

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADES DE CHAMA DE GASES À
PRESSÃO ATMOSFÉRICA

por

Igor Antonio Schmidt

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2012

ANÁLISE EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DE VELOCIDADES DE CHAMA DE GASES À
PRESSÃO ATMOSFÉRICA

por

Igor Antonio Schmidt

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Rubén Gonzalles
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e fenômenos de transporte**

Orientador: Prof. Dr. Fernando M. Pereira

Comissão de Avaliação:

Professor Dr.: Sérgio Frey

Professor Dr.: Marina F. Seelig

Professor Dr.: Paulo Schneider

Porto Alegre, 10, dezembro de 2012.

“A vida é como andar de bicicleta, para manter o equilíbrio é necessário se manter em movimento.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador, prof. Dr. Fernando Pereira que sempre se mostrou disposto a auxiliar e sempre esteve presente na realização deste trabalho.

Ao bolsista Henrique por todo apoio dedicado.

Ao meu pai Ivan Antonio Schmidt pelo apoio na construção do projeto e meu avô Adelmo Schmidt por emprestar sua oficina para construção do protótipo.

Aos técnicos Batista e Rafael pelo apoio prestado durante experimentação.

Ao meu supervisor de estágio da Gerdau Jonas Cordeiro por compreensão das horas faltadas.

E em especial para a minha família por todo o apoio e entendimento nas horas difíceis que transcorreram o desenvolvimento deste trabalho.

SCHMIDT, I. A. **Análise Experimental para Medição de Velocidades de Chama de Gases à Pressão Atmosférica**. 2012. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo projetar e construir uma bancada de ensaios de chamas de pré-misturas laminares para estudar as velocidades de chama adiabáticas em função das razões de equivalência, à pressão atmosférica. Para tal análise, o método experimental empregado foi o método do fluxo de calor (queimador de chama plana), utilizando como referência o projeto descrito em Bosschaart, 2002. Primeiramente procurou-se regular as vazões de metano e ar para determinar condições de chamas planas. Posteriormente foi aguardada a estabilização das condições de chama e coletadas as leituras para os perfis de temperatura, medidos com termopares tipo J. Por fim, as velocidades de chama medidas foram comparadas com os valores encontrados por Bosschaart and de Goey, 2003.

PALAVRAS-CHAVE: Bancada de ensaios, método do fluxo de calor, pré-misturas laminares, chamas planas, velocidade de chama adiabática.

SCHMIDT, I. A. **Experimental Analysis for Measurement of Flame Speeds of Atmospheric Pressure Gases**. 2012. 17 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

This present work aims to designing and building a test bench laminar premixed flames to study the adiabatic flame speeds as a function of equivalence ratios at atmospheric pressure. For this analysis, the experimental method employed was the heat flux method (flat flame burner), using as reference the design described in Bosschaart, 2002. Firstly it was tried to regulate the flows of air and methane to determine conditions flat flames. Thereafter it was expected to stabilize the conditions of flame and collected readings for temperature profiles, measured with thermocouples type J. Finally, the flame speed measurements were compared with the values found at the Bosschaart and Goey, 2003.

KEYWORDS: Bench tests, heat flux method, laminar premixed, flat flames, adiabatic flame speed.

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1 CHAMA DE PRÉ-MISTURA LAMINAR	1
2.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA DA VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES DE CHAMA	3
3.1.1 MÉTODO DE BUNSEN	3
3.1.2 MÉTODO COUNTERFLOW	3
3.1.3 MÉTODO DE CHAMA PLANA CONVENCIONAL	4
3.2 MÉTODO DO FLUXO DE CALOR	4
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	4
3.2.2 PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS	5
3.2.3 ESTUDOS EXPERIMENTAIS DO MÉTODO DO FLUXO DE CALOR	5
4. METODOLOGIA	5
4.1 BANCADA EXPERIMENTAL	6
4.2 METODOLOGIA DOS TESTES	8
4.2.1 MEDIÇÃO DE VELOCIDADES DA CHAMA PLANA	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
6. CONCLUSÃO	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APENDICE I – INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	15
PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS	15
APÊNDICE II – DESENHOS DA BANCADA EXPERIMENTAL	17

1. INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população mundial demanda de um consumo energético cada vez maior. Analisando o Balanço Energético Nacional 2011 (EPE 2011), aproximadamente 80% da oferta interna de energia em 2010 é originada de processos de combustão. Sendo que os principais combustíveis são petróleo ou derivados, gás natural, carvão mineral, coque, lenha, carvão vegetal e derivados de cana-de-açúcar. Além disso, há o interesse crescente por combustíveis alternativos como gás de lixo, gás de gaseificação de biomassa e gases residuais de refinaria, por exemplo.

Tendo como base os resultados preliminares do Balanço Energético Nacional 2012 (EPE 2011) percebe-se que 75% do consumo energético ocorre em indústrias, meios de transporte e no setor energético. Os principais equipamentos empregados são motores e queimadores industriais.

Perante este panorama energético brasileiro, é importante que a queima desses combustíveis ocorra da forma mais eficiente possível. Para isso, é necessário conhecer as principais características de queima de cada combustível. Em chamas pré-misturadas observa-se a propagação da frente de reação em direção aos reagentes não queimados, sendo que a principal característica desta propagação de chama é a velocidade de chama plana laminar adiabática. A temperatura e velocidade de chama adiabática são as duas características fundamentais de uma mistura reagente. Ambas são determinadas em função do combustível e o oxidante, da razão de equivalência (parâmetro que caracteriza a proporção dessa mistura), da temperatura inicial dos reagentes e da pressão.

A velocidade de chama determina a liberação de energia pela reação, o formato da chama, o tempo de queima de um certo volume, o tamanho de câmaras de combustão entre outros. Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de métodos de medição deste parâmetro fundamental da combustão. Estes necessitam ser confiáveis, com boa precisão e de baixo custo. Para tal, neste presente trabalho serão analisadas experimentalmente velocidades de chamas de pré-misturas laminares de misturas de metano e ar em condições ambiente empregando o método do fluxo de calor segundo Bosschaart, 2002.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CHAMA DE PRÉ-MISTURA LAMINAR

A principal característica de chamas de pré-mistura é que os reagentes são primeiramente misturados. Assim, a mistura ocorre a nível molecular, e só depois se dá a ignição gerada por uma fonte de energia.

Tendo a quantidade de oxidante necessária para a queima de todo o combustível tem-se uma mistura estequiométrica. Porém, muitas vezes a queima não acontece sob razão estequiométrica. Por conseguinte, expressa-se proporção combustível e oxidante através da razão de equivalência, definida pela Equação (2.1).

$$\phi = \frac{\frac{m_{fu}}{m_{ox}}}{\left(\frac{m_{fu}}{m_{ox}}\right)_{esteq}} \quad (2.1)$$

Na qual m_{fu} é a massa de combustível e m_{ox} a massa de oxidante.

Uma mistura gasosa com $\phi < 1,0$ é chamada de uma mistura pobre, tendo excesso de ar, enquanto que uma mistura com $\phi > 1,0$ é uma mistura rica com excesso de combustível. Além disso, a velocidade de propagação S_L depende fortemente da razão de equivalência.

Segundo Coelho e Costa, 2007, as chamas pré-misturadas permitem uma combustão intensa num pequeno volume, bem como maior controle da combustão. Em contra partida, requerem uma maior atenção devido aos reagentes se encontrarem já misturados.

2.2 SOLUÇÃO ANALÍTICA DA VELOCIDADE DE CHAMA LAMINAR

Coelho e Costa, 2007, definem a velocidade de propagação da chama como a velocidade na qual os reagentes se deslocam na direção perpendicular à frente de chama (em direção aos gases não queimados).

Em 1883, Mallard e Le Châtelier postularam que a chama é constituída de duas zonas, uma de pré-aquecimento e outra de reação conforme mostrado na Figura 2.1. O acoplamento destas regiões se dá a partir da troca de calor por condução entre as duas zonas.

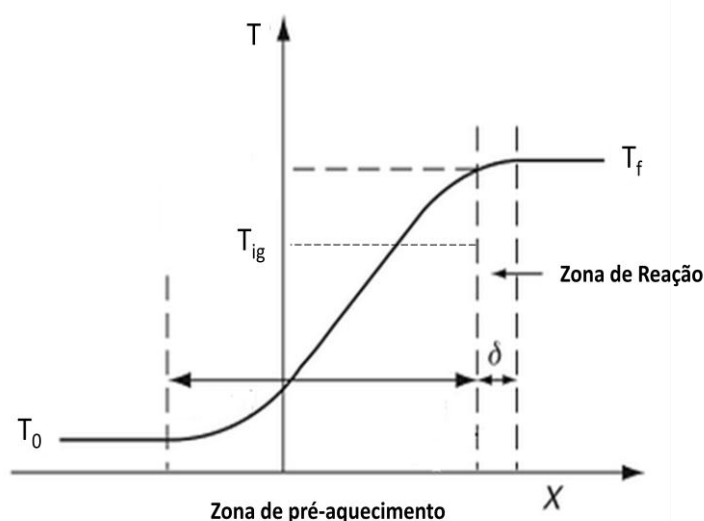


Figura 2.1 - Variação de temperatura ao longo de uma chama de pré-mistura laminar de acordo com Mallard e Le Châtelier adaptado de [Coelho e Costa, 2007].

Segundo esta teoria a velocidade de chama laminar é dada pela Equação (2.2).

$$\dot{S}_L = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho_0 \cdot C_p} \cdot \frac{(T_f - T_{ig})}{(T_{ig} - T_0)} \cdot \frac{m_{mist}}{m_{comb}} \cdot \frac{R_{comb}}{\rho_0}} \propto \sqrt{\frac{\alpha_0 \cdot R_{comb}}{\rho_0}} \quad (2.2)$$

onde α_0 [m²/s] é a difusividade térmica definida como $[\lambda/(\rho_0 C_p)]$, λ é a condutividade térmica [W/(m.K)], ρ_0 é a massa específica dos reagentes à temperatura inicial, C_p é o calor específico da mistura [J/(kg.K)], T_0 é a temperatura inicial dos reagentes, T_f é a temperatura dos produtos, T_{ig} é a temperatura de ignição, m_{mist} é a massa da mistura, m_{comb} é a massa do combustível e R_{comb} é a taxa de reação [kg/m³-s]. Nota-se que através da taxa de reação a temperatura da chama influencia exponencialmente a velocidade de chama. Isso explica a grande dependência da velocidade de chama com a razão de equivalência.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE VELOCIDADES DE CHAMA

A seção 3.1 é dedicada à apresentação de métodos experimentais já realizados e consagrados discutindo vantagens e desvantagens dos mesmos. São eles: Queimador de Bunsen, counterflow e queimador de chama plana.

3.1.1 MÉTODO DE BUNSEN

O combustível é introduzido junto à base. O jato de combustível passa por orifícios provocando a entrada de ar (oxidante). Tanto a quantidade de combustível injetada quanto a abertura dos orifícios podem ser variados. Estabiliza-se uma chama em um bico de Bunsen e mede-se (por análise de imagem) a área da chama. A velocidade é obtida pela divisão da vazão total pela área. A dificuldade do método está na correta determinação da área. Métodos shadowgraph e schlieren são empregados para obter uma melhor definição da frente de chama. Outra dificuldade é que a chama sofre perdas de calor próximo ao pórtico do Bunsen e sofrem efeitos de estiramento de chama no ápice do cone de chama.

A simplicidade das equações que envolvem o método de Bunsen demonstra que a velocidade de propagação de chama seja encontrada facilmente, conforme citado em Coelho e Costa, 2007. Além disso, é um equipamento simples tem facilidade para se adaptar a diferentes pressões e temperaturas. Entretanto, não é fácil obter resultados precisos a partir do método, pois há incertezas devido à determinação da área do cone e à variação de velocidade ao longo do cone causada pela parede do queimador.

3.1.2 MÉTODO COUNTERFLOW

O método de medição de velocidades de chama counterflow baseia-se na estabilização da chama entre de jatos opostos de misturas de combustível e oxidante como se mostra esquematicamente na Figura 3.1.

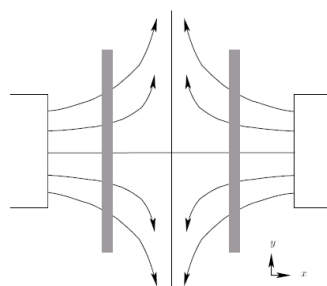


Figura 3.1 - Desenho esquemático do método counterflow [Bosschaart, 2002, adaptado]

Como pode ser visto as linhas de corrente não são perpendiculares à frente de chama. Com isso, a chama sofre uma deformação denominada estiramento das chamas. Essa deformação é proporcional à componente do escoamento tangencial à frente de chama. Com a variação da distância entre os bicos controla-se a deformação. Experimentalmente repete-se o método para diferentes taxas de deformação e a velocidade de chama é obtida extrapolando-se os resultados para estiramento nulo.

Ao contrário da maioria dos métodos este não sofre de nenhuma perda de calor o que o torna interessante. Porém, a necessidade de extrapolar a curva acrescenta imprecisão ao método e, além disso, este apresenta alta sensibilidade para diferentes modos de extrapolação.

3.1.3 MÉTODO DE CHAMA PLANA CONVENCIONAL

O método de chama plana convencional é o mais semelhante ao apresentado no presente trabalho. Neste, após a ignição, a vazão 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.

A desvantagem desse método é que a chama perde calor para o disco poroso, não sendo, portanto, uma chama adiabática. Assim, repetem-se os experimentos para diversos níveis de extração de calor da chama e obtém-se a velocidade de chama extrapolando os resultados para perda de calor zero. Novamente esta extrapolação introduz incertezas difíceis de quantificar.

3.2 MÉTODO DO FLUXO DE CALOR

A seguir será detalhado o método do fluxo de calor abordado no presente trabalho, assim como suas principais características e resultados já obtidos através deste.

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Inicialmente Botha e Spalding, [1954] introduziram o método discutido na Seção 2.3.3. Porém, havia problemas como pequenas variações de temperatura e necessidade de extrapolação para condição adiabática de chama onde a perda de calor é nula devido à instabilidade da mesma.

Goey *et al.*, [1993] idealizaram um queimador onde a chama estabilizava-se sobre uma chapa perfurada (espessura de 2mm com um padrão hexagonal de pequenos furos de 0,5 mm) como mostra a Figura 3.2. A placa é aquecida na sua periferia de forma que o calor que a chama perde para a placa não pode ser conduzido radialmente. Dessa forma, o calor perdido pela chama para a placa é cedido pela placa para os reagentes não queimados. Como resultado tem-se uma chama plana e adiabática. A condição adiabática da chama é avaliada medindo-se a distribuição de temperaturas radiais na placa com o uso de termopares. Quando os termopares indicam o mesmo valor, não há gradiente radial de temperatura e a chama alcança a condição adiabática.

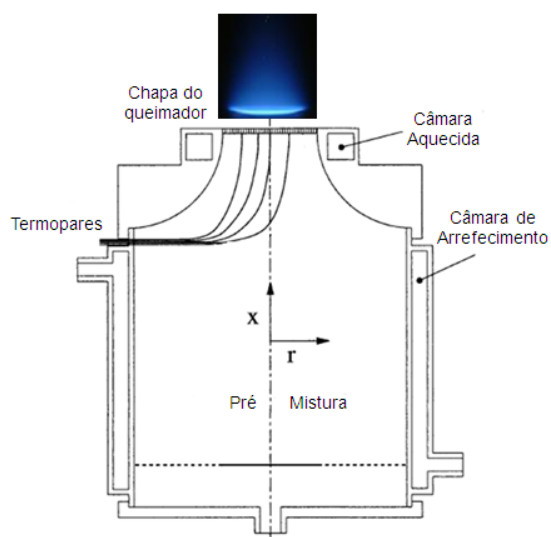


Figura 3.2 - Chama estabilizada após a chapa plana [Bosschaart e de Goey, 2002, adaptado]

3.2.2 PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS

Segundo Van Mareen, [1994] com esta configuração de queimador é possível criar em laboratório chamas planas, com mínimo estiramento e adiabáticas. Para encontrar a velocidade de chama adiabática não há necessidade de extrapolar os resultados experimentais.

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. Mais que isso, devido à ausente necessidade de extrapolação para atingir condições adiabáticas o método apresenta-se preciso.

A 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 do queimador.

3.2.3 ESTUDOS EXPERIMENTAIS DO MÉTODO DO FLUXO DE CALOR

A Figura 3.3 mostra uma comparação de medições de velocidade de chama empregando o método experimental descrito acima (Bosschaart e de Goey, 2003) com outros experimentos descritos na literatura para misturas de metano e ar a 298K e 1 atm.

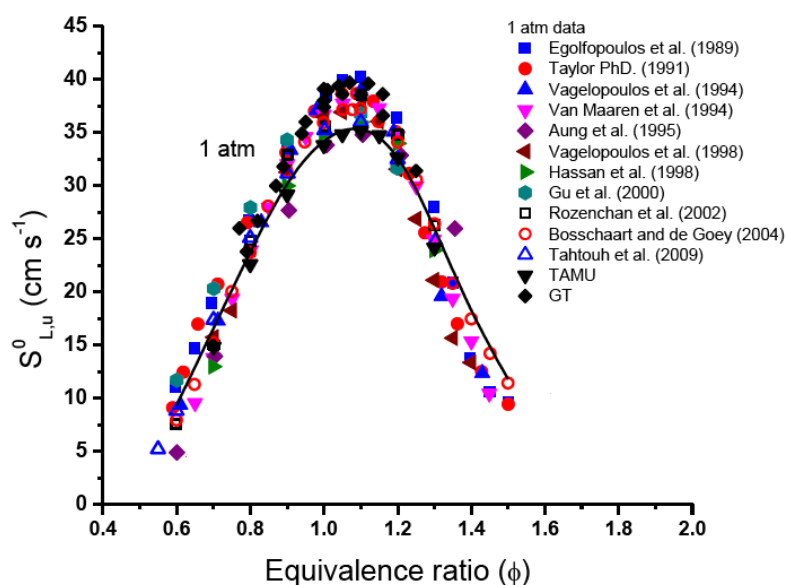


Figura 3.3 - Resultados experimentais da literatura [Kochar et al., 2011, adaptado]

4. METODOLOGIA

Nas seções seguintes será detalhada a bancada experimental, bem como os instrumentos de medição que a compõem, a forma como será caracterizada a estabilidade e planicidade da chama e também os dados relevantes para medição do perfil de temperaturas da placa do queimador.

4.1 BANCADA EXPERIMENTAL

Inicialmente, as linhas de alimentação dos gases são mostradas na Figura 4.1. A linha de ar comprimido, pressão de 9 bar, tem sua pressão reduzida para 3 bar e assim é ligada ao rotâmetro de ar. O cilindro de combustível tem sua pressão reduzida para 5 bar e é ligado ao seu respectivo medidor de vazão. Ambas as saídas dos rotômetros eram conectadas a um T de engate rápido para que neste ponto inicie a pré-mistura dos gases reagentes. Para estes experimentos foi utilizado gás Metano com 99,995% de pureza, conhecido comercialmente como Metano 4.5.

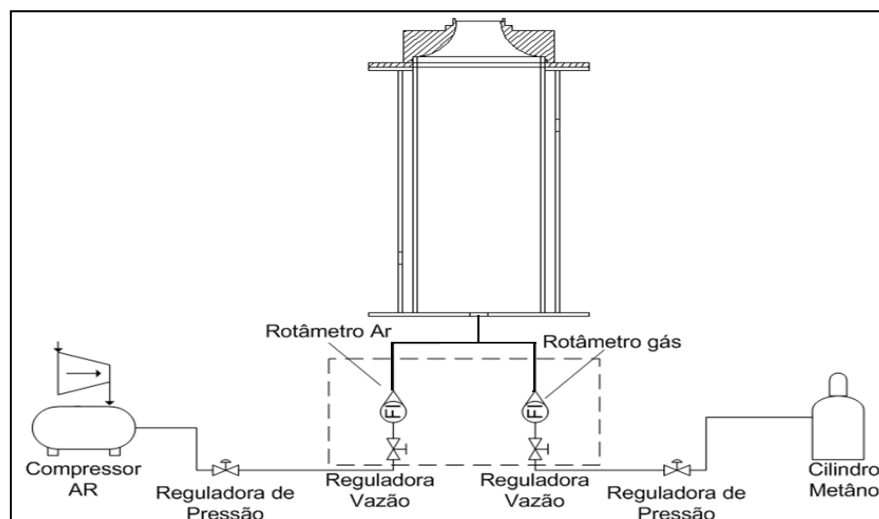


Figura 4.1 - Configuração de montagem das linhas de gases para experimento

Para medição e controle dos parâmetros das misturas dos testes foram utilizados dois rotômetros montados em uma base, um para vazão de ar e outro para a de combustível. O rotâmetro para ar possui escala de 1-10 SLPM, calibrado para ar, à pressão atmosférica e temperatura de 21°C, precisão de $\pm 5\%$ do fundo de escala. O rotâmetro utilizado para medição da vazão de combustível possui escala de 0,15 a 1,4 SLPM, calibrado para metano, à pressão atmosférica e temperatura de 21°C, com precisão de $\pm 5\%$ do fundo de escala.

Para este projeto foi proposta a utilização de um tubo de parede dupla com arrefecimento externo (câmara de pré-aquecimento) com telas e um bocal convergente (queimador), tendo a configuração mostrada na Figura 4.2. Além disso, esta bancada foi projetada seguindo detalhamentos propostos por Bosschaart, 2002.

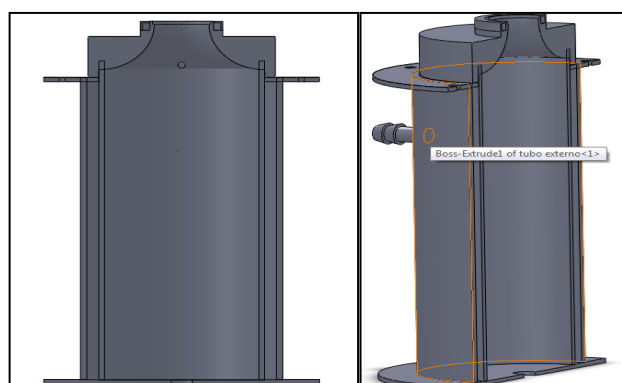


Figura 4.2 - Vista explodida em corte da bancada em software CAD;

As saídas de engate rápido são então conectadas na parte inferior do tubo de parede dupla através de uma conexão tipo T (10 mm). Os gases ao entrar no tubo interno colidem com duas placas perfuradas (com furos de 2 mm conforme Figura 4.3a) atenuando a velocidade do escoamento e, assim, gerando escoamento laminar (números de Reynolds abaixo de 2100, como já conhecido na literatura [Fox et al., 2004], é a faixa para escoamentos laminares) e otimizando a pré-mistura dos gases. Na parte externa, o tubo projetado é arrefecido com água a temperatura ambiente para homogeneizar a temperatura da pré-mistura.

Na parte superior da câmara de pré-aquecimento o queimador é fixado utilizando parafusos M6. Os reagentes já pré-misturados chegam ao queimador. Este foi projetado com um raio interno atenuante de 30 mm para gerar um perfil de velocidades uniforme ao escoamento. A mistura sai do queimador passando por uma placa perfurada com 2 mm de espessura e 32 mm de diâmetro. A chapa é furada com furos de 0,5 mm e distanciamento padrão de 0,7 mm configurando um padrão hexagonal de furos conforme mostrado na Figura 4.3b.

A placa é instalada no queimador utilizando cola para alta temperatura (cola 3M para junta de motores diesel), Figura 4.3c. Na periferia, de onde a chapa é instalada, foi projetada uma câmara de aquecimento. Por esta passa água a 85°C, aquecida por um aquecedor por dupla resistência 110V Figura 4.3d, responsável pelo aquecimento da placa e conseqüentemente por proporcionar a taxa de troca de calor nula entre a chama e placa, garantindo condições adiabáticas para as chamas planas encontradas durante experimentação.

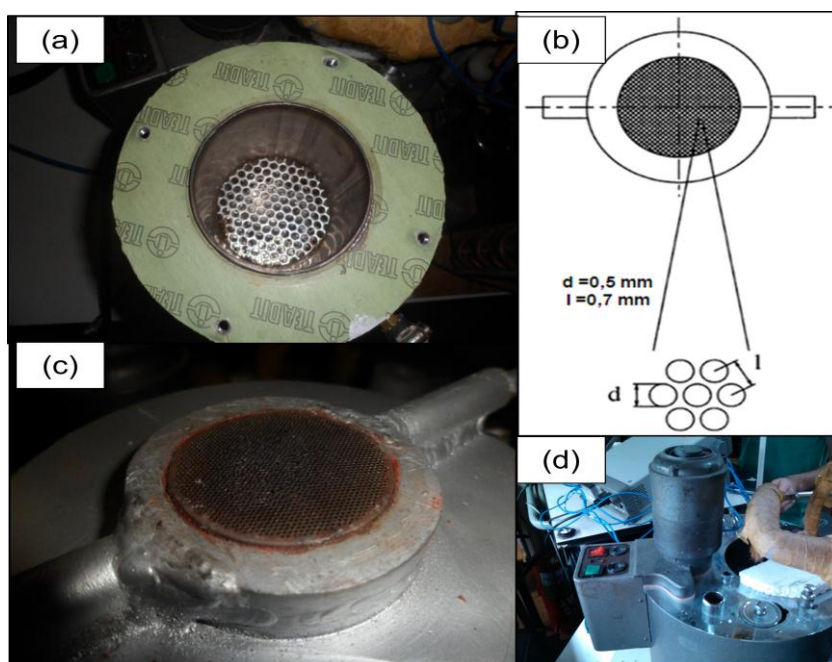


Figura 4.3 - (a) Vista do tubo interno; (b) Desenho esquemático do padrão de furação da chapa; (c) Vista da câmara de água controlada e da chapa com furos; (d) Aquecedor elétrico de duas resistências utilizado.

O perfil de temperaturas da placa foi medido utilizando cinco termopares do tipo J standard, conforme Figura 4.4a, com fios de 0,2 mm de diâmetro e limite de erro $\pm 2,4^\circ\text{C}$ ou $\pm 0,75\%$ da medição [N.I.S.T., 2012]. Para fins das medições dos pontos radiais da placa os dois fios unidos precisam ser encaixados nos furos de 0,5 mm da placa. Para isso, foi necessário cortar alguns fios da malha, ficando apenas com um fio de 0,2 mm. Por conseguinte, foi necessário testar a sensibilidade, a precisão e a calibração para a condição de um fio. A calibração dos termopares foi realizada através de comparações com um PT100 em

condições de água a temperatura ambiente e fervendo. Após verificação, foram instalados na placa 4 termopares espaçados radialmente, (Figura 4.4b e Figura 4.4c). Finalmente, estes foram ligados a um data logger HP Benchlink 34970A (Figura 4.4d).

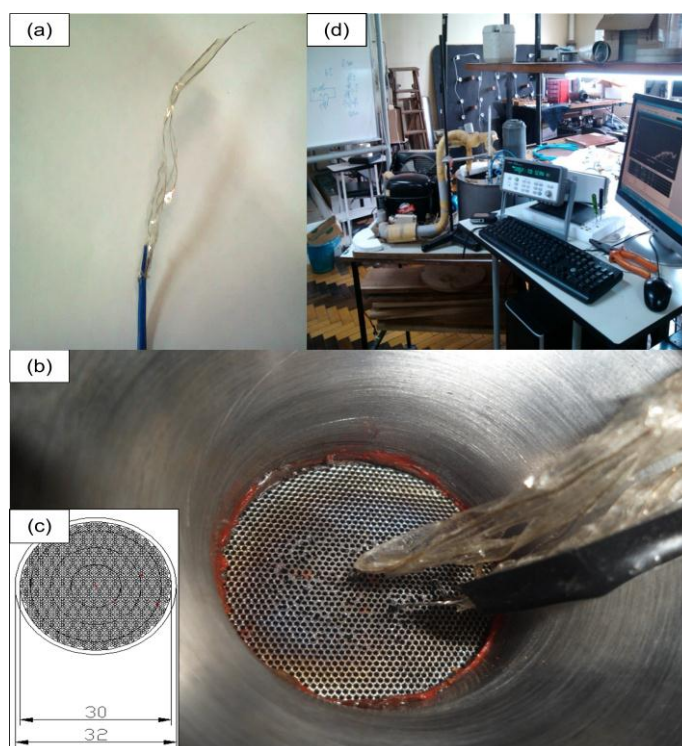


Figura 4.4 - (a) Termopar tipo J modificado; (b) Montagem dos termopares na chapa; (c) Esquemático do posicionamento dos termopares; (d) Data Logger utilizado;

4.2 METODOLOGIA DOS TESTES

Para um melhor entendimento da metodologia de execução dos testes, na próxima Seção será detalhado um roteiro de execução para medição de velocidades de chama plana.

4.2.1 MEDIÇÃO DE VELOCIDADES DA CHAMA PLANA

Para determinar as velocidades dadas diferentes razões de equivalência foram seguidos os seguintes itens de procedimento:

- O sistema para medição segue o layout configurado na Figura 3.4a com ar comprimido e gás metano puro conectados a um T de engate rápido onde inicia a pré-mistura dos reagentes. As vazões devem ser reguladas a fim de encontrar condições de chama plana acima da placa do queimador para uma dada razão de equivalência.
- Depois de encontrar uma razão de equivalência que caracterizou uma chama plana aguardou-se 15 minutos para estabilização das condições e temperaturas.
- Após o tempo determinado coletou-se cinco medições consecutivas de temperatura para cada termopar, com período de trinta segundos entre as medições.
- Após conseguir uma chama plana avaliaram-se as vazões para dada condição. Devido à falta de um controlador de pressão das linhas de ar e metano foi necessário cuidados para evitar variações das vazões durante o teste.

- e) Os dados de vazão são convertidos para velocidade dividindo-se a vazão pela área da chama.
- f) Devido a grande imprecisão e falta de equipamentos de medição mais refinados é importante o estudo das incertezas de medição conforme Apêndice I.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As velocidades de chama foram medidas seguindo os passos da metodologia apresentada na Seção 4.2.1. de modo a determinar um perfil de velocidades o mais próximo possível da literatura apresentada na Seção 3.2.3. A Figura 5.1 mostra a distribuição das velocidades encontradas para as dadas razões de equivalência que caracterizaram uma chama visualmente plana sobre a placa do queimador. A comparação acontece com os resultados encontrados no experimento de Booschaart e de Goey, [2003].

Comparando os perfis de velocidade apresentados ficam evidentes que as velocidades encontradas no presente trabalho possuem grandes incertezas e variações quando colocados frente aos da literatura.

Os dados apresentados na Figura 5.1 foram tratados estatisticamente conforme o Apêndice I. As velocidades apresentaram uma incerteza máxima de 9,44% do valor medido, que em termos absolutos representa $\pm 1,25$ cm/s. Esta incerteza deve-se ao fato já citado de que os rotômetros não são de alta qualidade. As razões de equivalência apresentaram uma incerteza máxima de 22% do valor calculado a partir das vazões encontradas para chama plana estável, esta representa valores de $\pm 0,085$ a $\pm 0,14$. A variação ocorre devido à variação das vazões de ar e metano para cada mistura.

Um ponto importante a ser levantado é que o expressivo número de incertezas propagadas para as razões de equivalência e velocidades torna possível a visualização de pontos experimentais encontrados dentro do perfil dado na literatura. Este é o caso dos pontos de razão de equivalência igual a 0,65, 0,71, 0,82, 0,87 e 1,21.

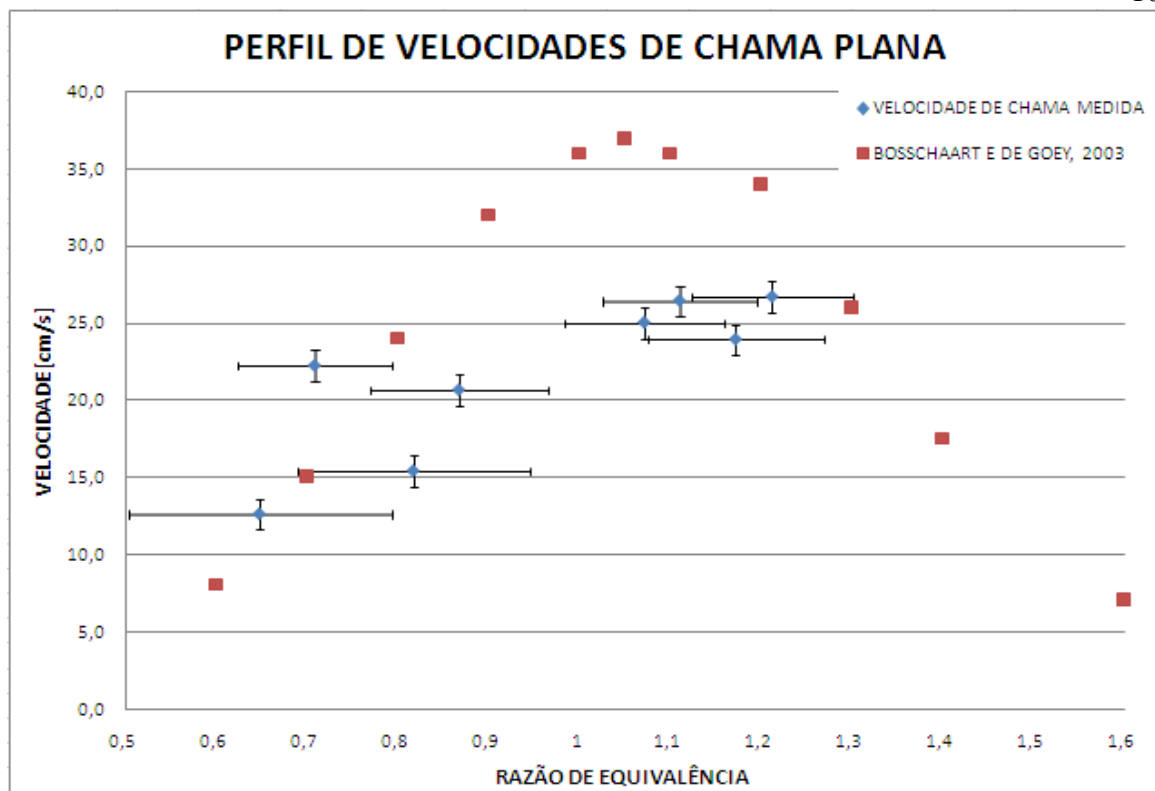


Figura 5.1 - Perfil de velocidades de chama plana medidos experimentalmente.

A estabilização da chama plana sobre a placa do queimador era a condição a ser estabelecida durante todos os experimentos. Para isto, foram testadas diferentes frações de riqueza de chama. Dos pontos testados apenas oito geraram condições de chama plana (por análise visual) onde o estudo pode ser realizado. Conforme metodologia detalhada na Seção 4.2.1 após ser encontrada uma condição de chama plana foi esperado um período de 15 minutos para analisar-se o perfil de temperaturas na chapa. A Figura 5.3 detalha as curvas estabilizadas para cada razão de equivalência encontrada. Nota-se uma grande variação dos valores radiais de temperatura medidos. Essa variação se deve a problemas de posicionamento dos termopares nos furos da placa, já que não se usou nenhuma técnica para garantir a homogeneidade desse posicionamento. Assim apesar das incertezas de medição serem baixas os termopares não estavam na posição correta (mesmo ponto na espessura da placa) para se avaliar adequadamente o fluxo de calor radial. A seguir serão discutidas ponto a ponto as variáveis envolvidas:

- Razão de equivalência 0,65: Para este ponto tem-se o maior erro agregado à medição das vazões. Inicialmente, comparado a literatura e os resultados de Booschaart e de Goey, [2003] temos que o ponto está sobre a reta. Ou seja, pode ser encontrada uma condição onde a velocidade se aproxima de valores já encontrados. No entanto, observando a Figura 5.3 nota-se que as temperaturas da placa são em geral maiores que a temperatura da borda, o que indica que a condição efetivamente plana (e adiabática) não foi alcançada.
- Razão de equivalência 0,71: Este foi o ponto de operação que mais se aproximou da condição de chama plana, Figura 5.2, (e adiabática) como mostra a Figura 5.3. Nota-se que há pouca variação das temperaturas da placa e que todas se aproximam da temperatura da borda. Logo, a perda de calor da chama para a placa foi aproximadamente compensada pela perda de calor da placa para os gases não reagidos. Além disso, na Figura 5.1 a velocidade de chama encontrada está acima da apresentada na literatura para uma mesma razão de equivalência. Assim, pode-

se verificar que para condições de chama plana onde a perda de calor para a placa é minimizada temos um aumento considerável da velocidade de chama.

- c) Razão de equivalência 0,82: Neste caso tem-se uma condição não adiabática já que as temperaturas no interior da placa são maiores que a temperatura da borda (existe um significativo fluxo radial de calor). Assim, dado que a chama perde mais calor para a carcaça do queimador a velocidade encontrada para esta condição está abaixo da velocidade esperada. Estes acontecimentos podem ser mais bem entendidos voltando à Equação 2.3 onde uma menor temperatura de chama gera menor taxa de reação que é diretamente proporcional à velocidade de chama.
- d) Razão de equivalência 0,87: Analogamente ao ponto anterior, a grande perda de calor para a placa provada pelas altas temperaturas do perfil de temperaturas coletado demonstra que estes pontos tendem a fornecer menos calor para a mistura, reduzindo a velocidade de chama.
- e) Razões de equivalência 1,07, 1,11 e 1,17: As misturas mais próximas da estequiométrica foram de grande dificuldade neste trabalho. A condição inicialmente calculada para razão estequiométrica (1,4 l/s para metano e 13,6 l/s para ar) não conseguiu ser atingida. Os pontos apresentam grande perda de calor o que justifica a velocidade de chama inferior, visto que em condições estequiométricas e adiabáticas são nestes pontos encontradas as maiores velocidades de chama.
- f) Razão de equivalência 1,21: Como já citado anteriormente, como há incerteza agregada aos valores medidos, neste ponto pode-se chegar às condições da literatura. Já para a velocidade não se pode concluir da mesma forma, visto que a perda de calor para a chapa reduz consideravelmente sua velocidade.

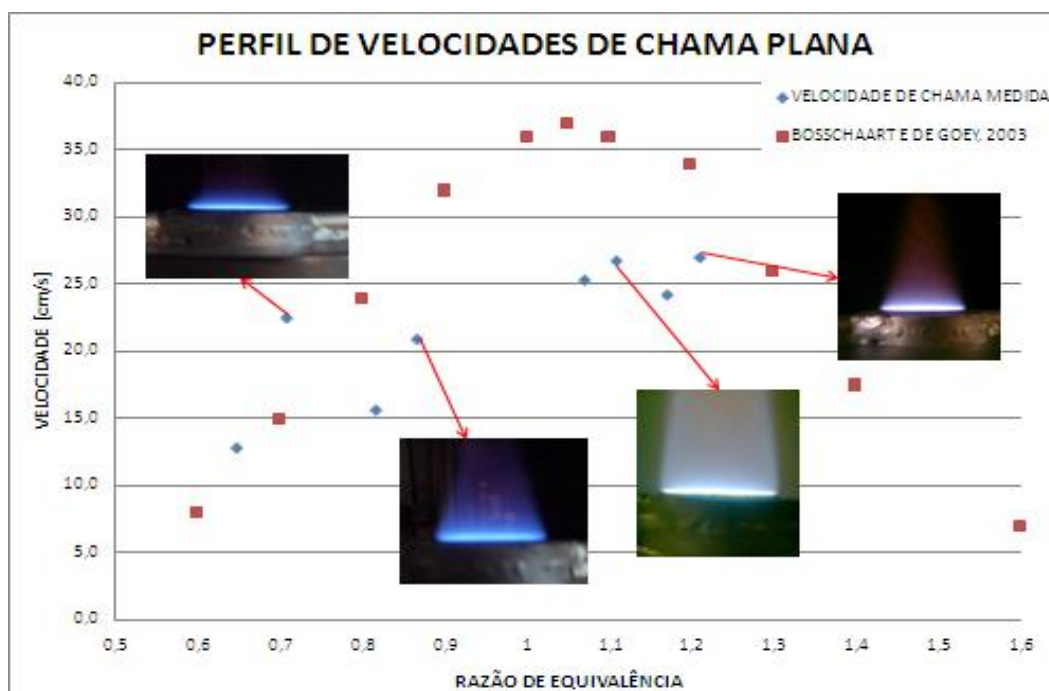


Figura 5.2 - Configuração das chamas planas estabilizadas no queimador.

Os dados analisados na Figura 5.3 trazem consigo os erros de medição ou incertezas associadas ao tipo de termopar utilizado. Por motivo de segurança, tem-se um erro igual a $\pm 2,4^{\circ}\text{C}$ para todos os pontos medidos. Estas incertezas de medição não acarretam grandes problemas à maioria das linhas de temperatura encontradas. Porém, para o perfil de temperaturas encontrado com razão de equivalência igual a 0,71 este erro tornou-se

expressivo, pois nesta condição a perda de calor para a placa foi menor acarretando menores temperaturas na mesma. Nesta condição o erro se aproxima de 5% do valor estabelecido.

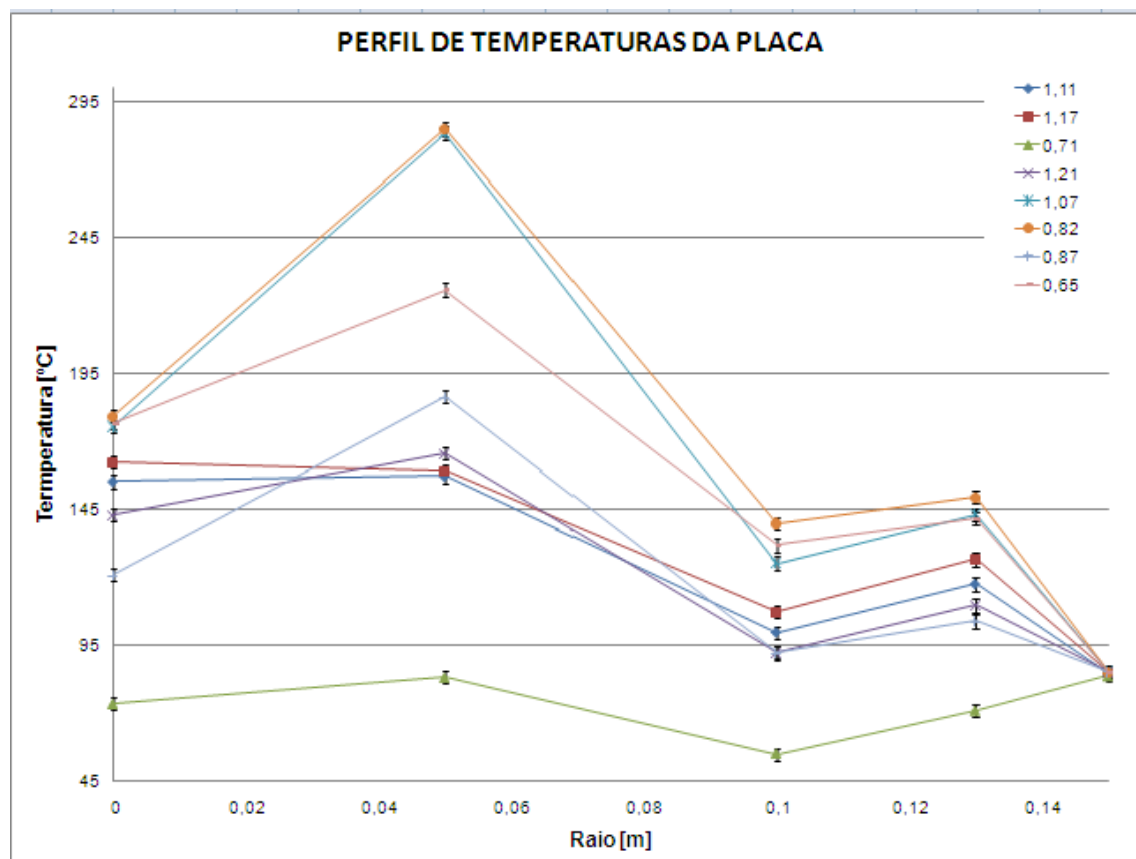


Figura 5.3 - Perfil de temperaturas para as chamas planas estabilizadas.

Além dos erros propriamente propagados pelas incertezas de medição dos equipamentos, os termopares no caso da temperatura, foram encontrados problemas com o posicionamento das junções dos mesmos na placa perfurada do queimador. Durante a montagem da bancada foi verificado se havia algum termopar ultrapassando a linha superior da chapa, mas nada foi detectado. No entanto, não há garantia de que o posicionamento da altura da junção na chapa não influencie na leitura. Como pode ser visto os perfis de temperatura formaram curvas diferentes as da literatura devido ao termopar posicionado na posição de 0,05 apresentar temperaturas mais elevadas. Devido a estes problemas na Figura 5.4 pode ser visto uma melhoria realizada pelo projeto de Bosschaart, [2002] onde os termopares são colocados no interior de micro tubos garantindo a linearidade dos posicionamentos. Esta melhoria não foi implementada durante o estudo do presente trabalho devido ao elevado investimento e dificuldade no fornecimento à curto prazo.

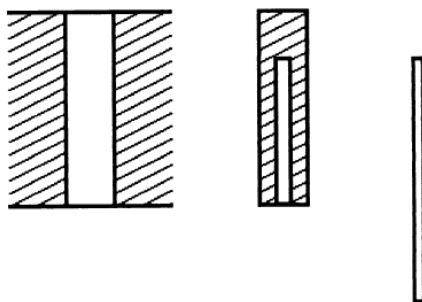


Figura 5.4 - Melhoria para redução da incerteza do posicionamento dos termopares
[Bosschaart e de Goey, 2003, adaptado]

Durante a discussão dos pontos experimentais medidos foi citada uma dificuldade referente à obtenção de valores para velocidades de chama próximas à razão estequiométrica. Durante as tentativas de aproximação, o único perfil que se estabilizou sobre a placa do queimador apresentou o aspecto mostrado na Figura 5.5, isto é, uma chama não plana.



Figura 5.5 - Chama encontrada para razão próxima à estequiométrica

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou realizar a medição de velocidade de chama plana laminar pelo método proposto inicialmente por Botha e Spalding, [1954] e otimizado por Goey *et al.*, [1993]. Os testes realizados permitiram a medição aproximada das velocidades de chama de misturas de metano e ar. Os resultados obtidos permitiram a construção de um perfil de velocidades \times razão de equivalência com alguns pontos próximos aos encontrados na literatura. Para razões de equivalência próximas da estequiométrica o experimento apresentou grande instabilidade, assim, não pode ser estabilizada uma chama nessas condições.

A análise dos erros de medição revela a grande incerteza dos resultados obtidos, sobretudo na razão de equivalência. As medições de vazões dos rotâmetros dos gases são as principais responsáveis pela incerteza elevada, sendo, portanto equipamentos importantes a serem melhorados no sistema proposto.

Para um estudo mais preciso das velocidades de chama plana de metano e ar seriam necessários um rotâmetro calibrado para metano com escala de 0,5 a 2 l/s e outro para ar com escala de 1 a 20 l/s. Estes equipamentos seriam indicados para medir velocidades com razão de equivalência próxima da estequiométrica, ricas e pobres e com incertezas de medição menores.

Outro fator importante para melhorar o sistema é o uso de controladores de pressão para as linhas de ar e metano, evitando oscilações de pressão (e vazão). Devido ao tempo de espera necessário para estabilização do perfil de temperaturas na chapa e homogeneização das trocas de calor entre chama e placa (aproximadamente 15 mm.), era necessário realizar manualmente a manutenção e o equilíbrio das medições de vazão. Mostrou-se que a medição de temperaturas da placa pode ser empregada para uma avaliação qualitativa das perdas de calor da chama, isto é, da proximidade da chama da condição adiabática. Os pontos estáveis obtidos em geral representaram chamas com perdas de calor radial. Isso pode explicar porque as velocidades obtidas estiveram abaixo dos dados da literatura.

Para um próximo trabalho, a fim de se obter dados quantitativos é necessário diminuir as incertezas quanto ao posicionamento dos termopares. Outro ponto de modificação seria a utilização de um termopar com a união de diâmetro com aproximadamente 0,3 mm, para facilitar o encaixe e trabalho deste nos furos de 0,5 mm da chapa do queimador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Bosschaart, K.J.; **Analysis of the heat flux method for measuring burning velocities**, Technische Universiteit Eindhoven, 2002.

Bosschaart, K.J. ;de Goey, L.P.H.; **Detailed analysis of the heat flux method for measuring burning velocities**, Technische Universiteit Eindhoven, 2003.

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

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

Empresa de Pesquisa Energética – EPE; **Balanco Energético Nacional**, Ano Base 2010, https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf, Acessado em 15/10/2012

Empresa de Pesquisa Energética – EPE; **Balanco Energético Nacional**, Ano Base 2011, https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf, Acessado em 15/10/2012

Fox, R.W.; McDonald, A.T. and Pritchard, P.J., **Introduction to Fluid Mechanics**, John Wiley & Sons, INC. 6th edition, 2004.

J.P. Botha and D.B. Spalding. **The laminar flame speed of propane/airmixtures with heat extraction from the flame**. Proc. Roy. Soc. Lond. A, 255:71, 1954.

Kochar, Y.; Seitzman, J.; Lieuwen, T.; Metcalfe, W.; Burke, S.; Curran, H.; Krejci, M.; Lowry, W.; Petersen, E.; Bourque, G.; **Laminar flame speed measurements and modeling of alkane blends at elevated pressures with various diluents**, PROCEEDINGS OF ASME TURBO EXPO 2011, Vancouver, 2003. Não paginado.

N.I.S.T., Reference Tables Monograph 175, Revised to ITS-90, Consultado em 20/11/2012.

APENDICE I – INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

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 através do método apresentado por Kleine e McClintock, mostrado na Equação (1.1).

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{dz}{dx_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{dz}{dx_n} \cdot \Delta x_n\right)^2} \quad (1.1)$$

No presente trabalho têm-se incertezas propagadas para duas variáveis. A velocidade de chama e a razão de equivalência são dadas pelas Equações 1.2 e 1.3 finais respectivamente.

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\Delta V_{ar}}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{metano}}{A}\right)^2 + \left(\frac{V_{mistura} \cdot \Delta A}{A^2}\right)^2} \quad (1.2)$$

$$\Delta \phi = \sqrt{\left(\frac{\rho_{metano} \cdot \Delta V_{metano}}{\rho_{ar} \cdot V_{ar} \cdot f_{estequiométrico}}\right)^2 + \left(-\frac{\rho_{metano} \cdot \Delta V_{ar}}{\rho_{ar} \cdot V_{ar}^2 \cdot f_{estequiométrico}}\right)^2} \quad (1.3)$$

Nas equações acima, ΔV são os erros associados para cada rotâmetro [m^3/s], V são as medidas dos rotâmetros para cada condição de chama estabilizada [m^3/s], ρ é a massa específica dos gases da mistura [m^3/kg], A é a área da seção de furos do queimador [m^2], ΔA é a incerteza propagada pelas medições dos diâmetros da pela equação 1.4 e f é a razão combustível-ar para a condição estequiométrica de combustão, no caso metano-ar.

$$\Delta A = \frac{\pi \cdot d}{2} \cdot \Delta d \quad (1.4)$$

onde d é a média dos diâmetros coletados [m] e Δd é o desvio padrão das medidas [m].

As incertezas dadas pelos rotâmetros são em módulo muito maior que as apresentadas por repetibilidade. Logo, foram desconsideradas para este trabalho. Sendo assim a Tabela 1.1 traz os valores de incertezas para cada variável.

Tabela 1.1 Incertezas de medição para cada velocidade medida.

Velocidade de Chama	ΔV
26,72	1,24
24,19	1,24
22,48	1,23
26,99	1,25
12,77	1,21
25,29	1,24
15,58	1,22
20,88	1,23

Tabela 1.2 Incertezas de medição para cada razão de equivalência determinada.

Razão de Equivalência	$\Delta\theta$
1,11	0,09
1,17	0,10
0,71	0,08
1,21	0,09
0,65	0,14
1,07	0,09
0,82	0,13
0,87	0,10

APÊNDICE II – DESENHOS DA BANCADA EXPERIMENTAL

