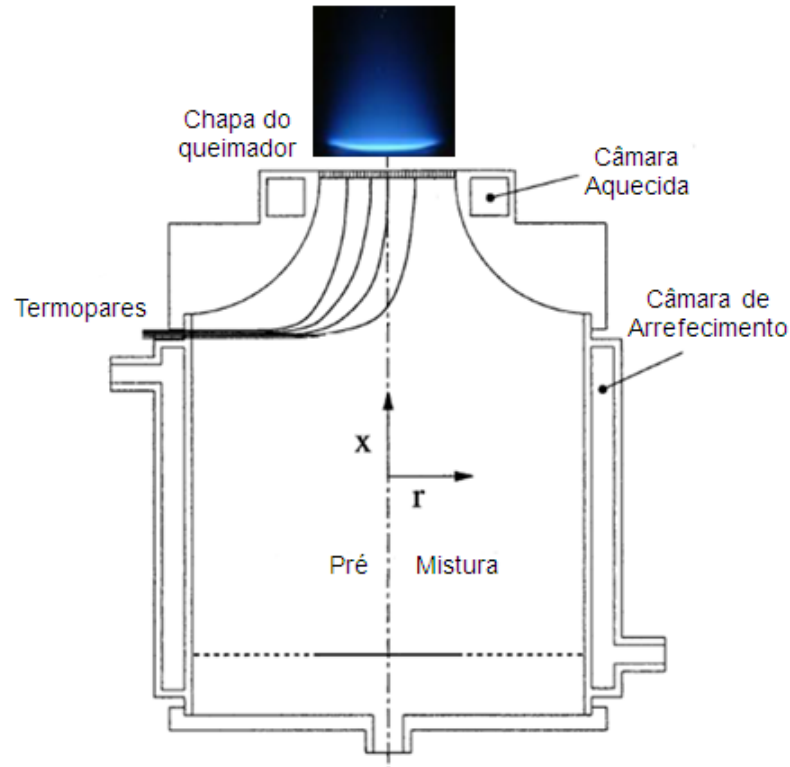


Figura 2.6 - Representação esquemática do queimador utilizado no método do fluxo de calor

O perfil radial de temperatura é medido ao longo da placa por meio de termopares devidamente fixados em alguns de seus orifícios. A borda da placa, por estar em contato com a câmara aquecida a uma temperatura controlada, gera um ponto fixo para as temperaturas nessa posição. Assim, quando se aumenta ou se diminui a velocidade dos reagentes, obtêm-se chamas com concavidade voltada respectivamente para baixo ou para cima. As temperaturas ao longo da direção radial, conseqüentemente, vão apresentar um perfil parabólico. Para velocidades pequenas a chama se aproxima da placa (chama com concavidade voltada para cima) e a temperatura central fica maior que a periférica. Para velocidades altas o oposto acontece, isto é, a chama se afasta da placa nas proximidades do seu centro (chama com concavidade voltada para baixo) e conseqüentemente as temperaturas nessa região diminuem.

A velocidade de chama adiabática é encontrada quando o coeficiente que representa a concavidade deste perfil parabólico de temperaturas é zero. Isso significa que o perfil de

temperaturas se tornou plano, pois não há gradiente radial de temperatura e, portanto, não há fluxo de calor radial na placa. Nessa situação, o calor perdido da chama para a placa é transferido para os gases não queimados – direção axial - configurando uma condição próxima da adiabática.

2.3.2. Fundamentação Teórica do Método

Nesta seção, a fundamentação teórica que respalda o método é apresentada. Primeiramente é encontrada uma solução analítica para o perfil de temperatura da placa e, logo a seguir, é evidenciada sua aplicação na obtenção de medidas típicas de velocidade de chama laminar adiabática. Por fim, algumas vantagens e desvantagens do método são avaliadas.

2.3.2.1. Solução para a Temperatura na Placa

Com o objetivo de encontrar a velocidade de chama adiabática deve-se, primeiramente, analisar o perfil de temperatura esperado na placa perfurada. Para tanto, uma solução analítica para a temperatura da placa do queimador é obtida para fins de interpretação das medições de temperatura encontradas.

Seguindo a formulação de Boschaart, 2002, e Hermans, 2007, considere um balanço específico de energia em coordenadas cilíndricas com simetria azimutal, conforme a Figura 2.7 em um volume de controle aplicado à placa perfurada com a chama estabilizada na sua parte superior e os gases escoando através dos orifícios. Tal situação pode ser representada por

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{p,r} r \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{p,x} \frac{\partial T_p}{\partial x} \right) = -\gamma (T_p - T_g) \quad (2.5)$$

onde T_p é a temperatura da placa perfurada, que depende da posição axial x e da posição radial r , T_g é a temperatura dos reagentes, que também dependente de x e r , $\lambda_{p,x}$ e $\lambda_{p,r}$ são as condutividades da placa nas direções axial e radial respectivamente e γ é o coeficiente volumétrico de transferência de calor entre o gás e a placa perfurada. Nesta equação o termo devido à radiação é negligenciado devido às baixas temperaturas da placa e do entorno.

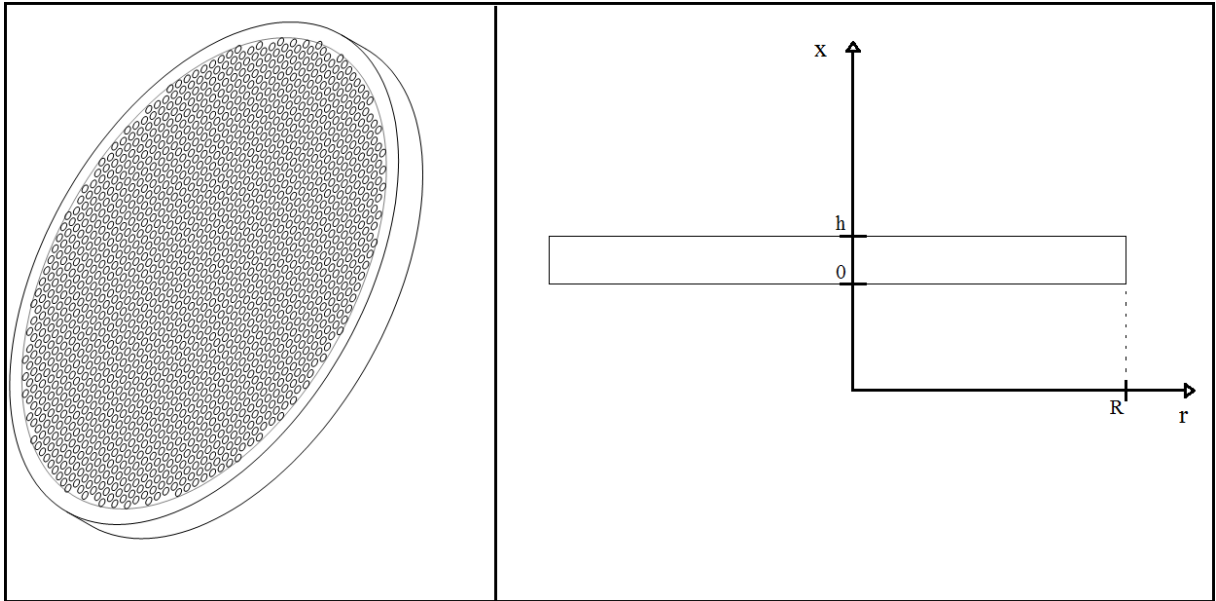


Figura 2.7 - Representação esquemática em perspectiva da placa perfurada do queimador (esquerda) e configuração da simetria e sistema de coordenadas utilizado para a análise do perfil de temperatura

A condutividade de calor na direção radial e axial são diferentes devido ao padrão de perfuração da placa do queimador. Introduzindo a temperatura média ao longo da espessura da placa de $x = 0$ até $x = h$ (sendo h a espessura da placa) obtém-se a seguinte expressão

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{p,r} r \frac{\partial}{\partial r} \int_0^h T_p dx \right) - \lambda_{p,x} \frac{\partial T_p}{\partial x} \Big|_{x=h} + \lambda_{p,x} \frac{\partial T_p}{\partial x} \Big|_{x=0} = - \int_0^h \gamma (T_p - T_g) dx \quad (2.6)$$

Reorganizando os termos pode-se escrever

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{p,r} r \frac{\partial}{\partial r} \int_0^h T_p dx \right) = - \int_0^h \gamma (T_p - T_g) dx + \lambda_{p,x} \frac{\partial T_p}{\partial x} \Big|_{x=h} - \lambda_{p,x} \frac{\partial T_p}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (2.7)$$

Pode-se agora definir $\bar{T}_p(r)$ como a temperatura média da placa conforme

$$\bar{T}_p = \frac{1}{h} \int_0^h T_p dx. \quad (2.8)$$

O lado direito da Equação 2.7 representa o fluxo de calor, ao qual pode-se denominar de $q(r)$, a partir do gás para a placa incluindo a perda de calor da chama para a placa em $x=h$ e a perda de calor da placa para o gás não queimado em $x=0$. Para o caso de uma chama

unidimensional, o fluxo de calor não depende da posição radial r , assim $q(r) = q$. Assim, pode-se reescrever a Equação 2.7 da seguinte maneira

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{p,r} r \frac{\partial \bar{T}_p}{\partial r} \right) = \frac{q}{h} \quad (2.9)$$

Assumindo que a condutividade $\lambda_{p,r}$ não depende da temperatura (ver apêndice 8.2) e, portanto, é constante em r ($\lambda_{p,r} = \lambda_p$), pode-se resolver a Equação 2.9 por separação de variáveis, aplicando a condição de contorno $\bar{T}_p(r=0) = T_c$ (a segunda condição de contorno está implícita na primeira já que impõe que a temperatura da placa tem que ser finita em $r = 0$), o que resulta em:

$$\bar{T}_p = T_c - \frac{q}{4\lambda_p h} r^2 \quad (2.10)$$

onde T_c é a temperatura no centro da placa. Pode-se perceber, conforme a Equação 2.10, que o perfil de temperatura da placa é uma parábola onde o coeficiente que determina a concavidade depende do fluxo de calor q .

2.3.3. Medição Típica de Velocidade de Chama

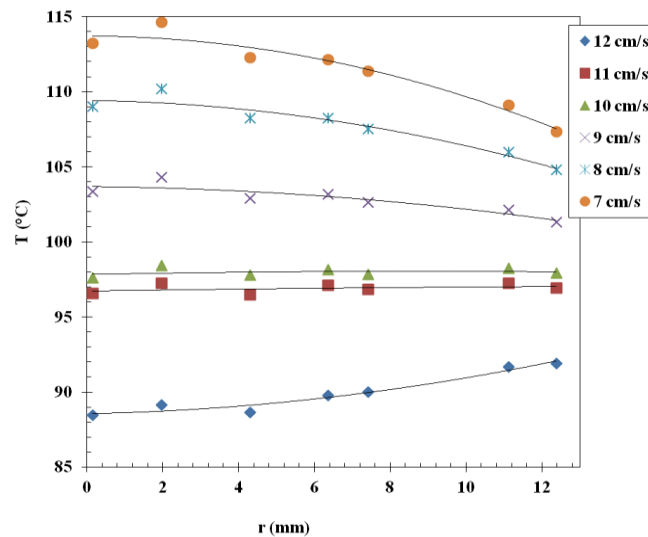
A fim de se determinar a velocidade de chama plana laminar adiabática em uma determinada razão de equivalência, registra-se os perfis de temperatura medidos pelos termopares na placa para diferentes velocidades dos reagentes. Os dados são então ajustados a uma curva de tendência que segue um polinômio de segunda ordem do tipo

$$\bar{T}_p = T_c - \alpha r^2, \quad (2.11)$$

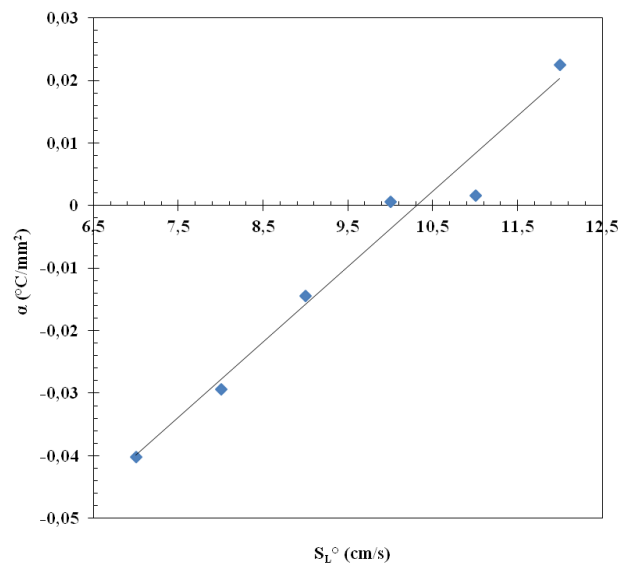
onde $\alpha = q/(4\lambda_p h)$, que representa o termo relacionado ao fluxo de calor na Equação 2.10, é determinado por ajuste à concavidade do perfil de temperatura.

A Figura 2.8a mostra, como exemplo, os perfis de temperatura e respectivas curvas de ajuste para uma chama estabilizada sobre o queimador com uma mistura de razão de equivalência $\phi = 1,5$ (rica) de metano e ar. Nota-se uma grande dispersão das temperaturas em torno da curva ajustada. Cada curva gera um coeficiente parabólico α diferente. Assim, os

valores do coeficiente parabólico α são plotados em função da velocidade de chama conforme mostra a Figura 2.8b. Uma curva de tendência linear é ajustada. A velocidade de chama plana laminar adiabática é encontrada pela intersecção dessa reta com o eixo das abscissas, ou seja, para $\alpha = 0$.



a)



b)

Figura 2.8 - (a) Diferentes perfis de temperatura medidos para uma mistura de metano e ar com $\phi = 1,5$ para diferentes velocidades dos reagentes e (b) coeficientes parabólicos referentes às curvas de ajuste em função das velocidades dos reagentes

2.3.4. Vantagens e Desvantagens

Segundo Van Mareen e de Goey, 1994, com esta configuração de queimador é possível criar em laboratório chamas planas, com o mínimo de estiramento e aproximadamente adiabáticas. As perdas de calor por radiação a partir dos gases da combustão e da placa perfurada, no entanto, continuam presentes. Para encontrar a velocidade de chama adiabática não há necessidade de extrapolar os resultados experimentais para perda de calor zero ou estiramento zero. No entanto, é necessário interpolar os resultados para achar a condição de chama plana ($\alpha = 0$). Os erros associados a essa extrapolação serão avaliados mais a frente, mas os resultados, em geral, apresentam uma incerteza de medição igual ou menor aos melhores métodos disponíveis [Hermanns, 2007].

Como o método de fluxo de calor para determinação de velocidades adiabáticas não requer uso de equipamentos de alta tecnologia para medições (sistema PIV, por exemplo) tem-se que este é um método de baixo custo operacional.

Uma desvantagem do método é que ele se baseia em uma cuidadosa medição de temperaturas empregando termopares de pequeno calibre cuja montagem requer muito cuidado. Também são necessários cuidados no projeto do queimador para evitar o aquecimento da carcaça.

3 EXPERIMENTO

3.1. Bancada de Testes

A configuração esquemática da bancada de trabalho construída para este estudo, com seus principais sistemas constituintes, pode ser conferida na Figura 3.1. A bancada permite controlar, independentemente, as vazões de ar e combustível, controlar a temperatura do banho de água dos sistemas de arrefecimento e medir o perfil de temperatura da placa do queimador.

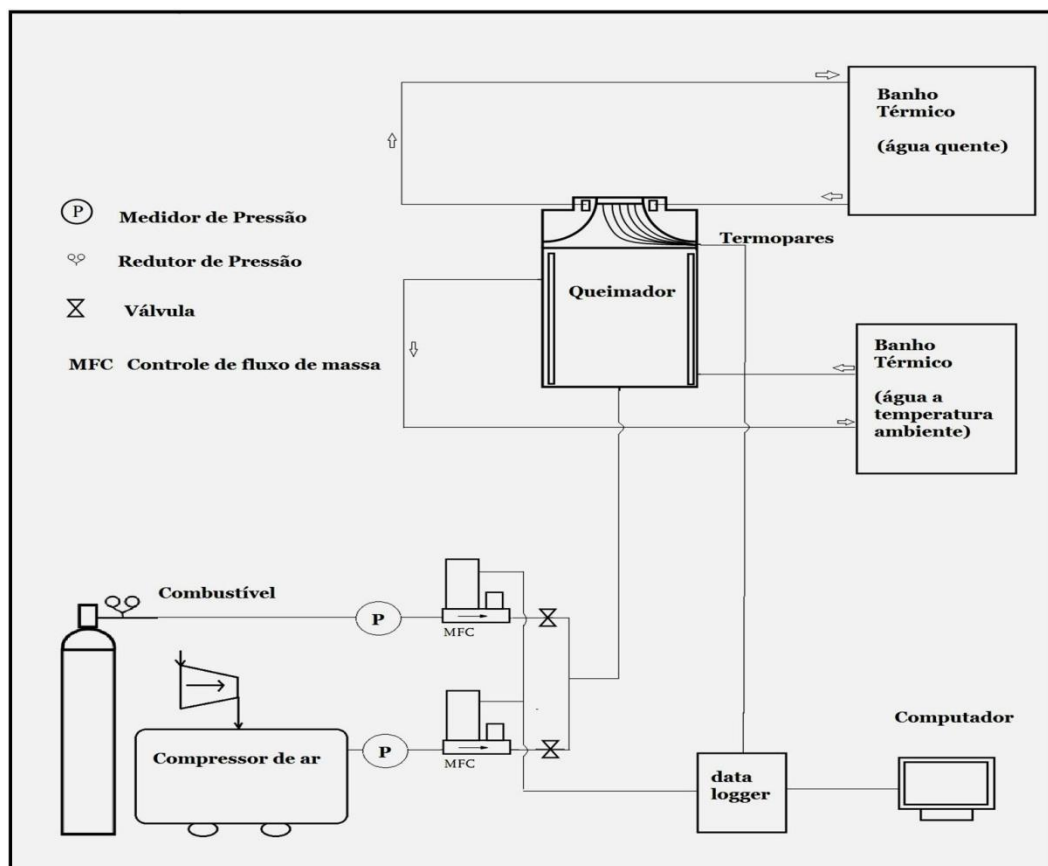


Figura 3.1- Representação esquemática da bancada experimental

O queimador utilizado foi operado em uma capela para sucção dos gases da combustão. No apêndice E podem ser observadas imagens da bancada e dos sistemas que a compõem. Uma descrição mais detalhada de todos os equipamentos e do queimador é feita nas seções seguintes.

3.1.1. Sistema de Alimentação

O ar provém de uma linha de ar comprimido de 10 bar de pressão. Ligado à linha está um regulador de pressão com um secador de ar e um filtro coalescente (elemento filtrante de 0,3 μm), onde o óleo e a umidade são extraídos e a pressão é reduzida para 4 bar. O ar é assumido como sendo ar seco padrão com composição aproximada por 21% de O_2 e 79% de N_2 . A proporção relativa do ar na mistura de ar-combustível é definida pela relação de equivalência.

A alimentação de combustível provém de um cilindro de metano com capacidade para 10 m^3 sob alta pressão (cilindro White Martins). Junto ao cilindro está instalada uma válvula reguladora de pressão, que mantém a pressão de saída constante independentemente da pressão do cilindro. Assim como no sistema de ar, a linha de combustível está conectada a um filtro coalescente (elemento filtrante de 0,3 μm). Foi utilizado, também, como combustível um cilindro de Gás Natural Veicular com capacidade para 15 m^3 de gás.

A mistura entre as correntes de ar e combustível se dá, após a passagem pelos controladores de vazão, em um tubo de 3 m de comprimento para promover a homogeneização da mistura antes da entrada da mesma no *plenum* do queimador (câmara principal arrefecida a água). Logo na entrada do *plenum* há um anteparo que dissipa o jato de reagentes e uma tela promove a retificação do escoamento, com o objetivo de homogeneizar o perfil de velocidades dos gases. A perda de carga imposta pela tela tende a equalizar a velocidade dos gases em toda a seção do queimador.

3.1.2. Controladores de Vazão

O controle da vazão é feito através de controladores/medidores eletrônicos de vazão da série EL-FLOW da marca Bronkhorst, capazes de absorver flutuações na pressão da linha garantindo uma vazão constante. Na linha de ar foi utilizado o controlador/medidor eletrônico modelo F-201CV-10K-AAD-22-V, com faixa de operação de 0 a 15 litros por minuto (l/min). A vazão de metano, por sua vez, é medida pelo controlador/medidor eletrônico de vazão de mesmo modelo, porém com faixa de operação de 0 a 10 l/min. Para situações em que a vazão de metano é muito baixa, utilizou-se também um controlador/medidor eletrônico de vazão F-201CV-500-AAD-22-V, com faixa de operação de 0 a 0,5 l/min, afim de se diminuir

incertezas devido ao fundo de escala. Segundo o fabricante os aparelhos usados possuem uma incerteza de medição de 0,5% do valor da leitura mais 0,1% do fundo de escala (manual EL-FLOW, Bronlhorst High-Tech).

Os medidores de vazão de ar e metano funcionam por princípio térmico. A medição é efetivamente feita em uma dada parcela do escoamento que é desviada para um canal secundário. Esse desvio é feito por um elemento de escoamento laminar capaz de garantir a proporcionalidade entre o escoamento principal e o secundário. O canal secundário é um tubo capilar dotado de duas resistências elétricas e duas tomadas de temperatura. A diferença entre as duas temperaturas gera um sinal que é diretamente proporcional à vazão mássica que atravessa o capilar. Por meio de calibração o medidor fornece a vazão mássica desejada.

3.1.3. Sistemas de Arrefecimento

Para controlar a temperatura da placa perfurada, bem como para manter a diferença de temperatura entre a cabeça do queimador e câmara de queimador (*plenum*), dois banhos termostáticos com temperatura controlada por termostatos foram utilizados. Os sistemas de arrefecimento são da marca Cleanlab, e podem variar a temperatura de -10 °C a 100 °C.

Um banho de água a 85 °C mantém a placa perfurada aquecida, conforme requerido pelo método do fluxo de calor. O outro sistema de arrefecimento objetiva manter a temperatura da câmara de admissão constante na temperatura em que se quer medir a velocidade de chama. Nesse trabalho o banho inferior foi fixado em 25 °C para todos os experimentos.

3.1.4. Termopares e Aquisição dos Dados

Os termopares usados para medir os perfis de temperatura em toda a placa do queimador são do tipo T (cobre-constantan), que possuem uma faixa de utilização de -10 °C a 300 °C, com um diâmetro de 0,2mm sem isolamento. Estes estão ligados a cabos de extensão, específicos para termopares do tipo T, com 2,5 m de comprimento. A junta quente dos termopares é fixada na placa perfurada com o auxílio de cola para junta de motores da marca 3M, resistente a altas temperaturas (130°C). Os termopares são isolados com PFA

(copolímero perfluoroalcoxi) para evitar contato entre os metais. Os fios de extensão já são isolados com membrana de PTFE (politetrafluoretileno). Os termopares estão conectados a um datalogger HP Benchlink 34970 devidamente configurado para a leitura e coleta dos dados.

3.1.5. Queimador

O queimador consiste de três partes principais: uma câmara de pré mistura ou *plenum*, um cabeçote e uma placa perfurada sobre a qual a chama é estabilizada. Para promover a homogeneização das temperaturas, o material utilizado em todas as peças é o bronze comercial (em média 73% cobre, 15% chumbo, 8% zinco e 4% estanho). Na Figura 3.2 podem ser conferidas uma representação computacional do queimador construído bem como um corte transversal evidenciando as características fundamentais.

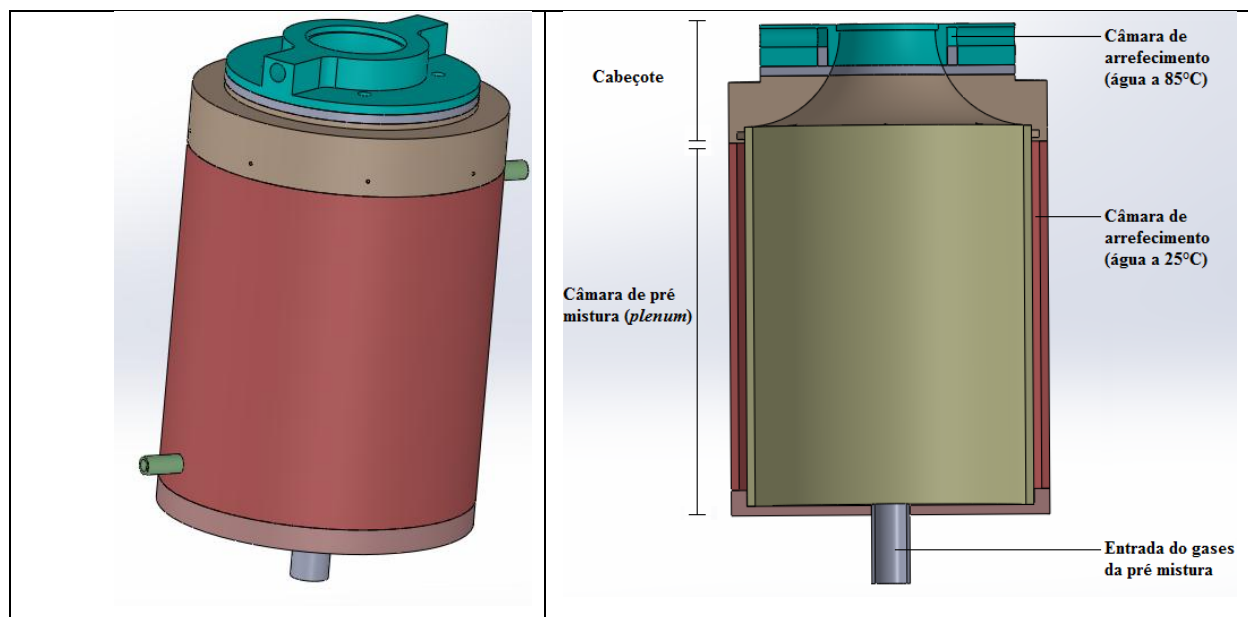


Figura 3.2 - Representação em perspectiva 3D do queimador (esquerda) e corte transversal evidenciando suas partes internas (direita) com cada cor representando uma peça distinta

O queimador é montado sobre uma base de apoio, como pode ser visto nas Figura 3.3, construída em alumínio e especialmente projetada para acomodar a linha de abastecimento da pré mistura e as linhas de arrefecimento provenientes dos banhos térmicos. O devido cuidado foi tomado para evitar qualquer contato entre as partes quentes e frias do queimador por meio

dessa base de apoio, o que acarretaria um meio pelo qual o calor pudesse ser transmitido afetando, assim, o tempo de espera até a obtenção de um regime aproximadamente permanente de temperaturas.

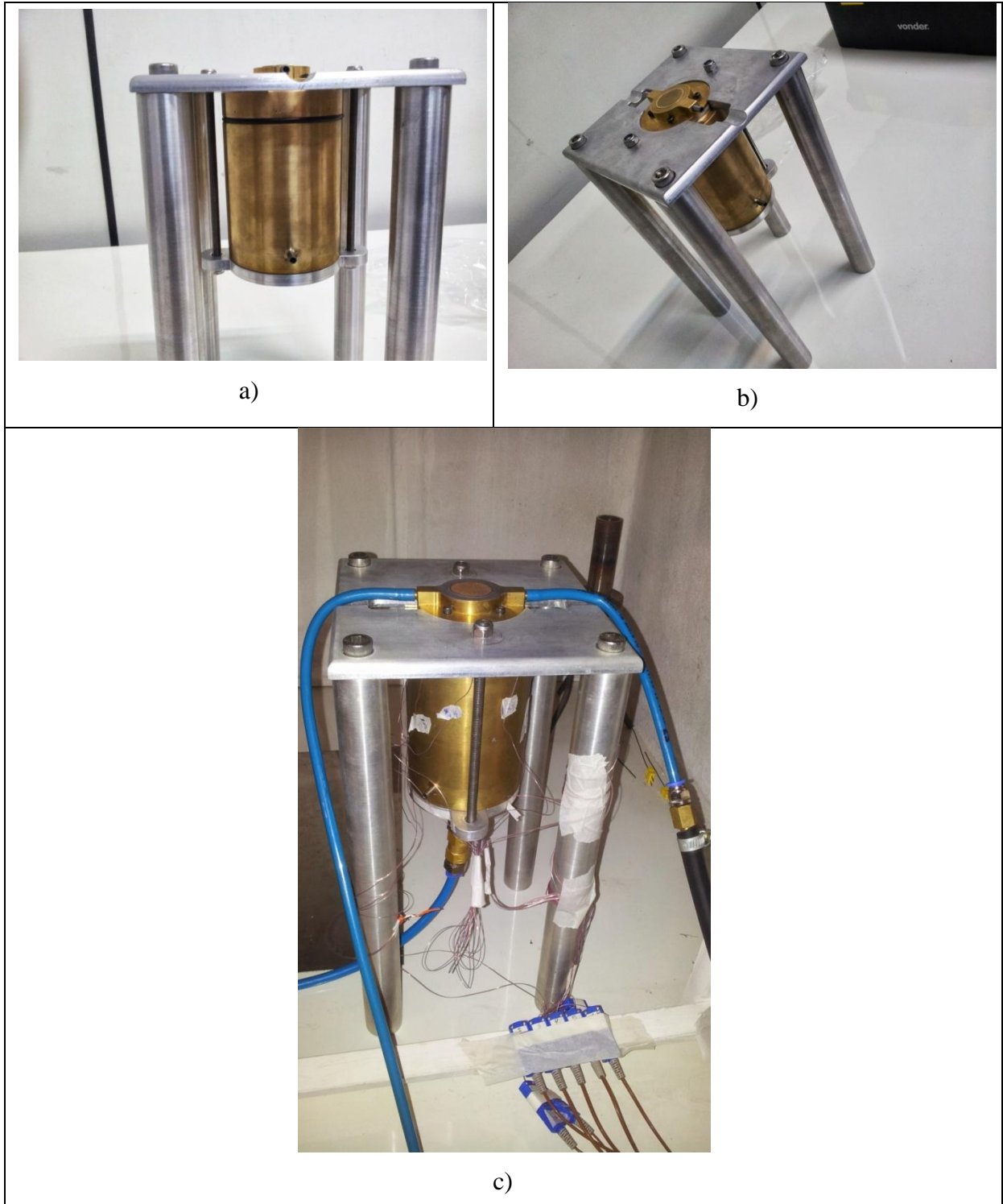


Figura 3.3 - (a e b) Fotos do queimador montado sobre a base de apoio e (c) da configuração final com os termopares, as linhas de gás e de arrefecimento acopladas ao queimador

3.1.5.1. Cabeçote

O cabeçote do queimador, conforme Figura 3.4, é subdividido em três partes:

- Uma parte superior, onde é acoplada a placa perfurada e possui o canal para circulação de água.
- Uma peça central de material isolante.
- Uma parte inferior que é fixada logo acima da câmara de entrada e por onde adentram os termopares.

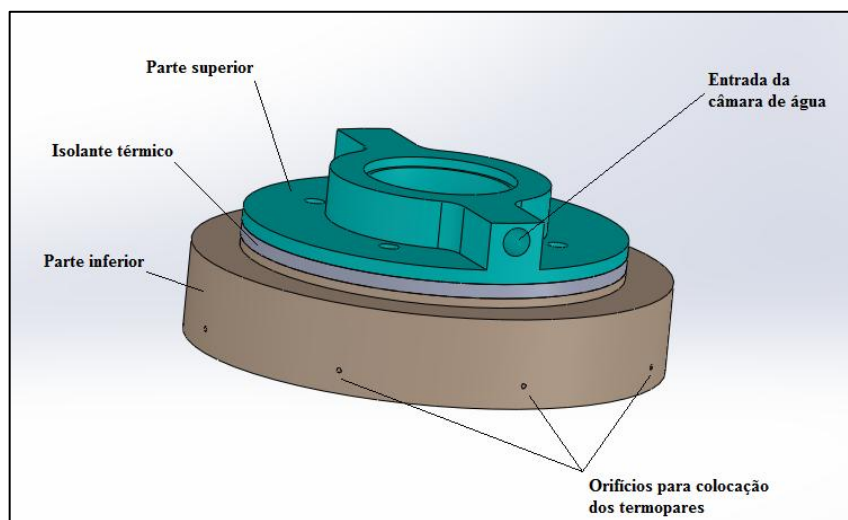


Figura 3.4 - Representação tridimensional da modelagem do queimador

Faz-se necessário, conforme exposto por van Maaren et. al, 1994, uma maneira de controlar a temperatura da placa perfurada evitando gradientes radiais de temperatura.

Isto é conseguido por uma camisa d'água, que encapsula a parte superior do cabeçote do queimador, por onde água aquecida é mantida circulando, possibilitando isolar termicamente a placa perfurada. Dessa maneira, quando a temperatura da placa é constante, a perda de calor da chama para a placa do queimador pode ser compensada por um ganho de calor por parte dos gases não queimados quando estes passam através dos orifícios da placa perfurada (ver Figura 3.5).

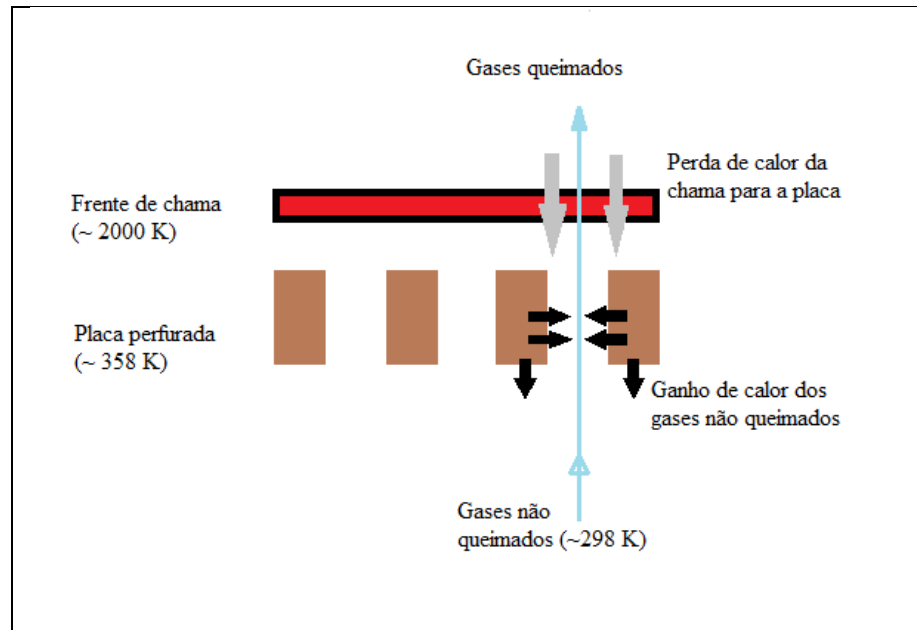


Figura 3.5 - Esquema do fluxo de calor entre a chama, a placa perfurada e os gases não queimados. A chama atinge a condição adiabática quando todo o calor perdido por ela é transmitido para os gases não queimados devido ao fato de a placa não possuir gradiente radial de temperatura. Temperaturas típicas são mostradas

Essa montagem leva não só a estabilização de uma chama quase adiabática sobre a placa como facilita a estabilização da mesma, contribuindo para a permanência da chama no estado plano laminar (unidimensional) para um grande intervalo de velocidades (vazões), podendo-se obter chamas estáveis com velocidades em que geralmente uma situação de retorno (*flashback*) ou deslocamento (*blowoff*) ocorreria conforme evidenciado em Bosschaart, 2002.

Com o objetivo de separar as peças quentes e frias do queimador existe uma camada de material termoplástico que atua como isolante térmico e possibilita que uma situação de regime permanente aconteça mais rapidamente após o acionamento dos banhos térmicos. Essa camada isolante é fabricada em nylon, com uma condutividade de aproximadamente $0,23 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. A parte inferior do cabeçote do queimador é caracterizada por furos em sua lateral para permitir a entrada dos termopares que são fixados na placa perfurada, conforme pode ser visto na Figura 3.6. O encaixe entre a parte inferior da cabeça e o plenum ocorre por pressão e a vedação é feita com anéis de borracha (*o-ring*).

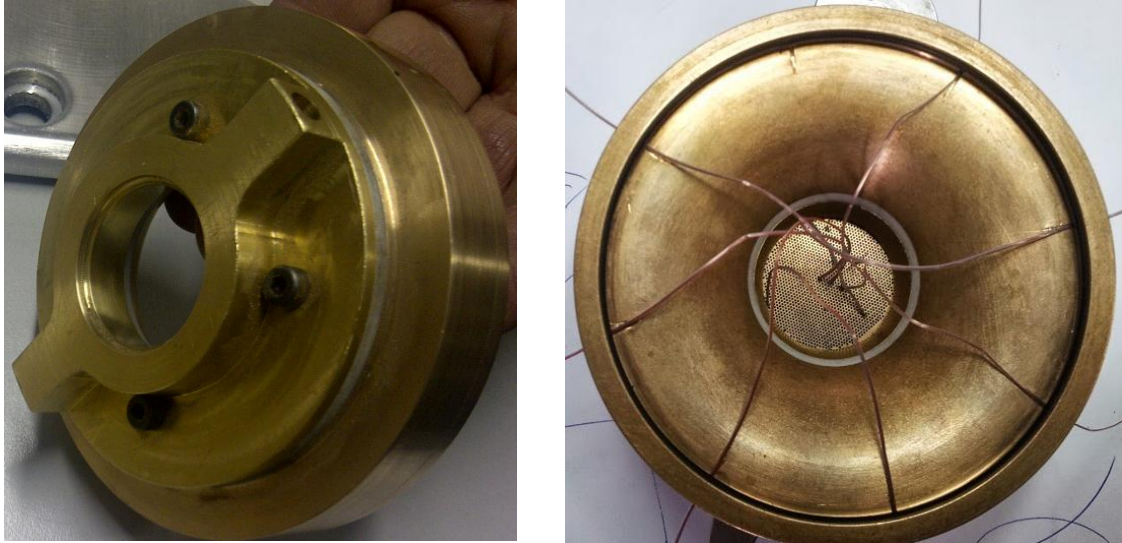


Figura 3.6 - Foto da parte externa (esquerda) e interna (direita) do cabeçote. A foto da direita mostra também os termopares já encaixados na placa perfurada, passando pelos orifícios da parte inferior do cabeçote

Uma característica importante destas peças é a superfície curva das paredes internas que tem como objetivo conduzir os gases da pré mistura, do plenum até a placa perfurada, de maneira a alcançar o perfil de velocidades mais uniforme possível. Em relação ao projeto do queimador mais utilizado na literatura, essas peças diferem pelo caráter desmontável, o que possibilita um acesso direto à câmara de circulação de água facilitando a limpeza de eventuais resíduos que venham a impedir o fluxo de água. Porém, após o início dos testes, pequenos vazamentos foram notados nos encaixes entre as peças. O problema foi solucionado com a aplicação de uma fina camada de cola silicone nas paredes próximas aos encaixes.

3.1.5.2. Câmara de Pré Mistura

A câmara de admissão, ou plenum, possui duas finalidades básicas:

- Contribuir para a uniformidade da mistura na saída do queimador.
- Garantir a constância da temperatura dos gases não queimados.

Para dar conta do primeiro objetivo, uma tela de distribuição é montada na parte inferior do plenum, constituída por um anteparo na porção central, logo acima do orifício de entrada

da mistura combustível, e aparte vazada (tela) nas bordas. Essa configuração dissipa o jato central e promove a uniformização das velocidades. Quanto a garantir a temperatura dos gases de entrada, a câmara é composta por dois cilindros de bronze com diâmetros diferentes que são montados de forma concêntrica. O vão entre eles é vedado acima e abaixo por anéis de borracha, dando origem a um circuito de arrefecimento por onde circula água com temperatura controlada.

Conforme estudo feito por Bosschaart, 2002, sem esse resfriamento (e em conjunto com um bom isolante térmico entre o plenum e o cabeçote), essa câmara acabaria por ser aquecida pela parte superior do queimador, que se encontra a uma elevada temperatura tanto devido à passagem de água quente quanto pela chama formada logo acima, o que geraria uma gradual elevação da temperatura dos gases não queimados levando a um tempo de espera da ordem de horas para que medições possam ser feitas mantendo sua reprodutibilidade ao longo do tempo.

3.1.5.3. Placa Perfurada

A placa perfurada do queimador- sob a qual a chama plana se estabiliza consiste num disco de bronze com 2 mm de espessura e 30 mm de diâmetro. A usinagem dessa peça segue um padrão hexagonal de pequenos furos, cada qual com um diâmetro de 0,5 mm e uma distância de centro a centro de 0,7 mm, conforme representação da Figura 3.7.

A placa é encaixada no cabeçote do queimador e eventuais pequenos espaços entre as peças são preenchidos com pasta térmica da marca Thermal Silver, com condutibilidade térmica de 1,2 W/ m·K, com o objetivo de melhorar o contato e o fluxo de calor entre elas. O melhor contato térmico provoca uma melhor simetria rotacional da distribuição de temperatura na placa do queimador, e variações observadas nas medições de temperatura dos termopares são significativamente reduzidas segundo Bosschaart e de Goey, 2003.

A perfuração da placa é feita com furos que são suficientemente pequenos para reverter o escoamento dos gases em um perfil uniforme após passar pela placa do queimador. Conforme exposto por de Goey et. al., 1995, quanto maior a vazão dos gases, menores devem ser os orifícios para que o escoamento se torne uniforme antes de chegara chama e, assim, manter a mesma estabilizada. Uma análise feita por de Lange e de Goey, 1993, mostrou que para velocidades de chama na faixa de 10 cm/s a 50 cm/s, um diâmetro de 0,5 mm para os orifícios é suficientemente pequeno para produzir uma chama plana.

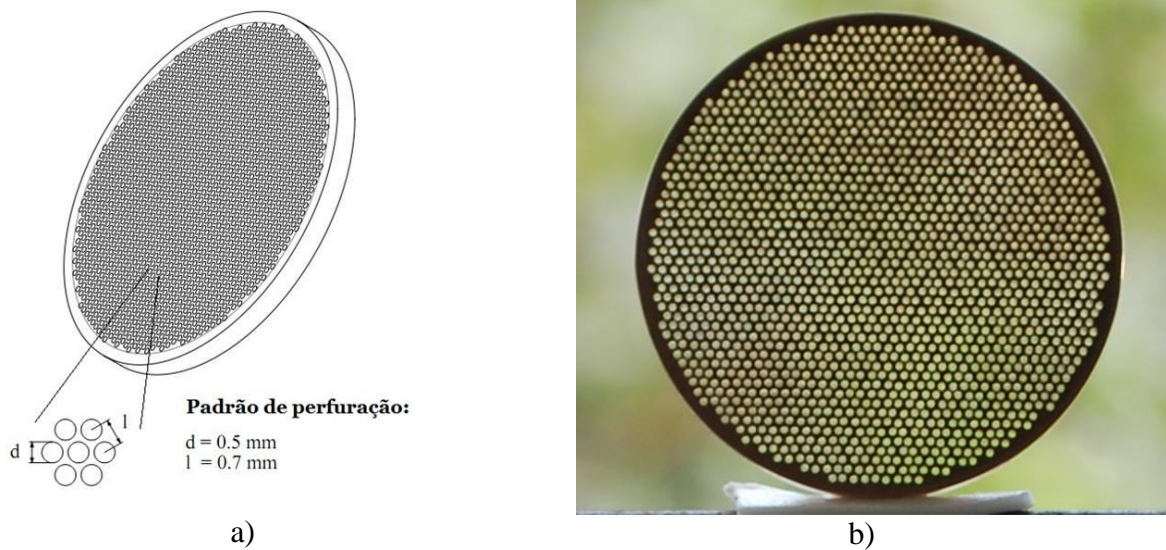


Figura 3.7 - (a) Representação da placa e do padrão de perfuração hexagonal seguido na fabricação e (b) foto da placa perfurada

A medição da temperatura é feita por sete termopares tipo T fixados diretamente no interior de alguns orifícios da placa. Perturbações locais no escoamento dos gases não queimados são, então, inevitáveis. A fim de se mitigar tais efeitos, as dimensões dos termopares usados são reduzidas e o posicionamento dos mesmos ao longo da placa, do centro até a extremidade, segue uma distribuição em espiral conforme Figura 3.8a. No entanto, cuidados devem ser tomados para evitar zonas onde a chama não é plana e sofre deformações, como os efeitos relacionados às bordas.

Sendo assim os termopares são fixados até um raio máximo de aproximadamente 12 mm que, conforme van Maaren e de Goey, 1994b, corresponde a uma área onde esses efeitos são desprezíveis e a chama pode ser considerada unidimensional. Em tal estudo, esse raio foi determinado utilizando Velocimetria a Laser por Efeito Doppler (LDV), tanto nos gases da pré mistura quanto nos gases queimados, onde constataram que a variação na distribuição de velocidades é da ordem de 1% para $r < 12$ mm. Conforme a Figura 3.8b, o raio R do círculo que contém os termopares varia de 0,15mm até 12,38 mm.

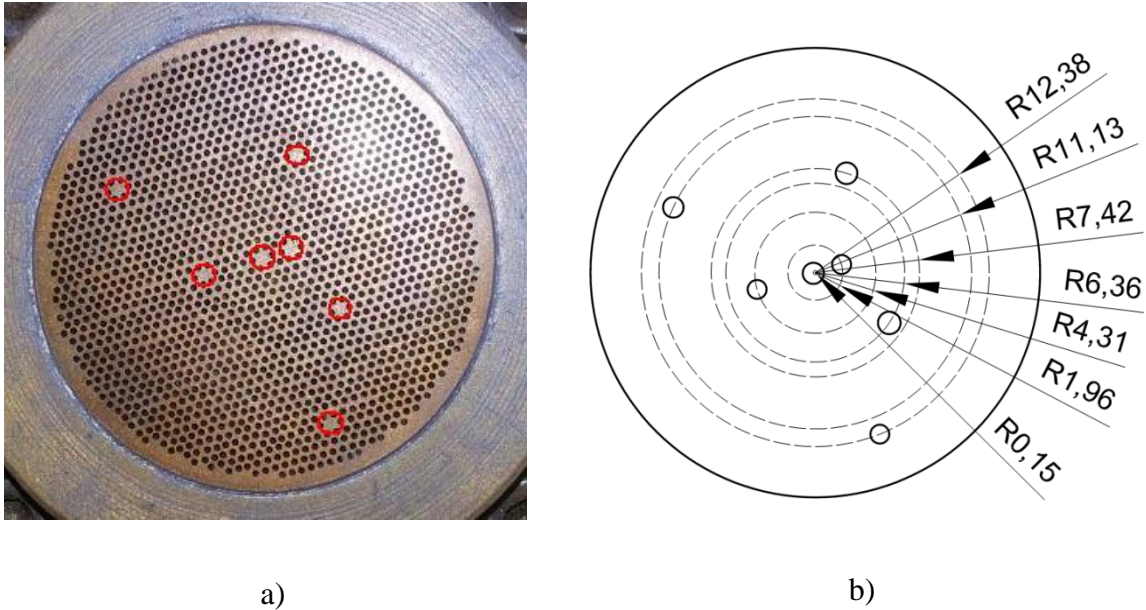


Figura 3.8 - (a) Posição dos termopares (círculos vermelhos) fixados a placa e (b) posição radial dos termopares, em milímetros a partir do centro da placa

Originalmente feita por meio do uso de uma cola condutora contendo prata, para melhorar o contato térmico entre o furo (diâmetro de 0,5 mm) e a junta quente do termopar (diâmetro de 0,2 mm), a fixação dos termopares foi posteriormente aperfeiçoada por Bosschaart, 2002, onde os termopares são introduzidos em orifícios usinados em cilindros (também de bronze) pequenos o suficiente para encaixarem-se, sem o uso de qualquer outra substância, nos furos da placa. Essa solução elimina o uso de outros materiais, como a cola condutora, e reduz os espaços vazios entre o termopar e a placa melhorando, assim, o contato térmico. Dessa maneira significativas variações nas medições de temperatura foram reduzidas dado que tal técnica permite um posicionamento mais preciso dos termopares.

No presente trabalho, foi utilizada uma solução intermediária com um custo menor de produção em relação ao método de fixação citado, mas com a mesma vantagem de reduzir as incertezas nas medidas de temperatura. A solução consiste em determinar previamente a posição dos termopares e então fabricar a placa perfurada com furos cegos de diâmetro reduzido ($\sim 0,2$ mm) nessas posições, conforme representado na Figura 3.9.

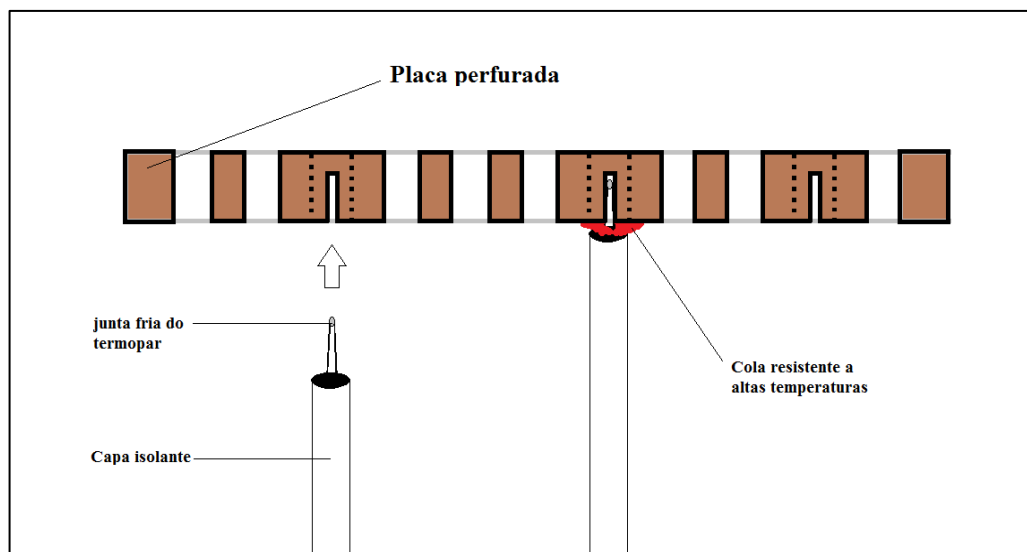


Figura 3.9 - Esquema de fixação dos termopares na placa perfurada. A placa é usinada com furos não passantes e com diâmetros reduzidos ($\sim 0,2$ mm) exatamente na posição onde deveria haver uma perfuração na placa. Devido as dimensões aproximadas entre o termopar e o orifício, a fixação ocorre sem o uso de substâncias entre a junta fria e a parede da placa

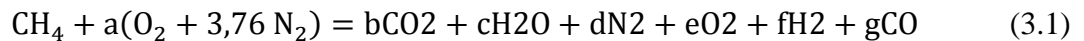
Com o objetivo de reduzir as incertezas quanto ao posicionamento dos termopares no interior da placa, tais furos não são passantes, possuindo uma profundidade de aproximadamente dois terços da espessura da placa ($\sim 1,3$ mm). A interferência entre o termopar e o furo fixa o termopar à placa. Por um lado, a utilização de outros materiais entre o termopar e a placa não se faz necessária. Por outro, acaba restando uma camada de ar que altera a condutividade média da placa naquela posição. Outra desvantagem reside no fato de os furos serem fixos, o que torna impossível o reposicionamento dos termopares. Para uma melhor fixação, um mínimo de cola para junta de motores foi utilizado na parte externa do furo, entre a placa e o isolamento do termopar. Por fim, não é possível afirmar qual é posição final da junta quente do termopar, o que, como será visto mais a frente, vai acarretar erros sistemáticos nas medições.

3.2. Procedimentos de Obtenção dos Resultados

Após montada a bancada de trabalho, conforme visto na seção 3.1, deve-se, primeiramente, ligar os banhos de água e aguardar cerca de 1 hora para que as temperaturas - tanto da água quanto do queimador - estabilizem-se. O banho que envolve o *plenum* foi mantido a 298 K o que manteve a temperatura da pré-mistura em torno dos 298 ± 3 K para

todos os experimentos. O outro banho térmico água aquecida a 358 K (85 °C) na câmara que envolve a placa perfurada, o que manteve a placa a aproximadamente 354 ± 1 K quando não há chama alguma sobre a mesma. O mesmo procedimento deve ser feito com os medidores de vazão que, segundo o fabricante, precisam de um período de 30 minutos de aquecimento para atingirem as condições adequadas para medição.

Conforme já explicitado, o experimento consiste em estabilizar uma chama plana sobre o queimador e medir os perfis de temperatura ao longo da placa perfurada para diferentes velocidades. Para tanto foi feita, anteriormente a realização do experimento, uma planilha onde a velocidade dos gases não queimados S_L é o parâmetro de entrada e a vazão total Q da mistura (calculada com base na velocidade dos gases e na área A sobre a qual a chama se estabiliza), a vazão de combustível (metano ou gás natural) e a vazão de ar são os dados de saída. As vazões de combustível e ar são obtidas obedecendo-se à proporção imposta pelas diferentes razões de equivalência calculada a partir do balanço estequiométrico, que para metano puro é feito a partir de



onde a é o número de moles de ar que é dado por $a = a_s/\phi$ e a_s é o número de moles de ar em uma mistura estequiométrica (para metano $a_s = 2$). Os demais coeficientes estequiométricos são encontrados em função do balanço de átomos. As respectivas frações molares de metano X_{CH_4} e ar X_{ar} da mistura reagente são dadas por

$$X_i = \frac{N_i}{N_{\text{tot}}}, \quad (3.2)$$

onde N_i é o número de moles da espécie i e N_{tot} o número total de moles da mistura reagente.

De posse dos valores a serem configurados nos medidores de vazão deu-se início a coleta dos dados de temperatura medidos ao longo da placa perfurada. Para cada vazão selecionada foi aguardado um tempo de 5 minutos -a partir do qual foi verificado que os valores de temperatura não mais variavam - para que então as medidas de temperatura fossem registradas a cada segundo, por um período de 2 minutos, a partir das quais uma temperatura média, para cada termopar, é encontrada. A Tabela 3.1 é referente à média dos valores de temperatura, de cada termopar, feita para três repetições do experimento para uma dada proporção estequiométrica de metano e ar (note que, embora os valores da vazão mudem em

função da mudança de velocidade, a proporção entre as vazões de metano e ar se mantém constante). Em geral tais repetições foram feitas em dias diferentes.

Tabela 3.1 - Médias de temperaturas de cada termopar ($^{\circ}\text{C}$) para diferentes velocidades de chama em uma mesma razão de equivalência ($\phi = 1$). T1 representa o termopar mais próximo do centro e T7 o mais afastado

S_L (m/s)	\dot{Q} (l/min)	\dot{Q}_{CH_4} (l/min)	\dot{Q}_{ar} (l/min)	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
0,37	15,68	1,49	14,19	77,18	74,00	77,53	78,37	76,83	80,72	81,96
0,36	15,26	1,45	13,81	85,26	81,06	85,19	85,67	82,93	85,26	86,43
0,35	14,84	1,41	13,43	94,39	89,21	93,71	93,81	89,97	90,41	91,27
0,34	14,41	1,37	13,04	103,24	97,02	101,96	101,79	97,02	95,48	96,08
0,33	13,99	1,33	12,66	110,78	103,89	108,97	108,73	103,20	99,71	100,27
0,32	15,56	1,29	12,27	119,80	111,73	117,68	115,74	110,49	105,49	105,27

A metodologia de obtenção dos resultados é a seguinte: configuram-se as vazões de combustível e oxidante correspondente a certa razão de equivalência para uma determinada velocidade de escoamento (medida conforme a área de saída do queimador). Esse primeiro valor de velocidade, escolhido como referência, baseia-se nos resultados para velocidade de chama laminar adiabática previamente obtidos pela literatura. Anotam-se, então, os valores medidos pelos termopares ao longo da placa para a obtenção do perfil radial de temperaturas ao longo da mesma. Após, varia-se a velocidade do escoamento mantendo-se constante a razão de equivalência para a obtenção de diferentes perfis de temperatura para diferentes velocidades de chama.

Assim, foram obtidos perfis para velocidades acima e abaixo do valor inicial de referência. Em geral, foram registrados dados de temperatura para seis velocidades diferentes variando-as em passos de 1 cm/s. Algumas vezes, o limite tanto superior quanto inferior de velocidade medida é dado pela perda da estabilidade da chama, que mostra-se visivelmente não plana para velocidades muito altas ou muito baixas (ver Figura 3.10). O mesmo procedimento é replicado para diferentes faixas de riqueza das chamas.

Foram obtidas - ao todo - 87 tabelas das quais 33 com dados obtidos para medições com GN e 54 com dados de chamas utilizando-se metano como combustível.

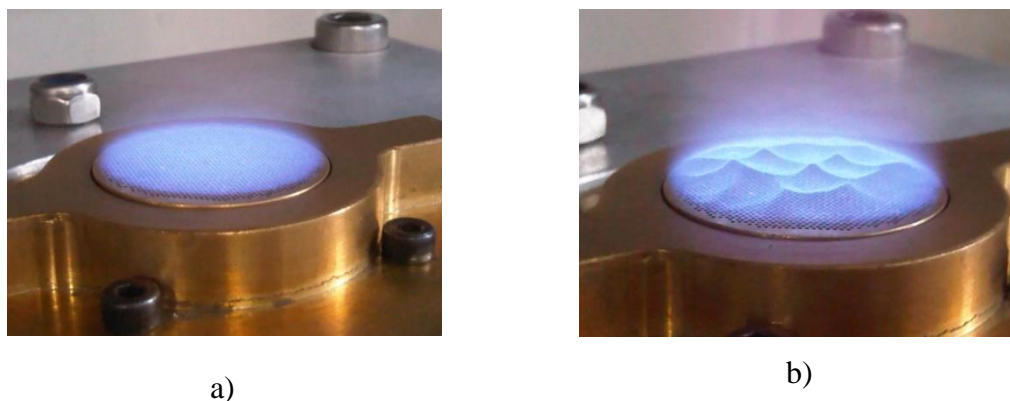


Figura 3.10 - (a) Chama plana e (b) visivelmente não plana para a razão estequiométrica de metano e ar. A perda da condição plana ocorre devido ao aumento da vazão dos gases reagentes

As 54 tabelas de dados para o metano dão origem a 18 tabelas com as respectivas médias de temperatura (para as três repetições). Cada tabela representa uma determinada razão de equivalência que varia desde 0,65 até 1,5 com passo de 0,5. Analogamente, as 33 tabelas de GN dão origem a 11 tabelas que representam razões de equivalência de 0,75 a 1,50.

Uma correção para os valores de vazão medidos para o GN deve ser feita, pois o controlador usado era calibrado para metano puro. O fator de correção de 0,97 foi encontrado (ver apêndice B) utilizando a composição média do gás natural da Bolívia, fornecida pela empresa Sulgás (<http://www.sulgás.rs.gov.br/>), conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição média para o gás natural da Bolívia

Composição Média em % vol. Gás natura da Bolívia		
Metano	CH ₄	91,800
Etano	C ₂ H ₆	5,580
Propano	C ₃ H ₈	0,970
Iso-Butano	C ₄ H ₁₀	0,030
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0,020
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,100
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,800
Nitrogênio	N ₂	1,420

fonte: (<http://www.sulgás.rs.gov.br/index.asp?SECAO=10&SUBSECAO=0&EDITORIA=65>)

4 ANÁLISE DOS DADOS E ESTIMATIVAS DE INCERTEZAS

Cada conjunto de dados de temperatura, para uma razão de equivalência específica, é posto em um gráfico em função da posição de cada termopar ao longo da placa dando origem a diferentes perfis de temperatura. Uma curva é ajustada a cada um dos perfis encontrados, conforme um polinômio de segunda ordem (Equação 2.8). O coeficiente do termo de segunda ordem α é positivo (perfil com a concavidade voltada para cima) quando a velocidade dos gases é maior e negativo (perfil com a concavidade voltada para cima) quando a velocidade medida é menor do que a velocidade de chama adiabática. Em outras palavras, o perfil radial de temperaturas varia de concavidade (passando pela situação de concavidade nula) conforme a velocidade dos gases varia, uma vez que a temperatura da região periférica da placa é influenciada pela temperatura controlada da água que circula pela câmara aquecida. Esse comportamento pode ser visto na Figura 4.1 que apresenta os perfis medidos para diferentes velocidades em uma chama na proporção estequiométrica.

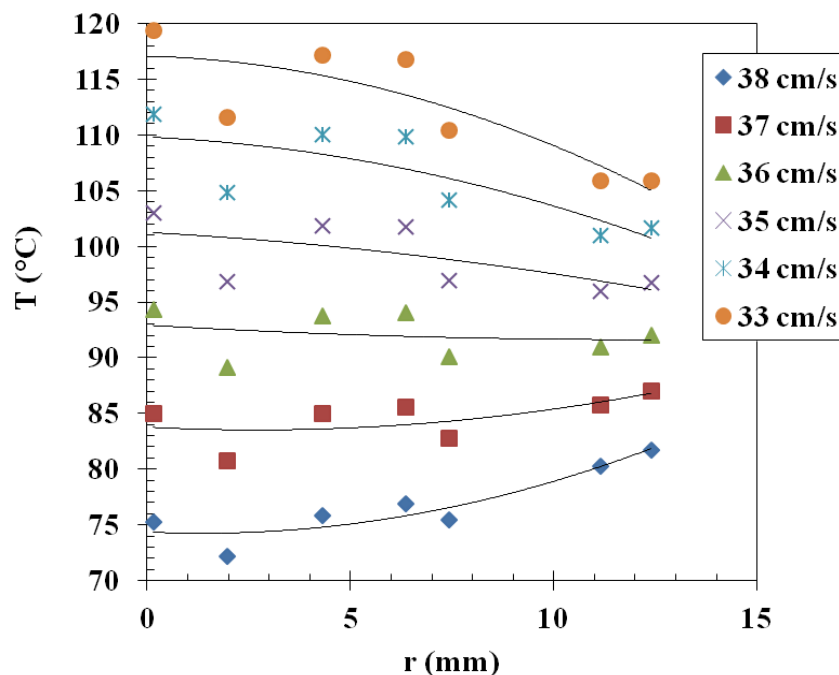


Figura 4.1 - Medidas de temperatura em função da posição radial dos termopares para diferentes velocidades de chama para a razão estequiométrica. Nota-se uma significativa variação entre os dados obtidos e a curva ajustada

O coeficiente do termo quadrático α de cada parábola é então graficado em função da velocidade de chama medida, onde uma interpolação seguindo um polinômio de primeira ordem é feita. A figura 4.2 mostra o gráfico de α em função de S_L referente aos dados da Figura 4.1. A velocidade de chama plana adiabática S_L° é então obtida para $\alpha = 0$.

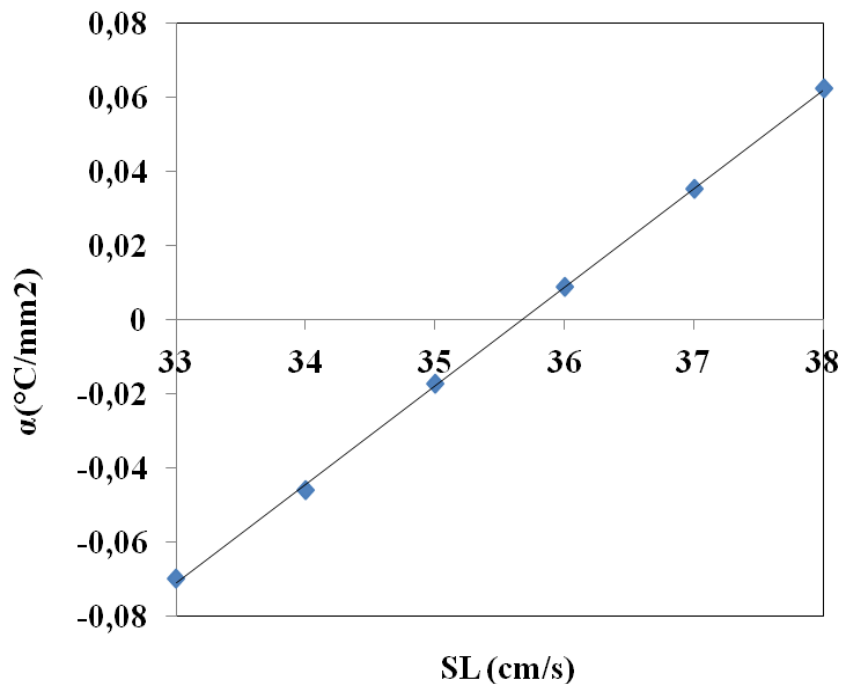


Figura 4.2 - Gráfico do coeficiente parabólico α em função das velocidades de chama S_L medidas para $\phi = 1$ para uma mistura entre metano e ar. A velocidade de chama plana adiabática $S_L^\circ = 35,6$ cm/s é encontrada para $\alpha = 0$

No gráfico da temperatura em função da posição nota-se uma variação entre as medições de cada termopar e a curva parabólica ajustada. Bosschaart, 2002, atribuiu esses erros, em parte, à diferença de altura no posicionamento dos termopares no interior da placa perfurada, e os dividiu em duas categorias: diferenças sistemáticas e diferenças aleatórias.

Essas diferenças são observadas em todas as chamas medidas, ricas ou pobres. A Figura 4.3 apresenta as curvas ajustadas para $\phi = 0,65$ (chama pobre). Pode-se perceber, tanto para $\phi = 1$ (Figura 4.1) como para $\phi = 0,65$ (Figura 4.3), que - por exemplo - o segundo ponto experimental, medido pelo termopar posicionado a 1,96 mm do centro da placa, apresenta um valor sistematicamente abaixo da curva. O termopar localizado a 4,31 mm do centro, por sua vez, apresenta valores sistematicamente acima. Portanto, uma correção dos dados que leva em conta essas diferenças foi realizada.

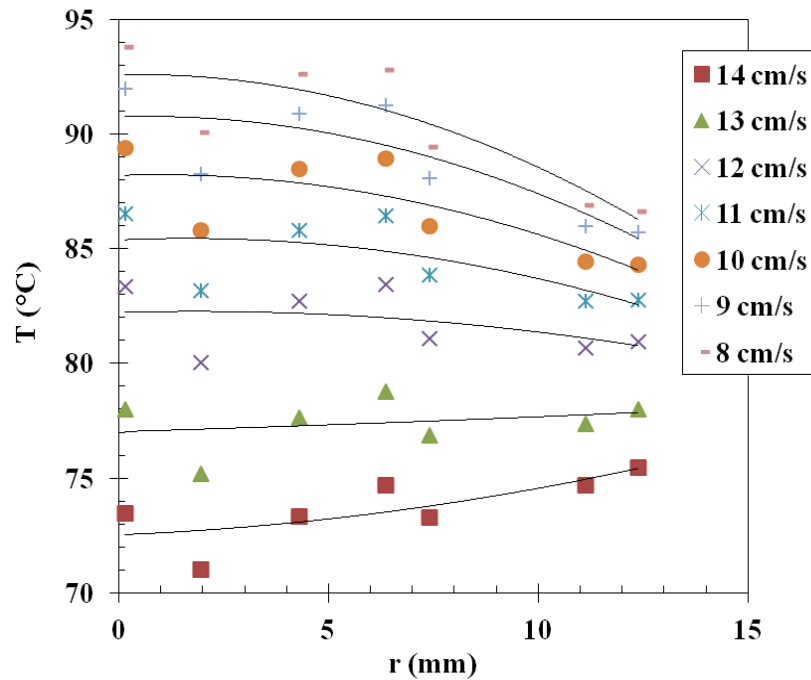


Figura 4.3 - Medidas de temperatura em função da posição radial dos termopares para diferentes velocidades de chama para $\phi = 0,65$

Para encontrar tais parâmetros de correção foram analisadas as diferenças de temperatura (ΔT_s), associadas aos erros sistemáticos dos termopares, dadas por

$$\Delta T_s = T_m - T_F \quad (4.1)$$

onde T_m é a temperatura medida pelo termopar e T_F a temperatura do termopar conforme a curva ajustada. Para essa análise foram utilizadas as medições para diferentes chamas ($\phi = 0,65$, $\phi = 1$ e $\phi = 1,5$) bem como as diferenças encontradas quando apenas os gases fluem através da placa sem a presença de chama alguma.

Esses valores de ΔT_s são então plotados em função de α (Figura 4.4), onde uma curva de tendência, seguindo um polinômio de primeira ordem, é ajustada. Assume-se que a tendência geral da curva é uma representação do erro sistemático no posicionamento dos termopares.

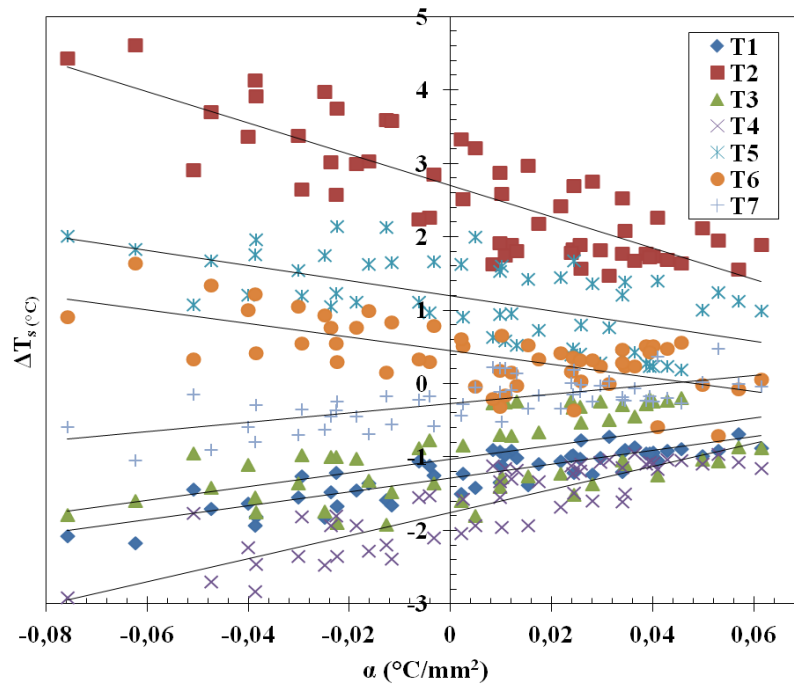
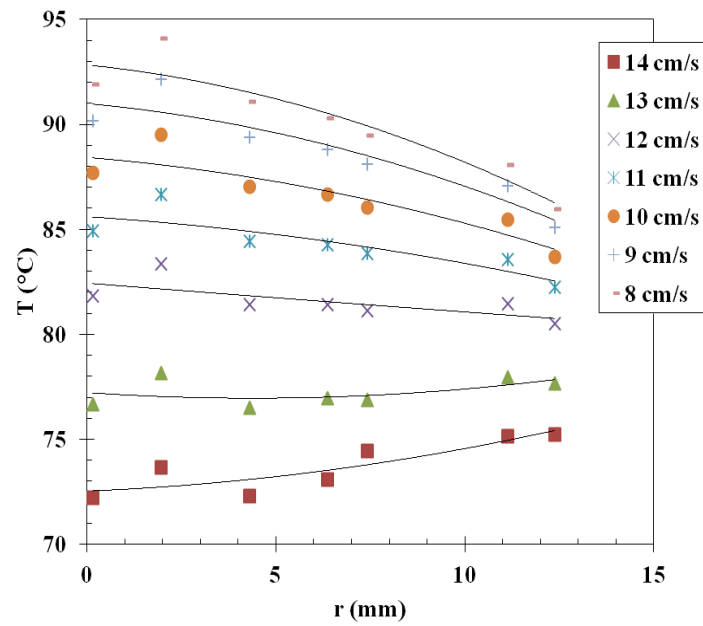


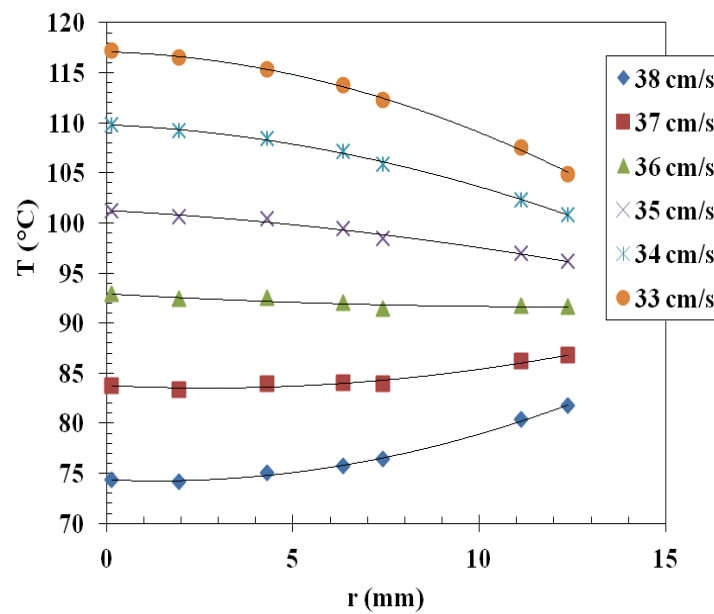
Figura 4.4 - Diferenças de temperatura ΔT_s em função de α . As retas ajustadas aos pontos fornecem os parâmetros necessários para a correção dos valores de temperatura medidos. A flutuação observada em torno da reta representa erros aleatórios associados aos termopares

Agora, uma correção da temperatura pode ser aplicada aos valores medidos uma vez que se sabe qual a diferença de temperatura que deve ser adicionada aos dados para cada valor de α . Segundo o gráfico apresentado na Figura 4.4, ao termopar 2 ($r = 1,96$), por exemplo, deve ser aplicada uma correção de aproximadamente $3\text{ }^\circ\text{C}$ ao valor medido quando $\alpha = -0,02$.

As Figuras 4.5a e 4.5b mostram as curvas corrigidas para $\phi = 0,65$ (a) e $\phi = 1$ (b). Após a correção nota-se que as variações foram significativamente reduzidas para a chama na proporção estequiométrica, porém diferenças residuais (ΔT_a) importantes permanecem, para a chama pobre. Em geral, a correção aplicada reduz significativamente as diferenças para chamas próximas a razão estequiométrica, porém para chamas pobres e ricas essa redução ocorre de maneira menos acentuada.



a)



b)

Figura 4.5: (a) Medidas de temperatura corrigidas para $\phi = 0,65$ e (b) $\phi = 1$. Pode-se perceber que para a razão estequiométrica a dispersão nos valores foi praticamente eliminada, no entanto, as diferenças permanecem para misturas muito ricas e muito pobres

Essas diferenças residuais não apresentam nenhum padrão aparente e são consideradas flutuações aleatórias das medidas. Tais flutuações acarretam em incertezas nos valores de S_L e, conseqüentemente, de S_L° que devem ser levadas em conta na análise. Para estimar o erro

na velocidade de chama, devido a essas diferenças remanescentes após as correções, pode-se definir a sensibilidade s – que indica a variação no coeficiente parabólico α em relação a uma variação na velocidade S_L dos gases – da seguinte maneira

$$s = \frac{d\alpha}{dS_L} \quad (4.2)$$

Deve-se também analisar a incerteza σ_α associada ao coeficiente α devido a ΔT_a . Para encontrar σ_α , primeiramente, determina-se o desvio padrão σ das diferenças de temperatura remanescentes (ΔT_a), que no caso do presente trabalho tem o valor aproximado de 1 °C. Assim, levando em conta o perfil parabólico definido pela Equação (2.8), considera-se a situação de uma chama aparentemente plana, em que os termopares deveriam medir a mesma temperatura T_{tp} . Nessa configuração pode-se ter duas situações extremas, representadas pela Figura 4.6.

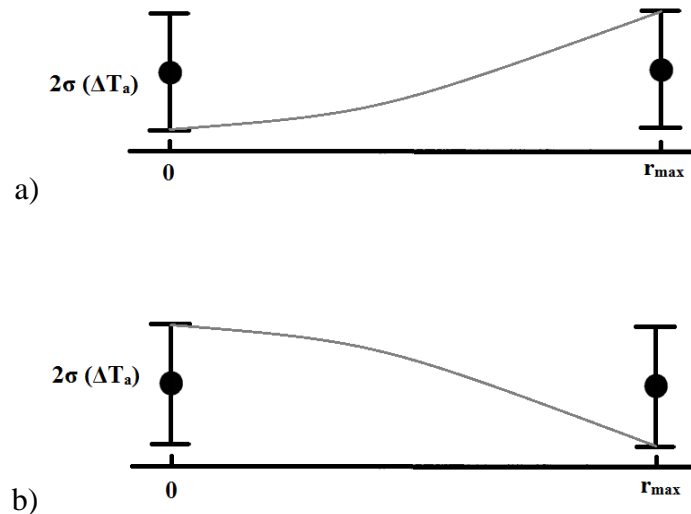


Figura 4.6 - Estimativa do erro no coeficiente parabólico. As duas situações extremas acima representam as curvas que ainda seriam aceitáveis em uma situação onde os termopares deveriam marcar a mesma temperatura T_{tp} , representada pelos pontos pretos

A primeira situação (Figura. 4.6a), em que a temperatura do centro da placa seria a temperatura medida (T_{tp}) acrescida do valor de duas vezes o desvio padrão das diferenças aleatórias ($\sigma(\Delta T_a)$)

$$T_C = T_{tp} + 2\sigma(\Delta T_a) \quad (4.3)$$

enquanto a leitura da temperatura na extremidade da placa $T(r_{max})$ indica o valor de T_{tp} menos o valor de duas vezes o desvio padrão das diferenças aleatórias ($\sigma(\Delta T_a)$)

$$T(r_{max}) = T_{tp} - 2\sigma(\Delta T_a) \quad (4.4)$$

Substituindo a Equação 4.3 na Equação 2.8 obtém-se

$$T_{tp} - 2\sigma(\Delta T_a) = T_{tp} + 2\sigma(\Delta T_a) - \alpha r_{max}^2 \quad (4.5)$$

onde, r_{max} é a posição do termopar fixado a maior distância do centro da placa. Determina-se que, nesse caso, $\alpha = -4\sigma(\Delta T_a)/r_{max}^2$. Na situação oposta, análoga a essa, pode-se determinar que $\alpha = 4\sigma(\Delta T_a)/r_{max}^2$. Assim, pode-se concluir que a incerteza associada ao valor de α é dado por

$$\sigma_\alpha = \pm \frac{4\sigma(\Delta T_a)}{r_{max}^2} \quad (4.6)$$

De acordo com Bosschaart e de Goey, 2003, o erro na velocidade de chama adiabática devido às diferenças residuais de temperatura $\sigma_1(S_L^\circ)$ pode ser determinado combinando as Equações 4.6 e 4.2 que resulta em

$$\sigma_1(S_L^\circ) = \frac{1}{s} \frac{4\sigma(\Delta T_a)}{r_{max}^2}, \quad (4.7)$$

onde a função de sensibilidade s foi determinada a partir do ajuste de um polinômio de terceira ordem aos dados obtidos.

A Figura 4.7 mostra o gráfico de $\sigma_1(S_L^\circ)$ em função de ϕ para as medições realizadas com metano e com Gás Natural. Pode-se perceber que o método é mais preciso para a razão de equivalência $\phi = 1,10$. Nesse caso foi obtido um erro de ± 1 cm/s para ambos combustíveis. Para chamas mais ricas ou mais pobres o erro aumenta, sendo que o maior valor obtido foi de $\pm 3,1$ cm/s para $\phi = 1,5$ para chamas de gás natural e ar. Segundo Hermanns, 2007, o erro médio (considerando as incertezas para todas as razões de equivalência) obtido

para a velocidade de chama adiabática utilizando-se o método do fluxo de calor é, em geral, menor que 0,4 cm/s para 95% de intervalo de confiança (utilizando-se o dobro do desvio padrão). O presente trabalho, utilizando o mesmo intervalo de confiança, obteve um erro médio de aproximadamente $\pm 1,21$ cm/s para chamas da pré mistura entre metano e ar e de aproximadamente $\pm 1,28$ cm/s para gás natural e ar, o que configura um erro relativamente alto para os padrões do método.

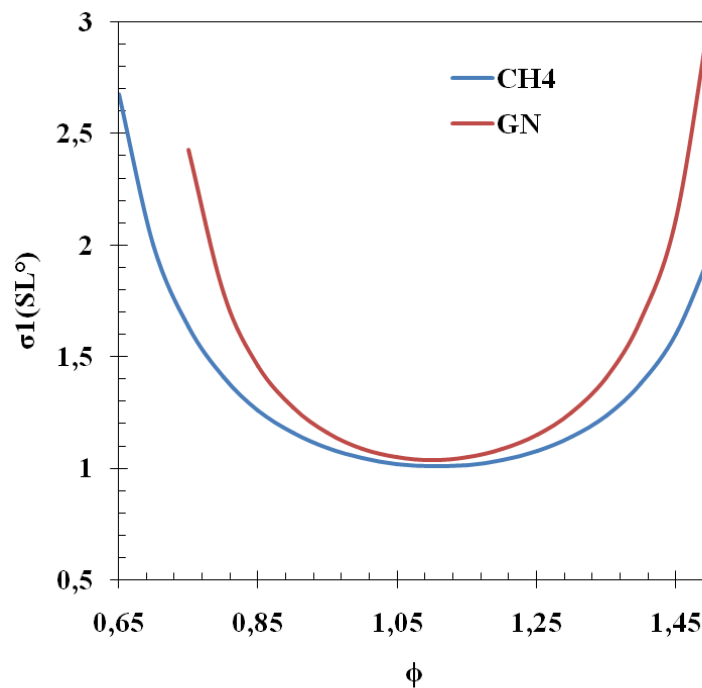


Figura 4.7 - Incerteza nas medições de velocidade de chama $\sigma_1(S_L)$ em cm/s em função da razão de equivalência ϕ para pré misturas de metano e ar (azul) e gás natural e ar (vermelho)

O erro na velocidade de chama devido aos controladores de vazão, $\sigma_2(S_L)$, pode ser estimado por derivadas parciais conforme

$$\sigma_2(S_L) = \frac{\sigma(\dot{Q}_{CH_4}) + \sigma(\dot{Q}_{ar})}{A} \quad (4.7)$$

resultando no valor médio de $\pm 0,18$ cm/s para chamas de metano/ar e $\pm 0,2$ cm/s para chamas de gás natural/ar onde $\Delta\dot{Q}_{CH_4}$ e $\Delta\dot{Q}_{ar}$ são as incertezas de medição para os medidores de metano e ar fornecidas pelo fabricante e apresentada na seção 3.1.2.

Por fim, a incerteza total da velocidade de chama $\sigma(S_L)$ pode ser determinada por

$$\sigma(S_L) = \sqrt{[\sigma_1(S_L)]^2 + [\sigma_2(S_L)]^2} \quad (4.8)$$

conforme mostra o apêndice A.

Dessa forma obteve-se o valor $\sigma(S_L) = \pm 1$ cm/s para $\phi = 1,05$ e $\sigma(S_L) = \pm 2,7$ cm/s para $\phi = 0,65$, o que caracteriza respectivamente a menor e a maior incerteza nas medições de metano e ar. No caso das chamas de GN a menor incerteza foi $\sigma(S_L) = \pm 1,1$ cm/s para $\phi = 1,1$ e a maior $\sigma(S_L) = \pm 1,5$ cm/s para $\phi = 3,1$.

Para a incerteza relativa à razão de equivalência $\sigma(\phi)$ foi aplicada a variação devido aos instrumentos, que pode ser estimada também por derivadas parciais conforme

$$\sigma(\phi) = \frac{\Delta \dot{Q}_{CH_4}}{\dot{Q}_{CH_4}} + \frac{\Delta \dot{Q}_{ar}}{\dot{Q}_{ar}} \quad (4.9)$$

resultando no valor de $\pm 0,014$ para $\phi = 1$, tanto para metano quanto para o gás natural, em medições não menores do que 10% da escala máxima dos medidores de vazão.

Para razões de equivalência referentes a chamas pobres e ricas, para metano, as incertezas aumentam consideravelmente chegando a 2,8 % em $\phi = 0,65$ e 2,1 % em $\phi = 1,5$. Para as medições com gás natural obteve-se 2,1 % em $\phi = 0,75$ e 19% em $\phi = 1,5$. Esse aumento na incerteza para chamas pobres e ricas decorre da dificuldade inerente aos medidores/controladores em avaliar corretamente os valores de vazão para velocidades muito baixas ou muito altas em relação à escala máxima.

5 RESULTADOS

Nesta seção, medições de velocidade de chama laminar adiabática para as pré misturas metano/ar e gás natural/ar realizadas com o método de fluxo de calor e seguindo a metodologia descrita na seção 3.2, são apresentadas e comparadas com os resultados recentes encontrados na literatura. A primeira parte dedica-se as medições de metano/ar para $\phi = 0,65$ até $\phi = 1,5$ mantendo a temperatura dos gases não queimados tipicamente em 298 K com uma variação máxima medida de ± 3 K. A temperatura do banho térmico da placa do queimador foi mantida em 358 ± 1 K. Na parte restante, medições das velocidades de chamas laminares adiabáticas de gás natural/ar - para as mesmas condições de temperatura - são apresentadas para ϕ variando de 0,7 até 1,5 e comparadas com as medidas para metano/ar. As barras de erro em todas as medições representam um intervalo de confiança de 95%.

5.1. Pré Mistura Metano/Ar

A velocidade da queima de chamas planas laminares adiabáticas da pré-mistura entre metano e ar vêm sendo medidas, ao longo dos anos, por diversos autores. A grande variedade de técnicas empregadas pelos investigadores, algumas delas descritas na seção 2.1, cada qual com seus métodos de correção e análises acarretou em uma grande variação nesses resultados. Pode-se notar que a velocidade de chama S_L° para uma mistura estequiométrica varia aproximadamente entre 35 e 45 cm/s para as mesmas condições iniciais de temperatura e pressão.

Medidas mais recentes de velocidade de chama, feitas com novos modelos de correção para efeitos de estiramento de chama - como o proposto por van Maaren e de Goey, 1994a - e o uso de técnicas em que a extrapolação dos resultados não se faz necessária - como o caso do método do fluxo de calor - apresentam dados mais consistentes onde os resultados de S_L° para chamas de metano e ar parecem convergir para o valor aproximado de 36 cm/s com variações típicas da ordem de ± 1 cm/s. A Tabela 5.1 ilustra essa situação mostrando os valores encontrados por diversos autores - para a razão estequiométrica - utilizando diferentes técnicas. Essa convergência pode ser percebida a partir do ano de 1994.

Tabela 5.1 - Valores de velocidade de chama adiabática de metano e ar na razão estequiométrica encontrados na literatura e em ordem cronologia de obtenção.

Autor	Técnica	S_L° (cm/s)
Günthere Janisch, 1972	Queimador de chama plana	41,5
Wu e Law, 1984	Queimador de Bunsen	39,2
Egolfopoulos et. al. 1990	Jatos Opostos	40,0
Law et. al., 1993	Jatos Opostos	40,5
Van Marren et. al., 1994	Fluxo de Calor	37,0
Clarke et. al., 1995	Reator a Volume Constante	36,8
Chaoet. al., 1997	Jatos Opostos	34,9
Vagelopouloset. al., 1994	Jatos Opostos	36,7
Guet. al., 2000	Reator a Volume Constante	36,8
Bosschaart, 2002	Fluxo de Calor	35,7
Hermanns, 2007	Fluxo de Calor	36,4
Goswamiet. al., 2013	Fluxo de Calor	35,9

Conforme descrito na seção 2.2.3, após a obtenção dos perfis de temperatura da chama, o parâmetro parabólico α é posto em um gráfico em função das velocidades S_L dos gases e. Interpolando a curva ajustada, a velocidade de queima adiabática S_L° pode ser encontrada para $\alpha = 0$. Este procedimento foi repetido para uma série de razões de equivalência, originando um conjunto de valores de velocidades em função de ϕ , devidamente tabulados no apêndice D. A Figura 5.1 mostra os resultados obtidos, para a pré mistura entre metano e ar na temperatura de 298 K e pressão de 1,0 atm.

As incertezas na razão de equivalência, representadas na Figura 5.1 por barras de erro horizontais, foram calculadas conforme Equação 4.8 considerando as incertezas nas medições das vazões de combustível e ar. Devido ao fato de a vazão de ar ser, em geral, dez vezes maior que a vazão de combustível, as incertezas do respectivo medidor/controlador são dominantes. Para a razão estequiométrica a incerteza obtida foi da ordem de 1,4% enquanto que para chamas muito pobres ou muito ricas a incerteza aumenta consideravelmente, podendo chegar a de 2,8% para $\phi = 0,65$.

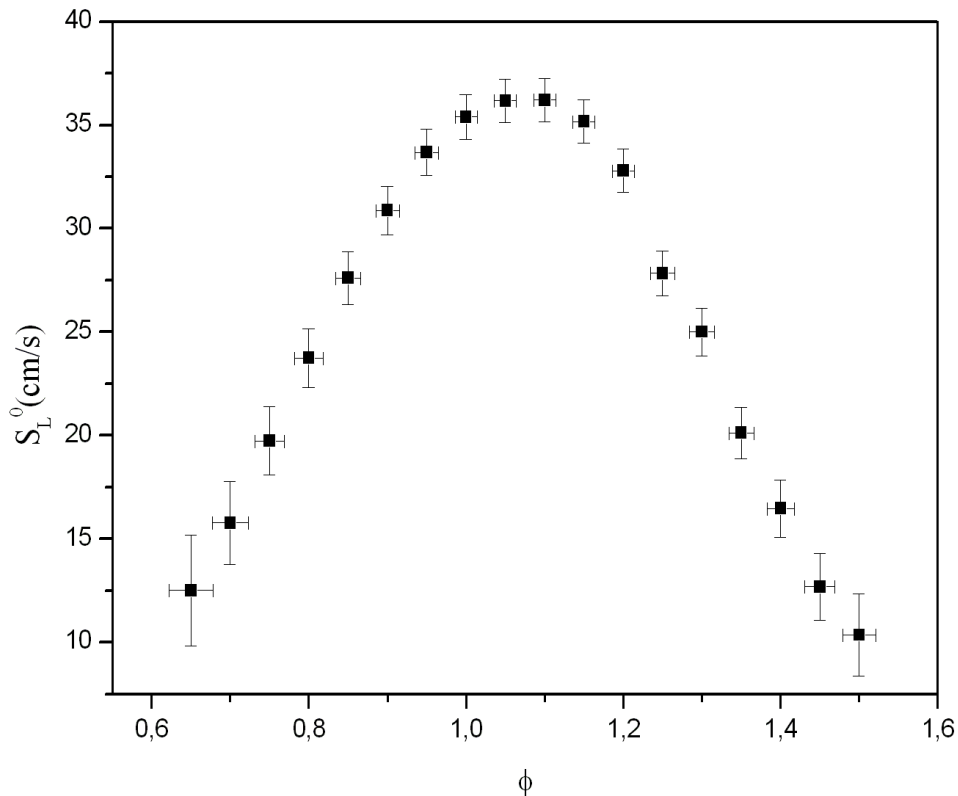


Figura 5.1 - Valores obtidos para a velocidade de chama plana adiabática S_L^0 (cm/s) em função da razão de equivalência ϕ para a pré mistura metano/ar na temperatura inicial de 298 K. $S_L^0 = 35,4$ cm/s para $\phi = 1$

As incertezas totais da velocidade de chama, representadas no gráfico pelas barras verticais, surgem a partir da dispersão remanescente nos valores de temperatura (após as correções apresentadas na seção 4) devido, principalmente, a variação na posição axial dos termopares no interior da placa perfurada. Além disso, existe ainda uma contribuição para as incertezas em S_L^0 devida aos erros relativos aos aparelhos de medição de vazão dos gases. Tal contribuição é calculada por meio da Equação 4.7 e, apesar de pequena ($\sim 0,2$ cm/s), foi levada em conta na obtenção da incerteza total em S_L^0 que se manteve na ordem de ± 1 cm/s para $\phi = 1$ atingindo um valor de $\pm 2,7$ cm/s para $\phi = 0,65$ e $\pm 1,97$ cm/s para $\phi = 1,5$.

Na comparação com resultados encontrados na literatura, que fazem uso do método do fluxo de calor, pode-se perceber que os valores obtidos se encontram dentro da dispersão em toda a gama de riquezas medida. O valor $S_L^0 = 35,4 \pm 1$ cm/s para a razão estequiométrica possui valor absoluto e margem de erro dentro dos padrões do método do fluxo de calor assegurada a confiabilidade de 95% com a utilização de dois desvios padrão no cálculo das

incertezas, o que permite validar a bancada construída garantindo certa confiabilidade para medições de diferentes tipos de misturas combustíveis.

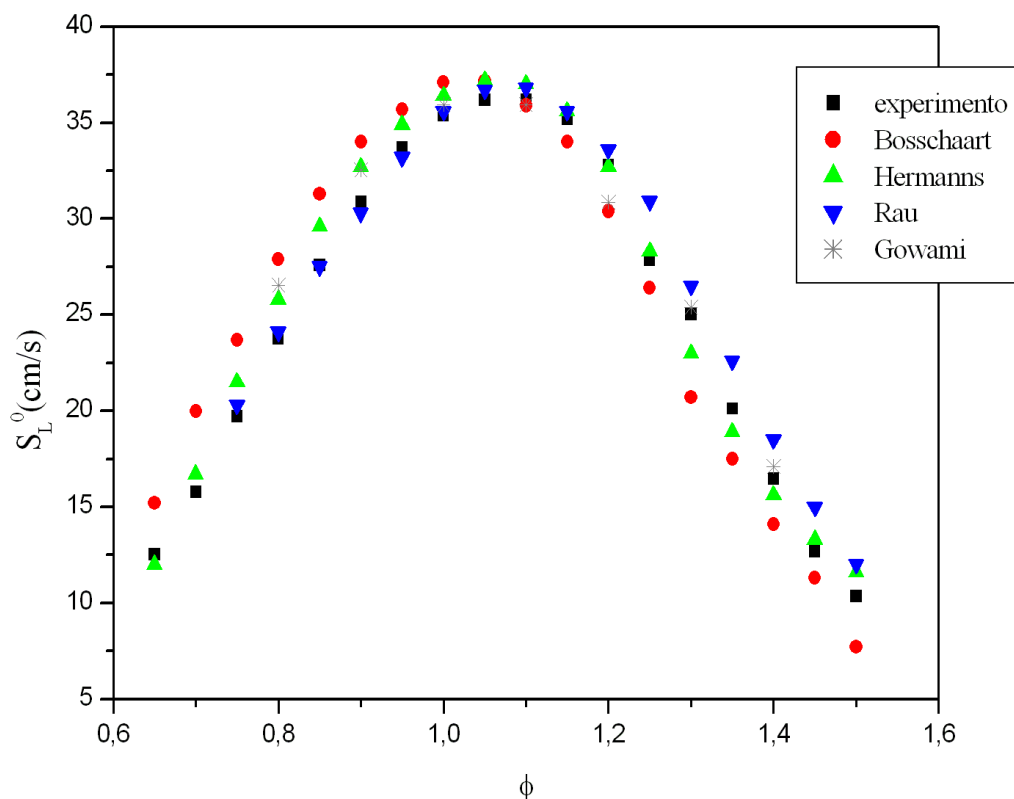


Figura 5.2 - Medições recentes de velocidade de chama plana laminar adiabática S_L^0 (Bosschaart e de Goey, 2004; Hermanns et. al, 2010; Rau, <http://cms.heatfluxburner.org/>; Gowami et. al, 2013) em função da razão de equivalência ϕ , comparadas com as obtidas no presente trabalho

A Figura 5.3 apresenta algumas imagens de chamas obtidas para a pré mistura metano e ar para determinadas razões de equivalência. Pode-se perceber que, para misturas muito pobres a chama apresenta uma forma visivelmente não plana. De fato, para chamas pobres e ricas, existe certa dificuldade na realização das medições devido a instabilidade da chama sobre o queimador. Para misturas em torno da proporção estequiométrica uma chama bem definida e visualmente plana é facilmente estabilizada sobre a placa perfurada. Para misturas ricas, uma característica evidente é a difusividade apresentada pela chama devido à sobra de combustível.

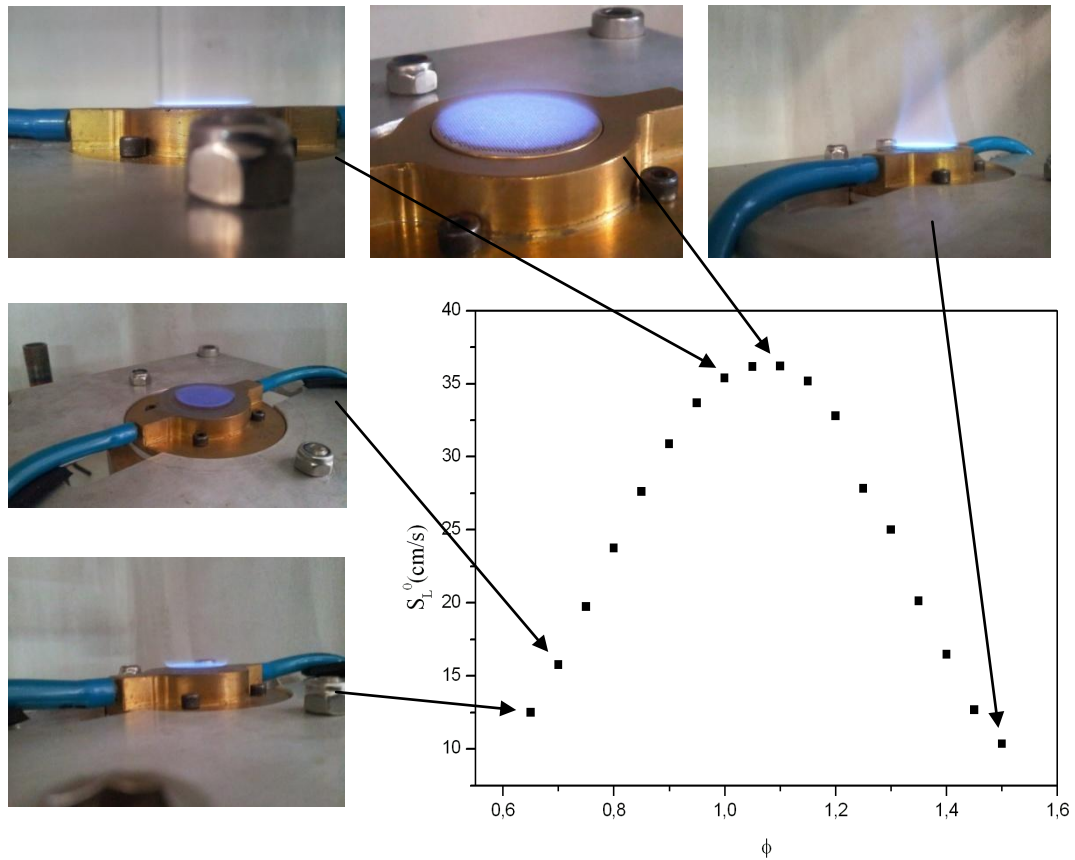


Figura 5.3 - Fotos representativas de chamas obtidas para diferentes razões de equivalência

5.2. Pré Mistura Gás Natural/Ar

O gás natural contém principalmente metano (tipicamente 65-90 % ou mais, em volume), juntamente com hidrocarbonetos mais pesados como etano, propano e butano, componentes gasosos inertes como N_2 , CO_2 , vapor de água e traços de inúmeros outros compostos. A composição do gás natural varia muito de uma fonte para outra, em termos de frações desses hidrocarbonetos. Por ser um parâmetro determinante para o comportamento de reações em câmaras de combustão, ditando a forma e a estabilidade das chamas bem como fornecendo valores de referência para a validação de mecanismos detalhados de combustão, a velocidade de chama laminar adiabática dos gases combustíveis disponíveis no local de aplicação é um fator que faz jus a necessidade de técnicas precisas de medição. O fato de medidas de velocidade de chama de gás natural não serem numerosas na literatura contribui como motivação para o presente estudo.

Medições de S_L° para chamas da pré mistura gás natural/ar foram realizadas para diferentes riquezas seguindo a mesma metodologia das medidas para metano. Os resultados podem ser vistos na Figura 5.3. O GN utilizado segue a composição média exposta na tabela 3 sendo composto principalmente por metano (91,8%) e etano (5,58%) e todas as medidas foram feitas para uma temperatura de 298 ± 3 K. Para a razão estequiométrica $\phi = 1$ obteve-se $S_L^\circ = 34,8$ cm/s. A velocidade máxima de $S_L^\circ = 37,4$ cm/s foi obtida para $\phi = 1,1$. Os valores $S_L^\circ = 18,4$ cm/s e $S_L^\circ = 14,9$ cm/s correspondem respectivamente as velocidades encontradas para as chamas mais pobre ($\phi = 0,75$) e mais rica ($\phi = 1,5$) medidas.

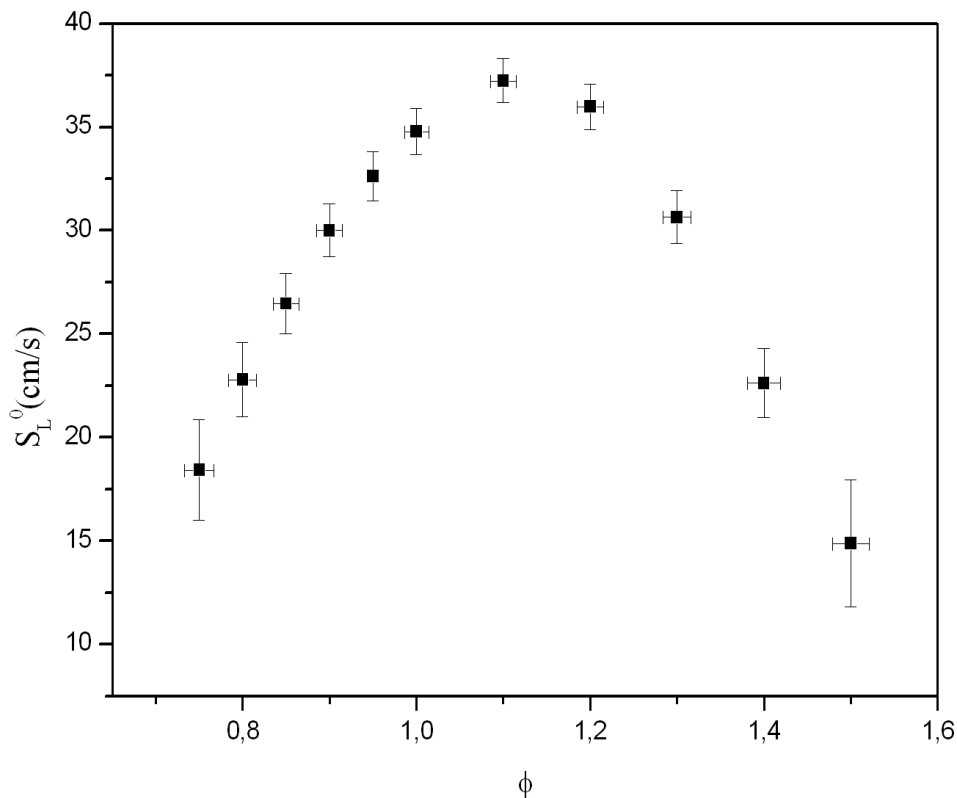


Figura 5.3 - Medidas da velocidade de chama laminar adiabática em função da razão de equivalência para a pré mistura gás natural/ar na temperatura inicial de 298 K. Velocidade máxima $S_L^\circ = 37,2 \pm 1,1$ cm/s para $\phi = 1,1$. Para a razão estequiométrica $\phi = 1$ o valor encontrado foi $S_L^\circ = 34,8 \pm 1,1$ cm/s

As barras de erros horizontais representam os erros relacionados a razão de equivalência devido as incertezas nos medidores de vazão. Novamente, como esperado, as incertezas aumentam gradativamente conforme afasta-se da razão de equivalência, sendo

2,1% o erro máximo ($\phi = 0,75$) e 1,4% o erro mínimo ($\phi = 1,1$). Para $\phi = 1$ a incerteza encontrada foi de 1,5%.

Para as incertezas totais na velocidade de chama $\sigma(S_L)$, correspondentes as barras verticais, novamente o fator dominante foram os erros relacionados às diferenças residuais de temperatura $\sigma_1(S_L)$ com um valor máximo de $\pm 3,1$ cm/s para $\phi = 1,5$ e um valor mínimo de ± 1 cm/s para $\phi = 1,1$. Para a razão estequiométrica foi encontrado $\sigma_1(S_L) = \pm 1,1$ cm/s. O erro na velocidade dos gases relacionado aos medidores/controladores de vazão variam entre $\pm 0,12$ cm/s ($\phi = 1,5$) e $\pm 0,24$ cm/s ($\phi = 1,1$), o que não gera diferença significativa nas incertezas totais da velocidade de chama.

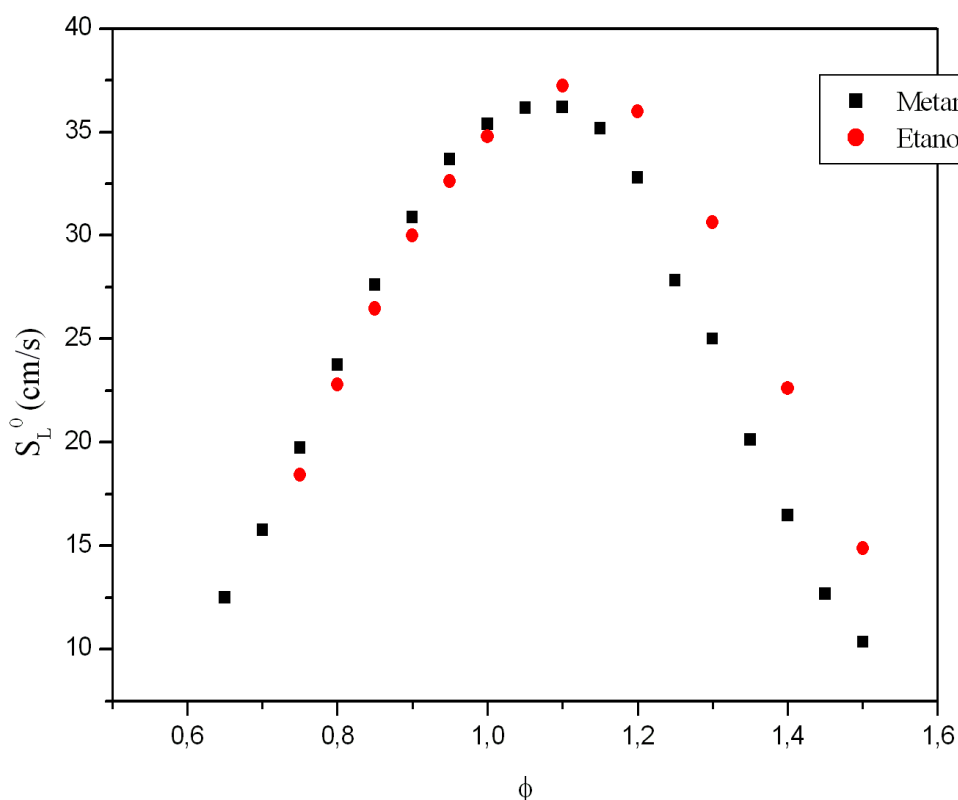


Figura 5.4 - Comparação da velocidade de chama laminar adiabática em função da razão de equivalência entre metano e gás natural. Diferença média de aproximadamente 1 cm/s para ϕ entre 0,75 e 1. Para ϕ de 1,1 à 1,5 diferença média de 4,5 cm/s

Conforme exposto por Konov et. al., 2011 e van Lipzig et. al, 2011, a velocidade de chama da pré mistura etano/ar possui valores maiores (41-46 cm/s) em relação a velocidade da pré mistura de metano puro e ar (34-37 cm/s). Logo, a adição de etano em misturas de

metano/ar promove um acréscimo na velocidade de chama. Comparando os resultados de velocidade de chama de gás natural/ar com os valores encontrados para metano/ar (Figura 5.4) pode-se perceber que as diferenças são muito pequenas para chamas pobres enquanto que, a partir da razão estequiométrica, para pré misturas mais ricas em combustível o valor de S_L° aumenta consideravelmente. Para $\phi = 0,75$ até $\phi = 1$ a diferença média é aproximadamente 1 cm/s enquanto que para $\phi = 1,1$ até $\phi = 1,5$ essa diferença média aumenta para 4,5 cm/s.

O mesmo comportamento é evidenciado por Kishore et. al., 2008, para velocidades de chama de uma mistura combustível/ar com 75% de metano e 25% de etano (% em volume de combustível) para uma temperatura de 307 K para os gases não queimados. Portanto, o resultado encontrado neste estudo era esperado uma vez que o gás natural utilizado possui em média 5,58% de etano, conforme já mencionado.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

No presente trabalho, o método do fluxo de calor foi apresentado e uma bancada de trabalho foi projetada e construída para fins de medições de velocidade de chama plana laminar adiabática empregando-se a técnica descrita. Uma série de medições foram realizadas para as pré misturas de metano/ar e gás natural/ar para razões de equivalência variando de 0,65 até 1,5 com um intervalo de confiança de 95%. A temperatura inicial dos gases foi mantida em 298 ± 3 K e os experimentos foram realizados nas condições atmosféricas de pressão.

Possíveis fontes de erro em S_L° foram analisadas e atribuídas, principalmente, a variações nas medições de temperatura devido a diferenças no posicionamento dos termopares no interior da placa perfurada. Uma correção para tais diferenças foi aplicada, resultando em menores incertezas de medição. É possível concluir que a incerteza em S_L° devido às dispersões restantes nas medições dos termopares (ΔT_a) após as correções é menor para razões de equivalência próximas à estequiométrica. Para a pré mistura metano/ar em $\phi = 1$ foi obtida uma incerteza típica de ± 1 cm/s enquanto que para $\phi = 0,65$ e $\phi = 1,5$ a incerteza aumenta para valores da ordem de ± 2 cm/s. No caso da pré mistura gás natural/ar, para $\phi = 1,5$ a incerteza medida chegou a $\pm 3,1$ cm/s.

As incertezas típicas para os dois combustíveis estudados são praticamente iguais, pois o gás natural é formado basicamente por metano (a liberação de calor por parte das respectivas chamas é semelhante em todo o intervalo de riqueza medido). Para uma incerteza geral em S_L° , a influência dos medidores/controladores ficou em torno de $\pm 0,2$ cm/s, não afetando significativamente os resultados.

A comparação com a literatura mostra que os valores de velocidade de chama laminar adiabática, obtidos com a bancada do presente estudo, são consistentes com os resultados de outros autores também obtidos com a utilização do método do fluxo de calor. Para medições recentes com metano, pode ser visto claramente que os resultados convergem para um valor de cerca de 36 cm/s para misturas estequiométricas, o que é mais baixo do que a maioria das medições mais antigas - realizadas com diferentes técnicas - e dentro da margem de erro do valor de $35,4 \pm 1$ cm/s encontrado neste trabalho. No entanto, os desvios são ainda relativamente grandes para misturas pobres e ricas, para as quais a precisão da bancada construída diminui significativamente.

Os resultados das medições de gás natural são de difícil comparação em virtude da escassez de dados na literatura que concorde com a composição do combustível utilizado, que varia significativamente de região para região. No entanto, os valores seguem o padrão evidenciado por Kishore et. al., 2008, onde, em comparação com o metano puro, a adição de etano (segundo principal composto do gás natural utilizado neste trabalho, depois do metano) no combustível, promove um significativo aumento das velocidades de chama somente para razões de equivalência maiores que 1.

Devido ao fato de a condição adiabática poder ser aproximada, o método do fluxo de calor oferece uma excelente maneira de produzir uma chama de referência bem definida, promovendo a obtenção de medidas com baixas incertezas experimentais uma vez que não necessita de extrapolações. No entanto, o presente trabalho obteve valores de incertezas acima dos comumente obtidos para o método, que são geralmente da ordem ou menores que $\pm 0,5$ cm/s. Uma análise dos dados mostra que esse aumento na incerteza é originário das diferenças típicas de temperatura, entre os valores medidos pelos termopares e a curva ajustada, que permanecem mesmo após a realização das correções.

Portanto, para trabalhos futuros, sugere-se que um maior esforço deva ser despendido para assegurar uma melhor fixação dos termopares, de modo a promover um bom contato térmico entre os sensores e a placa, e também para assegurar o correto posicionamento dos mesmos no interior da placa, mantendo a mesma altura em todos os casos. Com a bancada validada é possível o estudo de diferentes misturas de gases combustíveis e inertes simulando combustíveis de diversas origens como o gás de síntese, biogás e outros combustíveis alternativos de interesse. As medições também vão permitir a comparação de diversos mecanismos cinéticos através de simulações unidimensionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.A. Konnov, R.J. Meuwissen, L.P.H. de Goey, **The temperature dependence of the laminar burning velocity of ethanol flames**. Proceedings of the Combustion Institute 33 - 1011–1019, 2011.

A. Clarke, R. Stone, and P. Beckwith. **Measuring the laminar burning velocity of methane/diluent/air mixtures within a constant-volume combustion bomb in a micro-gravity environment**. Journal of the Institute of Energy, 68:130–136, September 1995.

Beckwith, T.G.; Marangoni, R.D. and Lienhard, J.H., **Mechanical Measurements**, Prentice Hall 5th ed., 1995.

Bosschaart, K.J. **Analysis of the Heat Flux Method for Measuring Burning Velocities**. Ph.D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2002.

Bosschaart, K.J. and de Goey, L.P.H., **Detailed analysis of the heat-flux method for measuring burning velocities**. Combust. Flame 132(1–2):170–180, 2003.

Bosschaart, K.J. and de Goey, L.P.H., **The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method**. Combust. Flame 136(3):261–269, 2004.

Botha, J.P. and Spalding, D.B., **The laminar flame speeds of propane/air mixtures with heat extraction from the flame**. Proc. R. Soc. Lon. ser-A 255(1160):71–95, 1954.

B.H. Chao, F.N. Egolfopoulos, and C.K. Law. **Structure and propagation of premixed flame in nozzle-generated counterflow**. Combust. Flame, 109:620–638, 1997.

Coelho, P.; Costa, M.; **Combustão**, Edições Orion, 1^o edição, 2007.

Davis, S.G. and Searby, G., **The use of counterflow flames for the evaluation of burning velocities and stretch effects in hydrogen/air mixtures.** Combust. Sci. Technol. 174:93–110, 2002.

De Goey, L.P.H., vanMaaren, A. and Quax, R.M., **Stabilization of adiabatic premixed laminar flames on a flat flame burner.** Combust. Sci. Technol. 92:201–207, 1993.

De Lange, H. C., de Goey, L. P. H., **Two-dimensional methane/air flames.** Combust. Sci. and Tech. 92, 4-6, 4236 – 1993.

Dong, Y., Vagelopoulos, C.M., Spedding, G. and Egolfopoulos, F.N., **Measurements of laminar flame speeds through digital particle image velocimetry: Mixtures of methane and ethane with hydrogen, oxygen, nitrogen, and helium.** Proc. Combust. Inst. 29:1419–1426, 2002.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE; **Balanco Energético Nacional, Ano Base 2010**, https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf, Acessado em 10/09/2013

Echekki T, Mungal MG. **Flame speed measurements at the tip of a slot burner: Effect of flame curvature and hydrodynamic stretch.** Symp. Combust. Proc.; 23:455e61, 1990.

Egolfopoulos, F.N., Cho, P. and Law, C.K., **An experimental and computational study of the burning rates of ultra-lean to moderately-rich H₂-O₂-N₂ laminar flames with pressure variations.** Proc. Combust. Inst. 23:333-340, 1990

Egolfopoulos, F.N., Cho, P. and Law, C.K., **Laminar flame speeds of methane-air mixtures under reduced and elevated pressures.** Combust. Flame 76(3–4):375–391, 1989.

Goswami, M. Derks, S. C. R. Coumans, K. Slikker, W. J. Oliveira M. H. Bastiaans, R. J. M. Luijten, C. C. M. de Goey, L. P. Konnov, A. A. **The effect of elevated pressures on**

the laminar burning velocity of methane + air mixtures. Combustion and Flame 160 1627–1635, 2013.

Gu, X.J., Haqa, M.Z., Lawes, M. and Woolley, R., **Laminar burning velocity and markstein lengths of methane–air mixtures.** Combust. Flame 121(1–2):41–58, 2000.

Halter, F., Chauveau, C., Djebaili-Chaumeix, N. and Gökalp, I., **Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane-hydrogen-air mixtures.** Proc. Combust. Inst. 30:201–208, 2005.

Hermanns, R.T.E. Konnov, A. A.Bastiaans,R.J.M. de Goey, L.P.H.Lucka,K. Köhne, H. **Effects of temperature and composition on the laminar burning velocity of CH₄/H₂/O₂/N₂ flames,** Fuel, Volume 89, Issue 1, pages 114-121, 2010.

Hermanns, R.T.E. Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, 2007.

J.P.J. van Lipzig a, E.J.K. Nilsson b, L.P.H. de Goey a, A.A. Konnov. **Laminar burning velocities of n-heptane, iso-octane, ethanol and their binary and tertiary mixtures.** Fuel 90, 2773–2781, 2011.

Kuo, K.K., **Principles of Combustion**, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.

Law, C.K., Peters, N. and Rogg, B. **A compilation of experimental data on laminar burning velocities.** In **Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems**, Eds., vol. 15 of Lecture Notes in Physics. Springer-Verlag, pp. 19–31, 1993.

Law, C. K., **Combustion Physics**, Cambridge University Press, Cambridge U. K., 742 p., 2006.

Law C. K., Sung C. J. **Structure, aerodynamics, and geometry of premixed flamelets.** Prog Energy Combust. Sci.;26(4-6):459-505, 2000

L. P. H. de Goey, L. M. T. Somers, W. M. M. L. Bosch and R. M. M. Mallens, **Modeling of the Small Scale Structure of Flat Burner-Stabilized Flames**. Combust. Sci. and Tech, Vol. 104, pp. 387-400, 1995.

N. Bouvet, C. Chauveau, I. Gökalp, S.-Y. Lee, R.J. Santoro, **Characterization of syngas laminar flames using the Bunsen burner configuration**. Original Research Article International Journal of Hydrogen Energy, Volume 36, Issue 1, Pg. 992-1005, January 2011.

Parsinejad, F., **Experimental and Theoretical Studies on Flame Propagation and Burning Speeds of JP-8, JP-10 and Reformed Fuels at High Temperatures and Pressures**, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Northeastern University, Boston, 2005.

Vagelopoulos, C.M., Egolfopoulos, F.N. and Law, C.K., **Further considerations on the determination of laminar flame speeds with the counterflow twin-flame technique**. Proc. Combust. Inst. 25:1341–1347, 1994.

- a. Van Maaren, A. and de Goey, L.P.H. **Stretch and the adiabatic burning velocity of methane- and propane-air flames**, Combustion Science and Technology, 1994.
- b. Van Maaren, A. and de Goey, L.P.H., **Laser doppler thermometry in flat flames**. Combust. Sci. Technol. 99:105–118, 1994.

Van Maaren, A. Thung, D.S. and De Goey, L.P.H. **Measurement of flame temperature and adiabatic burning velocity of methane/air mixtures**. Combust. Sci. Tech., 96:327–344, 1994.

V. R. Kishore, Nipun Duhan, M.R. Ravi, Anjan Ray, **Measurement of adiabatic burning velocity in natural gas-like mixtures**. Experimental Thermal and Fluid Science 33, 10–16, 2008.

R. Günther and G. Janisch. **Measurements of burning velocity in a flat flame front**. Combust. Flame, 19:49–53, 1972.

Wu, C.K. and Law, C.K., **On the determination of laminar flame speeds from stretched flames**. Proc. Combust. Inst. 22:1941–1949, 1984.

APÊNDICE A - Análise de erro

Segundo Beckwith et. al., 1995, uma grandeza que é definida em função de outras grandezas através de uma relação funcional do tipo $z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, tem sua incerteza resultante Δz , devido às das outras grandezas, obtido conforme

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{dz}{dx_n} \cdot \Delta x_n\right)^2} \quad (\text{A. 1})$$

Esta expressão para a incerteza padrão da grandeza de saída z , também chamada de incerteza padrão combinada, é utilizada quando as grandezas de entrada $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ são medidas repetidas vezes, gerando valores médios \bar{x} e desvios padrão das médias $\sigma_{\bar{x}}$ que é dado por

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} \quad (\text{A. 2})$$

Assim, o resultado de uma série de N medições pode ser escrito como

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \quad (\text{A. 3})$$

O desvio padrão σ é uma medida que permite fornecer intervalos que quantificam a qualidade das medidas, indicando qual é a probabilidade de encontrar as medidas nesse intervalo, conforme os desvios vão se afastando do ponto de valor médio. Na Tabela A. 1 pode-se ver a quantificação do fator de confiança em relação aos intervalos limitados por valores inteiros de desvio padrão, no quadro abaixo:

Tabela A. 1 - Relação entre o intervalo da variável e a probabilidade de encontrar a medida dentro do intervalo

Intervalo	Probabilidade
$[-\sigma, +\sigma]$	68,3%
$[-2\sigma, +2\sigma]$	95,4%

Intervalo	Probabilidade
$[-3\sigma, +3\sigma]$	99,7%

Assim, praticamente todas as flutuações aleatórias dos valores medidos se situam na faixa de $\{x \pm 3\sigma\}$. Isto significa que apenas 3 dentro de 1000 medidas podem estar fora da faixa. No presente trabalho, a análise das incertezas oriundas dos desvios das temperaturas foi efetuada utilizando-se dois desvios padrão caracterizando, assim, um intervalo de confiança de 95%.

APÊNDICE B – Fator de Conversão nos Medidores de Vazão

Um fator de conversão F pode ser encontrado para corrigir a vazão obtida em um medidor calibrado para determinado gás, mas usado para medir a vazão de um outro gás. Para um medidor de vazão mássica que utiliza um princípio térmico de medição, como os utilizados neste trabalho, o fator de conversão é proporcional às propriedades do fluido para a qual o fator é calculado (2) em relação ao fluido já calibrado no controlador (1) conforme

$$F = \frac{C_{p,1}\rho_1}{C_{p,2}\rho_2}, \quad (\text{B. 1})$$

Onde C_p é o calor específico a pressão constante e ρ a massa específica.

Como a vazão \dot{Q}_1 em um medidor de fluxo de massa térmica é diretamente proporcional a $(C_p\rho)$, a equação para o cálculo da vazão convertida \dot{Q}_2 mostra-se como

$$\dot{Q}_2 = \frac{\dot{Q}_1}{F} \quad (\text{B. 2})$$

onde as vazões são dadas em litros por minuto.

O fator de conversão F para as vazões de gás natural, medidas neste trabalho com o uso de um controlador de vazão calibrado para metano, foi obtido de maneira análoga por meio de rotinas computacionais disponibilizadas pela empresa BronkhorstHigh-Tech (<http://www.fluidat.com/default.asp>) utilizando a composição média exibida na Tabela 3.2.

APÊNDICE C - Constante Geométrica

Bosschaart, 2002, demonstrou que na determinação da velocidade de chama laminar a influência da temperatura sobre a $\lambda_{p,r}$ é bastante pequena, resultando em um coeficiente de condução λ_p que é dependente apenas do coeficiente de condução λ_{br} do bronze e também de efeitos geométricos caracterizados pela constante geométrica ε conforme

$$\lambda_p = \varepsilon \cdot \lambda_{br} \quad (\text{B. 1})$$

A constante geométrica ε , que é a porosidade da placa utilizada, com furos de 0,5 mm de diâmetro e 0,7 mm de separação entre os centros foi determinada como sendo 0,362.

APÊNDICE D - Dados Tabulados

D.1 – Velocidade de Chama Laminar Adiabática S_L° Para Metano/Ar

Tabela D.1.1 - Velocidade de chama laminar adiabática para a pré mistura metano/ar para diferentes razões de equivalência com as respectivas incertezas experimentais

ϕ		S_L° (cm/s)	
0,65	$\pm 0,028$	12,5	$\pm 2,7$
0,70	$\pm 0,023$	15,8	$\pm 2,0$
0,75	$\pm 0,019$	19,7	$\pm 1,6$
0,80	$\pm 0,018$	23,7	$\pm 1,4$
0,85	$\pm 0,016$	27,6	$\pm 1,3$
0,90	$\pm 0,015$	30,9	$\pm 1,2$
0,95	$\pm 0,015$	33,7	$\pm 1,1$
1,00	$\pm 0,014$	35,4	$\pm 1,0$
1,05	$\pm 0,014$	36,2	$\pm 1,0$
1,10	$\pm 0,014$	36,2	$\pm 1,0$
1,15	$\pm 0,014$	35,2	$\pm 1,0$
1,20	$\pm 0,014$	32,8	$\pm 1,0$
1,25	$\pm 0,015$	27,8	$\pm 1,1$
1,30	$\pm 0,016$	25,0	$\pm 1,1$
1,35	$\pm 0,016$	20,1	$\pm 1,2$
1,40	$\pm 0,017$	16,5	$\pm 1,4$
1,45	$\pm 0,019$	12,7	$\pm 1,6$
1,50	$\pm 0,021$	10,4	$\pm 2,0$

D. 2 – Velocidade de Chama Laminar Adiabática S_L° Para Gás Natural/Ar

Tabela D.2.1 - Velocidade de chama laminar adiabática para a pré mistura gás natural/ar para diferentes razões de equivalência com as respectivas incertezas experimentais

ϕ		S_L° (cm/s)	
0,75	$\pm 0,021$	18,4	$\pm 2,4$
0,80	$\pm 0,019$	22,8	$\pm 1,8$
0,85	$\pm 0,017$	26,5	$\pm 1,5$
0,90	$\pm 0,016$	30,0	$\pm 1,3$
0,95	$\pm 0,015$	32,6	$\pm 1,2$
1,00	$\pm 0,015$	34,8	$\pm 1,1$
1,10	$\pm 0,014$	37,2	$\pm 1,1$
1,20	$\pm 0,015$	36,0	$\pm 1,1$
1,30	$\pm 0,015$	30,7	$\pm 1,3$
1,40	$\pm 0,016$	22,6	$\pm 1,7$
1,50	$\pm 0,019$	14,9	$\pm 3,1$

D. 3 – Medidas de temperatura dos gases não queimados

Tabela D. 3. 1 - Medidas da temperatura ambiente T_{amb} , da temperatura do banho térmico $T_{b,1}$ (referente ao banho conectado a câmara de pré mistura), e da temperatura dos gases não queimados T_u , referentes a quatro medições realizadas em dias diferentes

T_{amb} (K)	$T_{b,1}$ (K)	T_u (K)
301	298	298
305	298	302
304	298	303
300	298	298
299	298	296

APÊNDICE E – Foto da Bancada Experimental



Figura A.1 - Fotografia da bancada de trabalho evidenciando (a) os controladores/medidores de vazão, (b) os banhos termostáticos, (c) o queimador e a base de apoio (c) e (d) a capela que compõem a bancada

APÊNDICE F – Desenhos do Queimador

As características e dimensões principais das peças do queimador são mostradas nas seções seguintes. Todos os valores mencionados estão em milímetros e não existe relação de escala entre as figuras.

F.1 Cabeçote

F.1.1 Parte Superior

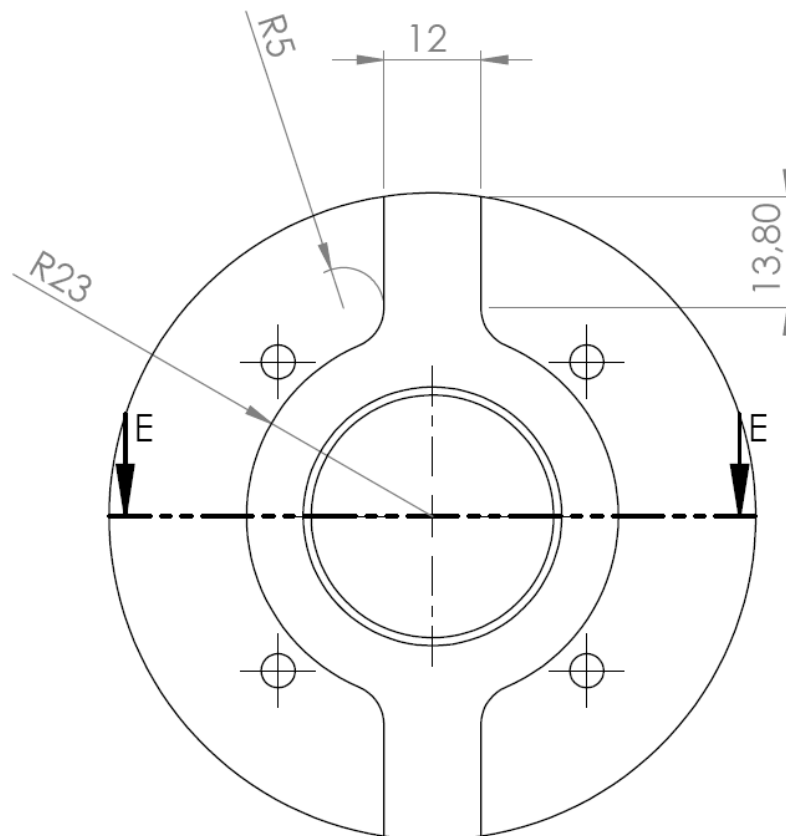


Figura F.1 - Parte superior do cabeçote - vista de cima (desenho 1)

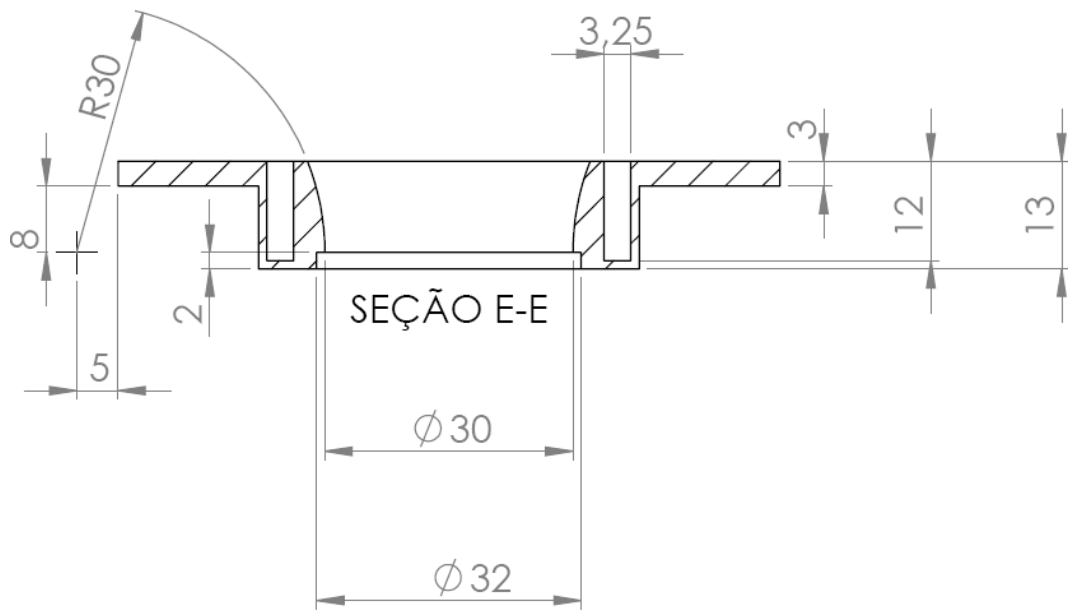


Figura F.2 - Seção transversal E-E referente a parte superior do cabeçote

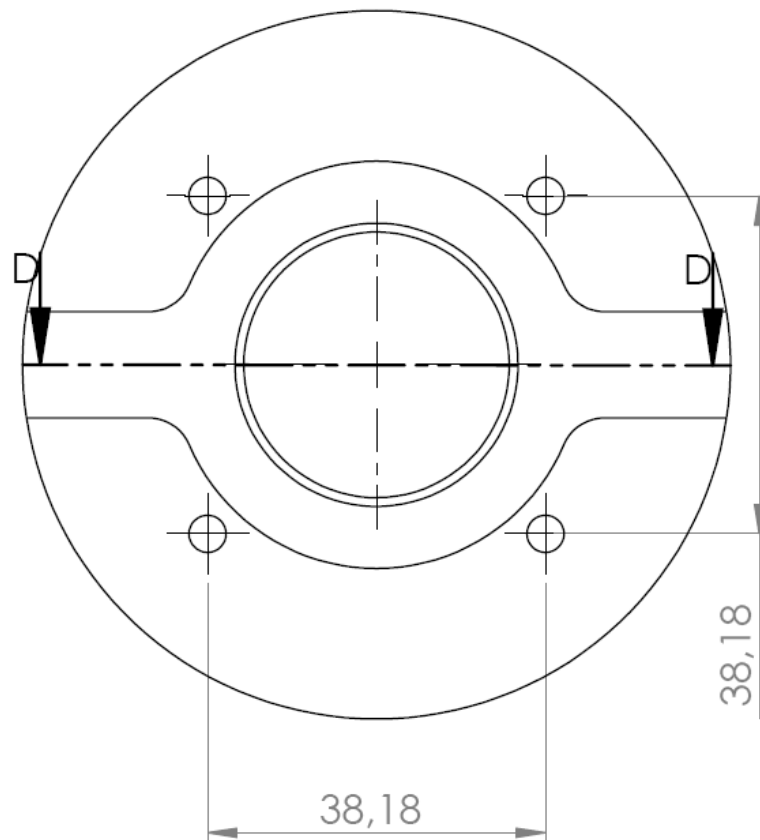


Figura F.3 - Parte superior do cabeçote – vista de cima (desenho 2)

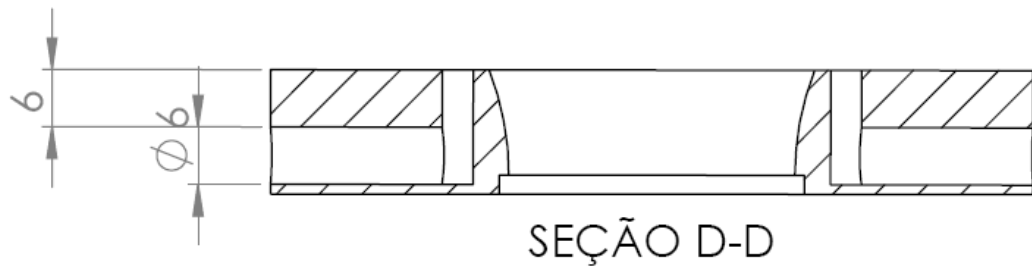
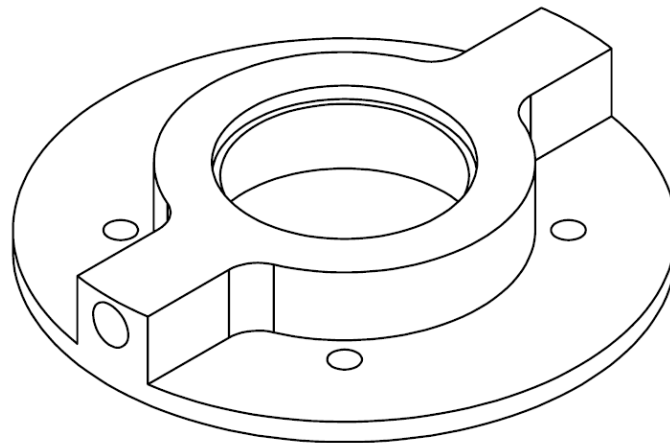
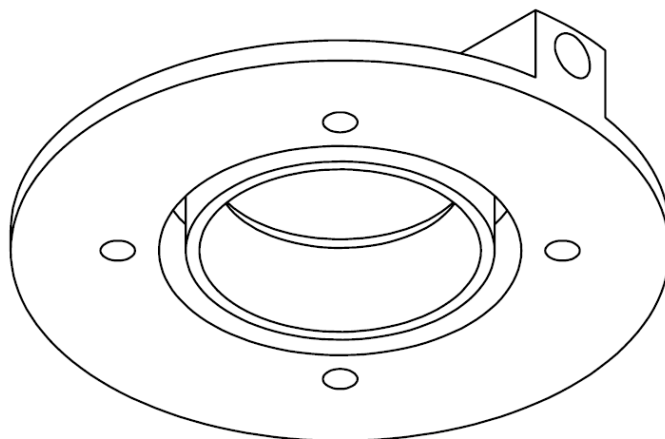


Figura F.4 - Seção transversal D-D referente a parte superior do cabeçote



a)



b)

Figura F.5: Vistas em perspectiva de (a) cima e (b) de baixo da parte superior do cabeçote

F.1.2 Parte Inferior

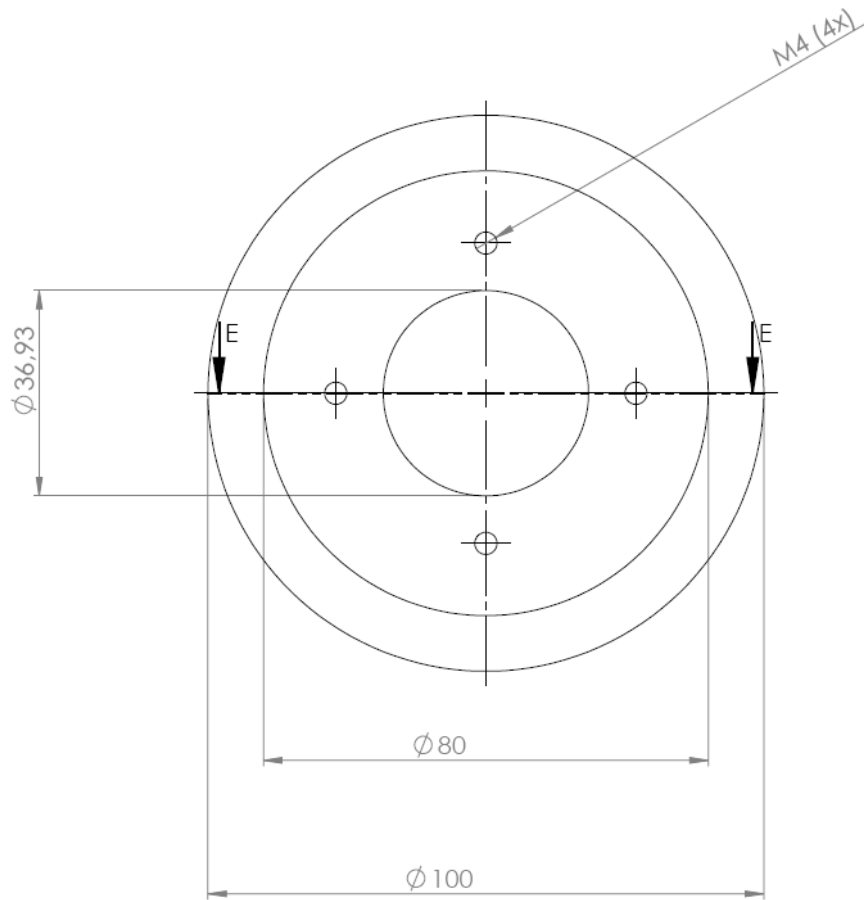


Figura F.6 - Parte inferior do cabeçote – vista de cima

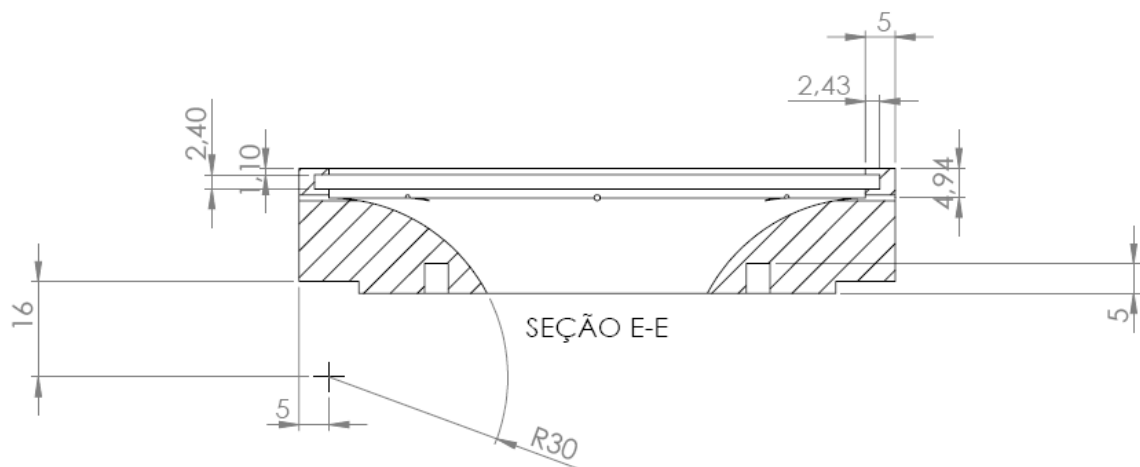


Figura F.7 - Seção transversal E-E referente a parte inferior do cabeçote

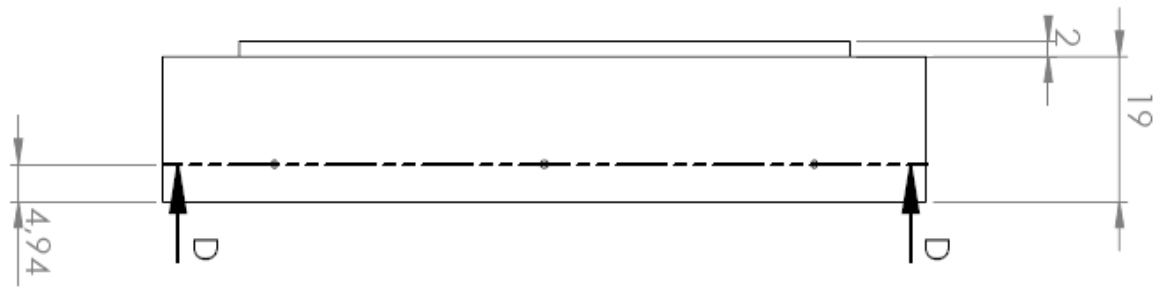


Figura F.8 - Parte inferior do cabeçote – vista de lado

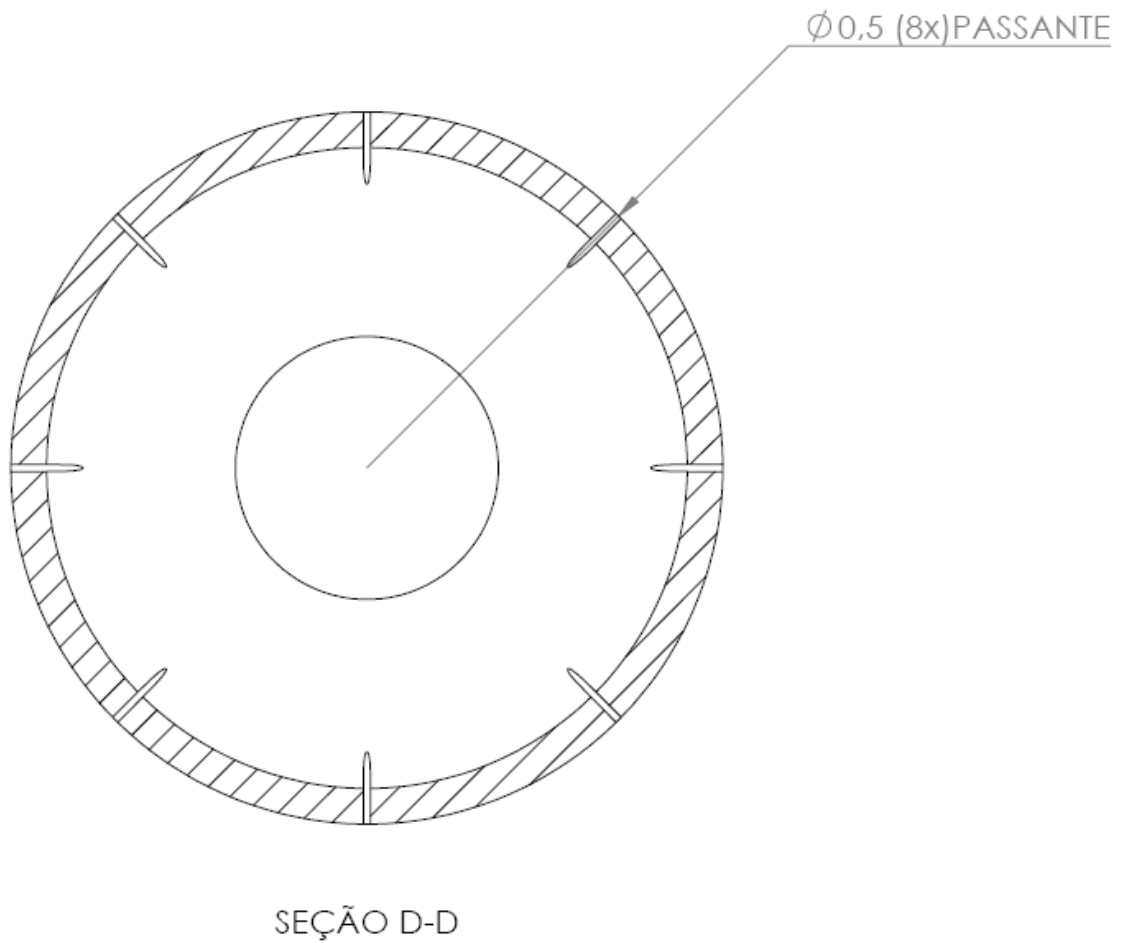


Figura F.9 - Seção transversal D-D referente a parte inferior do cabeçote evidenciando os orifícios de entrada dos termopares

F.1.3 Parte Isolante Térmica

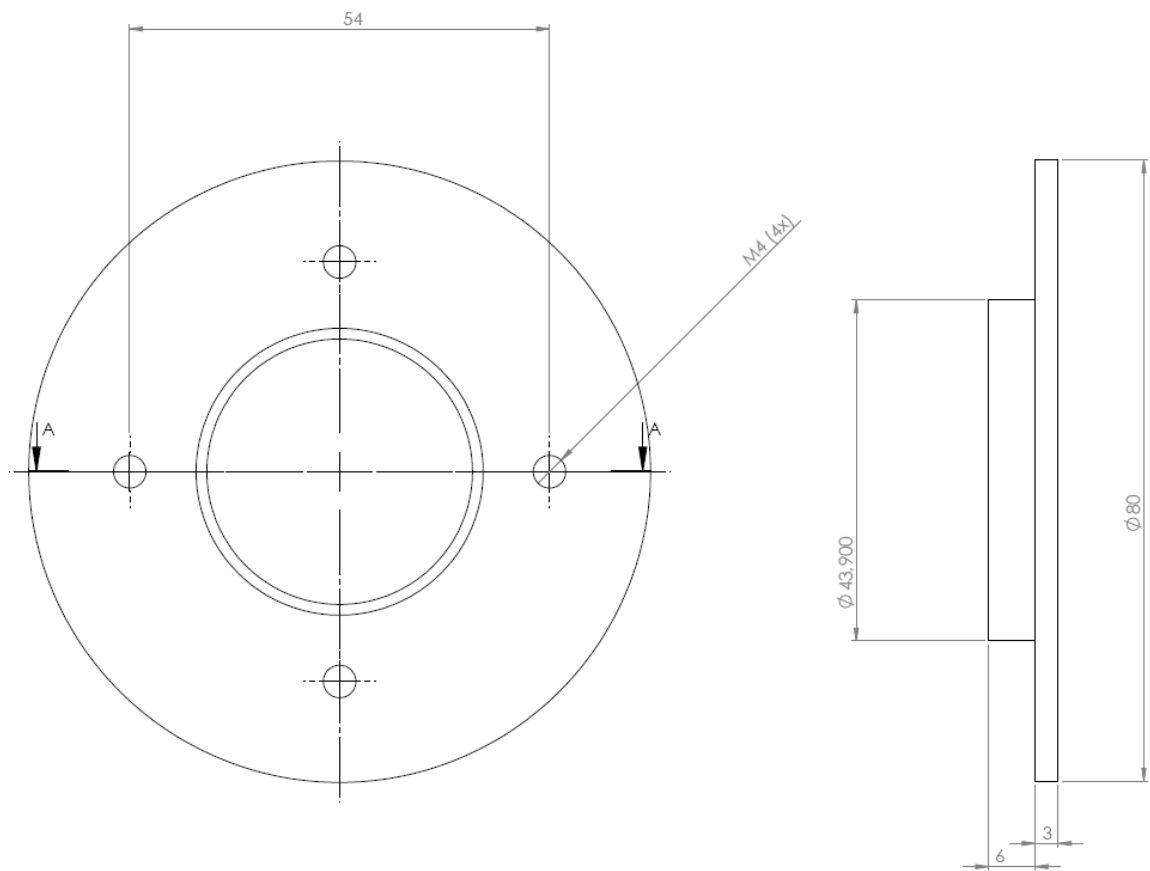


Figura F.10: Peça de material termicamente isolante vista de cima (esquerda) e de lado (direita).

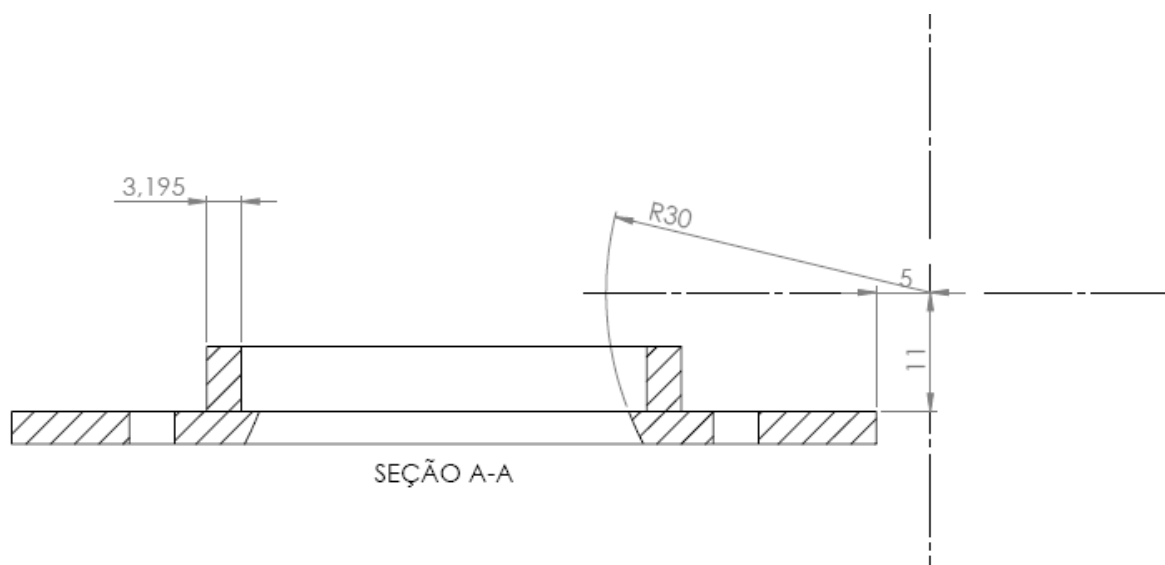


Figura F.11 - Seção transversal A-A referente a peça de material isolante

F.2 Plenum

F.2.1 Tubo Interno

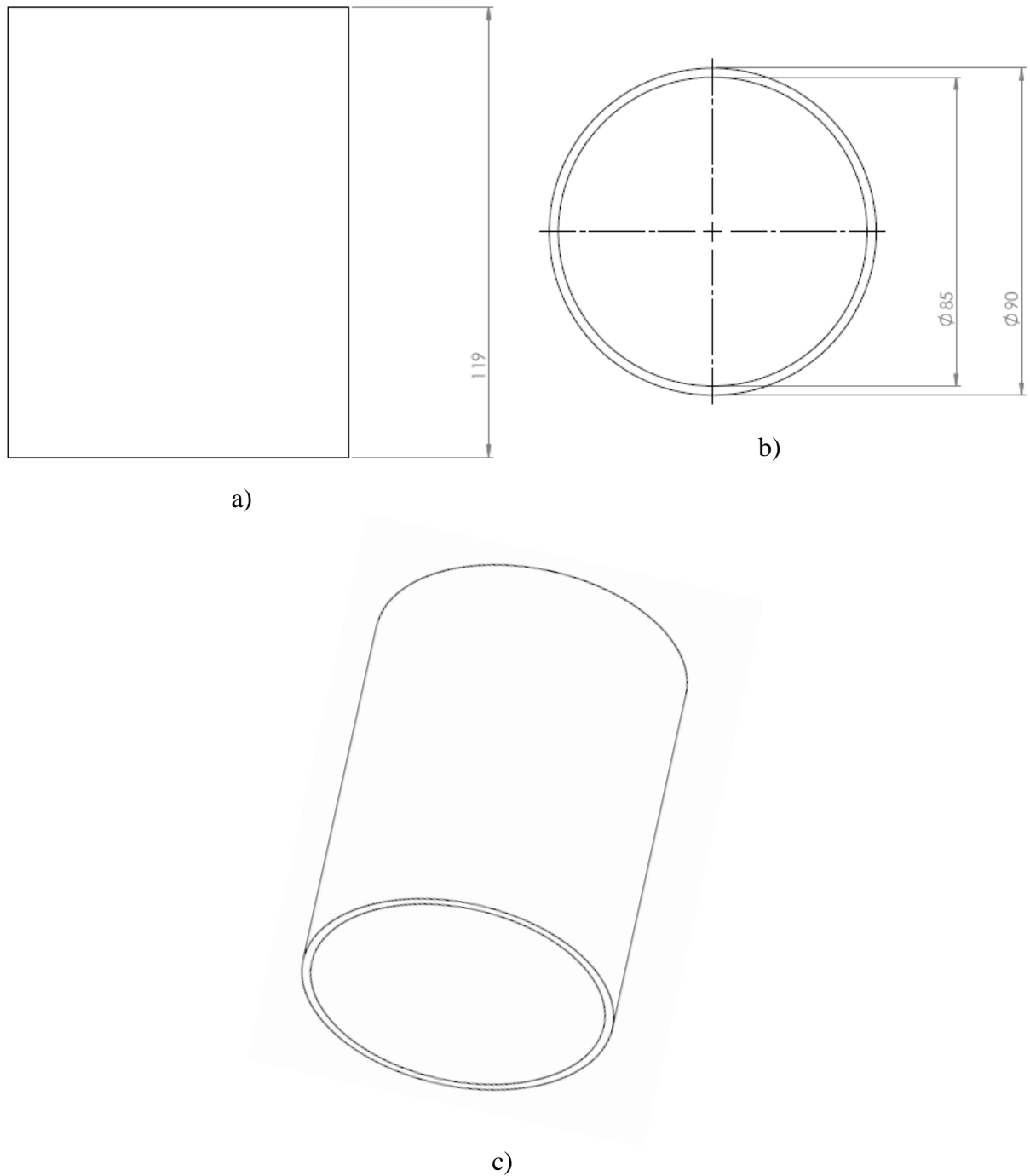


Figura F.12 - Tubo interno do plenum – (a) vista de lado, (b) de baixo e (c) em perspectiva

F.2.2 Tubo Externo

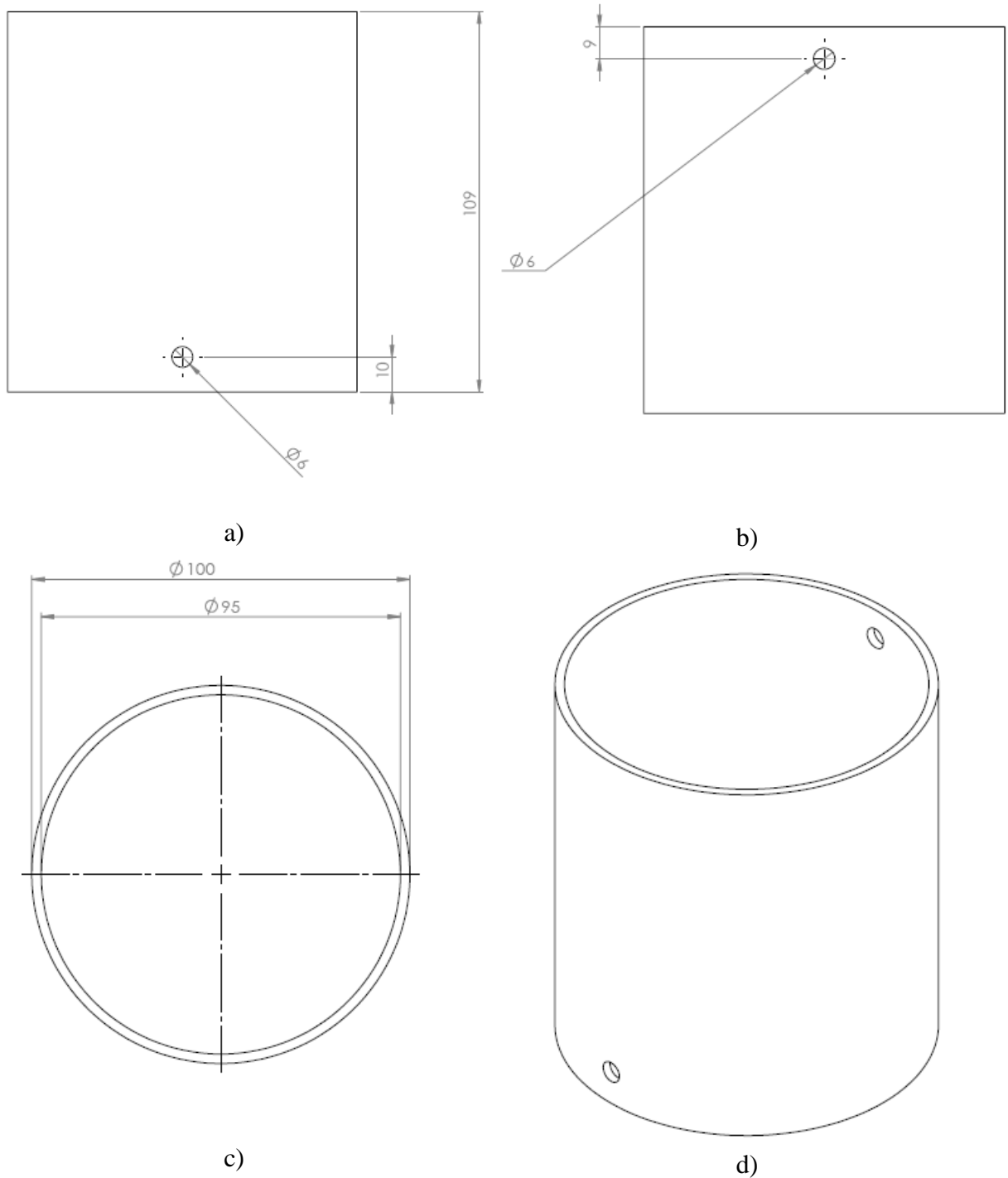


Figura F.13 - (a e b)Tubo externo do plenum vistas de lados opostos, (c) vista de baixo e (d) vista em perspectiva

F.3 Tampa Inferior

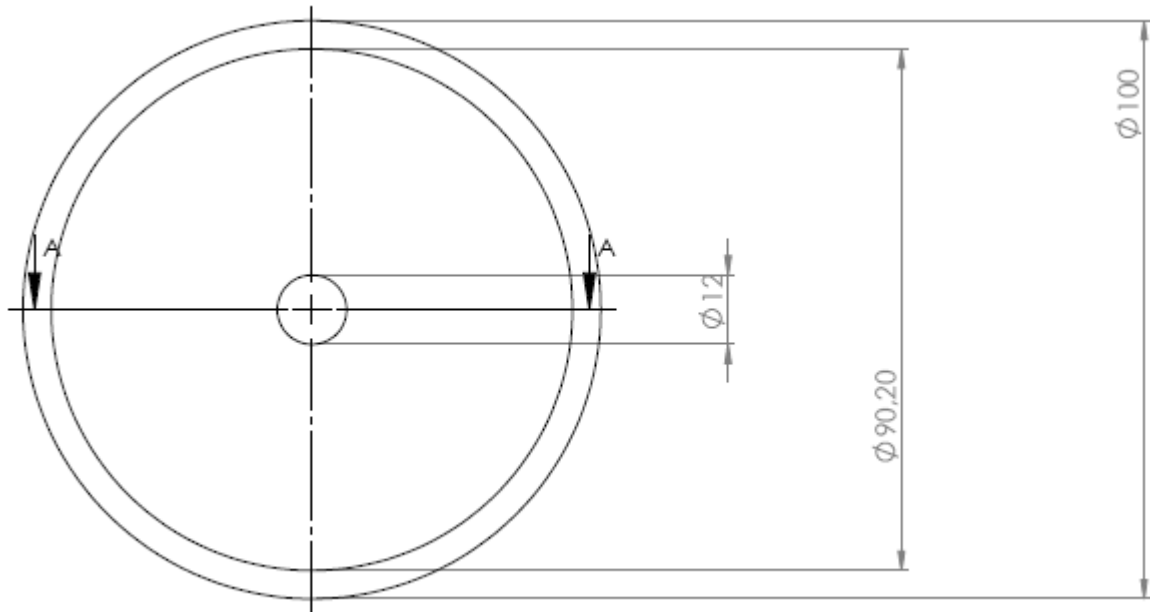


Figura F.14 - Tampa inferior do queimador – vista da parte interna

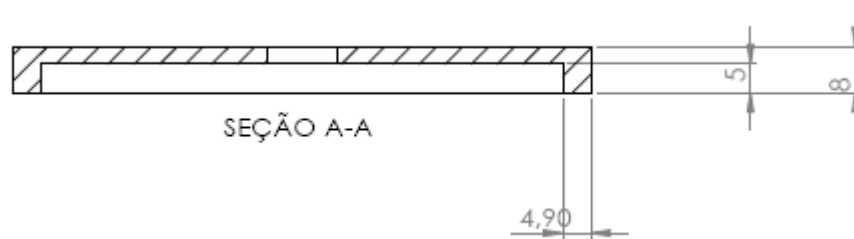


Figura F.15 - Seção transversal A-A da tampa inferior do queimador

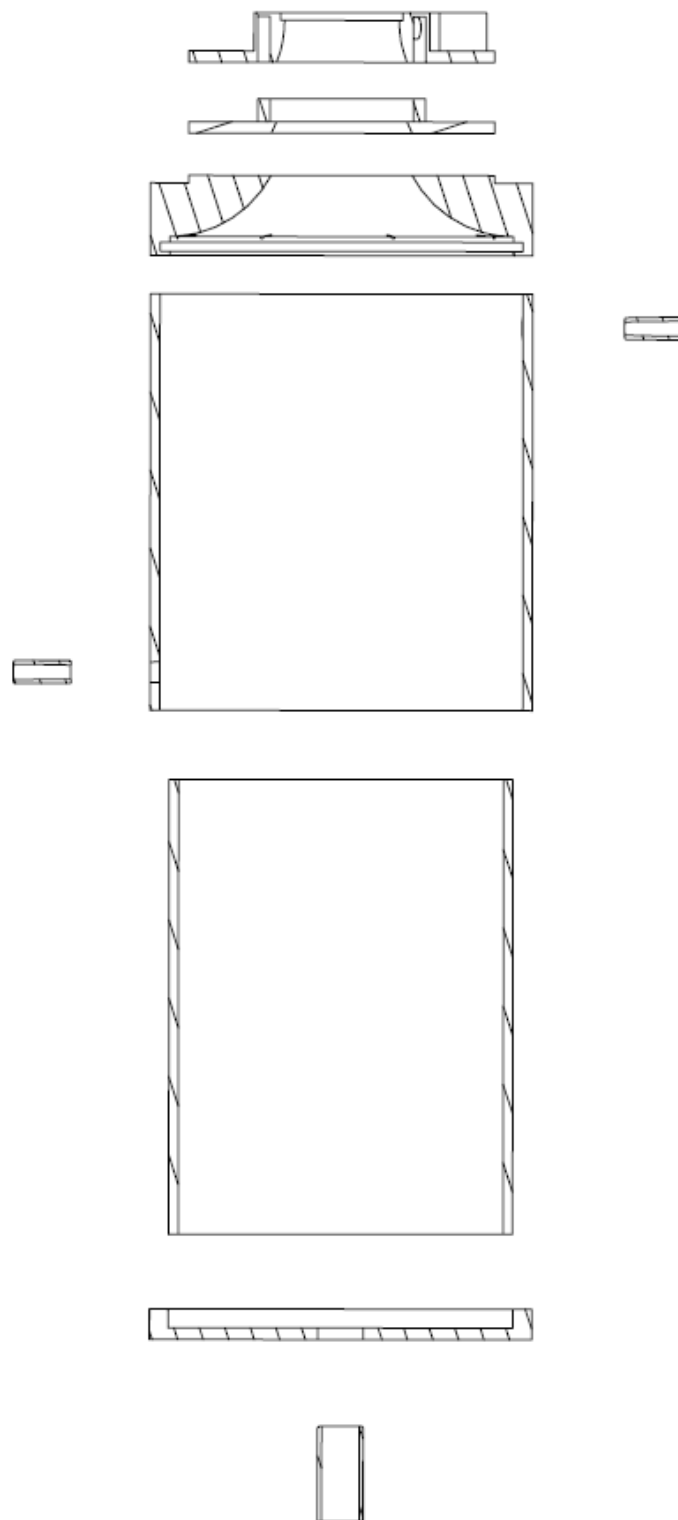
F.5 Queimador

Figura F.17 - Corte transversal em vista explodida do queimador

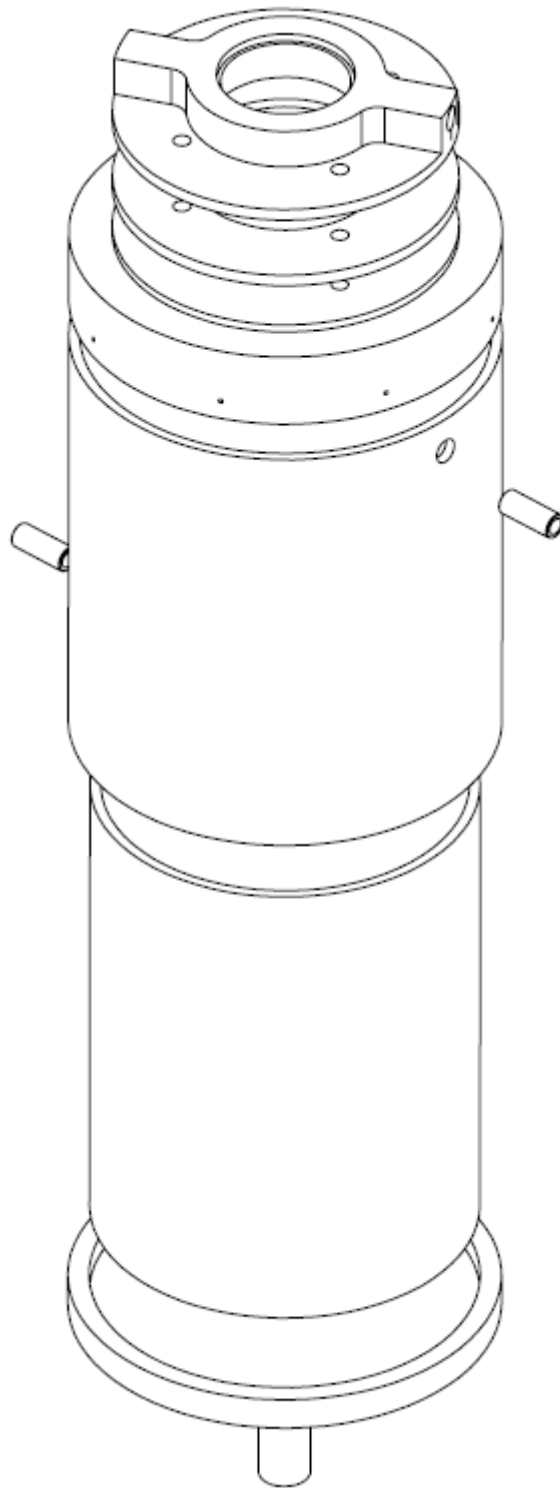


Figura F.18 - Vista explodida, em perspectiva, do queimador

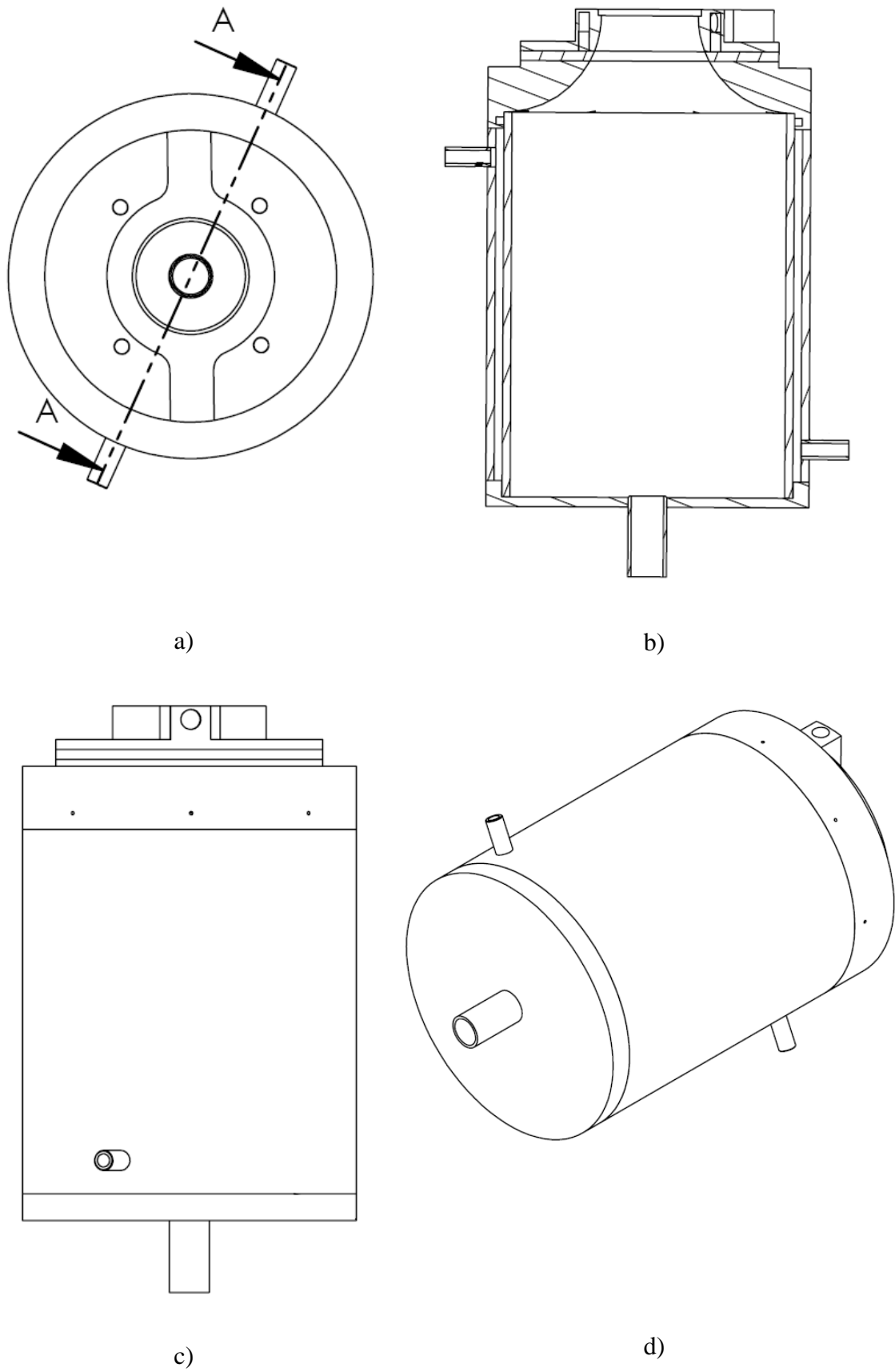


Figura F.19 - (a) Vista superior, (b) corte transversal A-A, (c) vista lateral e (d) vista em perspectiva do queimador

