

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPRIMENTO DE CHAMAS DIFUSIVAS LAMINARES

por

Cristian Duarte Nunes

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, junho de 2012



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DE CHAMAS DIFUSIVAS LAMINARES

por

Cristian Duarte Nunes

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: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Fernando M. Pereira

Comissão de Avaliação:

Prof. Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Prof. Flávio Tadeu van der Laan

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 29 de junho de 2012

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Fernando Pereira que esteve bastante presente na realização deste trabalho.

Ao Darlon por todo apoio dedicado, interessando-se muito em aprender.

Ao Rubens por ter emprestado sua oficina mecânica para que o protótipo da bancada fosse construída.

Ao Batista, pelo apoio prestado no LETA durante todas as atividades experimentais e na solução de entraves técnicos.

Ao prof. Dr. Nilson do Departamento de Engenharia Química, por gentilmente emprestar o manômetro para as medições do perfil de velocidades.

A Leticia, pela colaboração nas imagens das chamas e solução de dúvidas teórico-práticas.

Ao Márcio da empresa Hidrausul, por ter doado a bancada final para o LETA.

Ao Laboratório de usinagem da UFRGS por emprestar suas instalações para ajustes na bancada.

E de modo especial a minha família e namorada por todo apoio nas horas difíceis que transcorreram no desenvolvimento deste.

NUNES, C. D. **Estudo Experimental de Chamas Difusivas Laminares**. 2012. 26. 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 laminares difusivas para estudar o comprimento de chama em função das vazões de ar e combustível. Primeiramente realizou-se o estudo do campo de velocidades na região de testes de modo a determinar a configuração de montagem que resultasse no perfil mais homogêneo possível. Posteriormente foi medido o perfil de temperaturas de chama com termopar tipo K e verificou-se que este método pode ser utilizado para determinar a posição da chama. Por fim, os comprimentos de chama medidos foram comparados com as soluções de Burke - Schumann e de Roper. A construção da bancada se deu nas instalações do DEMEC/UFRGS visando sua utilização futura em outros estudos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Chama difusiva laminar, comprimento de chama visível, bancada experimental, solução de Burke e Schumann, solução de Roper.

NUNES, C. D. **Experimental Study of Diffusive Laminar Flames**. 2012. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **ABSTRACT**

The present work aims at designing and building a test bench to study the length of laminar diffusion flames as a function of the air and fuel flows. Firstly it was carried out the study of the velocity field in the test's region in order to determine the configuration of the assembly that would result the most homogeneous profile. Thereafter the temperature flame profile was measured with a K type thermocouple and was verified that this method can be used to determine the position of the flame. Finally, the flame lengths were measured and compared to Burke – Schumann's and Roper's solutions. The construction of the bench was made on the facilities of DEMEC / UFRGS aiming their use in future studies.

**KEYWORDS:** Laminar diffusion flames, visible flame length, experimental test bench, Burke - Schumann solution, Roper solution

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
2.1. CHAMA DIFUSIVA LAMINAR EM JATO .....	1
2.2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS EM CHAMAS DIFUSIVAS LAMINARES TIPO JATO .....	2
2.3. SOLUÇÃO ANALÍTICA DE BURKE SCHUMANN .....	2
2.4. SOLUÇÃO ANALÍTICA DE ROPER .....	3
3. METODOLOGIA.....	4
3.1. BANCADA EXPERIMENTAL.....	4
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES .....	5
3.3. MEDIÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURAS .....	6
3.4. METODOLOGIA DOS TESTES .....	6
3.4.1. MEDIÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES.....	6
3.4.2. MEDIÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURAS .....	7
3.4.3. MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO VISÍVEL DE CHAMAS .....	7
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	7
4.1. PERFIS DE VELOCIDADES DE AR NA SEÇÃO DE TESTES.....	7
4.2. PERFIL DE TEMPERATURAS.....	9
4.3. MEDIÇÕES DO COMPRIMENTO VISÍVEL DE CHAMA .....	10
5. CONCLUSÕES .....	13
5.1. CAMPO DE VELOCIDADES .....	13
5.2. PERFIL DE TEMPERATURAS.....	13
5.3. COMPRIMENTO DE CHAMA.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
APÊNDICE I - INCERTEZAS DE MEDIÇÃO .....	16
APÊNDICE II – PARÂMETROS E PROPRIEDADES.....	17
APÊNDICE III – DESENHOS DA BANCADA EXPERIMENTAL .....	17

## 1. INTRODUÇÃO

O intenso crescimento econômico almejado pelas nações alinhado ao padrão de consumo da população contemporânea demanda um consumo cada vez mais intenso de energia. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEM 2010), cerca de 80% da oferta interna de energia no Brasil em 2010 é dependente de processos de combustão, levando-se em conta petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e coque, lenha, carvão vegetal e derivados de cana-de-açúcar.

Diante desse panorama energético torna-se imprescindível que toda a queima de combustível ocorra da maneira mais eficaz possível. Nesse contexto, o estudo de chamas laminares difusivas é importante para permitir a avaliação de parâmetros fundamentais de combustíveis como comprimento de chama, emissão de fuligem, emissão de radiação térmica, estabilidade de chama, entre outros. Esse conhecimento fundamental pode auxiliar na otimização de equipamentos de combustão e no desenvolvimento de combustão alternativa.

Este trabalho irá estudar experimentalmente chamas laminares difusivas, utilizando-se de uma bancada de ensaios construída nas instalações da UFRGS. Com esta bancada será medido o comprimento de chama em função da vazão de combustível e os resultados serão comparados com a solução analítica de Burke Schumann, 1928 e também de Roper et al, Part II, 1977. O perfil de temperaturas na chama também será determinado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CHAMA DIFUSIVA LAMINAR EM JATO

A principal característica de chamas difusivas é que os reagentes encontram-se inicialmente separados. Assim, para que ocorra reação, é necessário que combustível e comburente se misturem. Nas chamas difusivas a mistura é controlada pelo processo de difusão de espécies químicas, sendo que o combustível e comburente se difundem em direção à frente de chama, enquanto que os produtos da combustão se difundem para longe desta frente.

A Figura 2.1, apresenta um desenho esquemático de uma chama difusiva laminar no qual o combustível é injetado através de um tubo de raio  $R$  concêntrico a outro tubo de raio  $R_0$  que injeta oxidante paralelamente ao combustível. Quando há excesso de ar, a chama é denominada sobreventilada, quando há falta de ar, a chama é subventilada

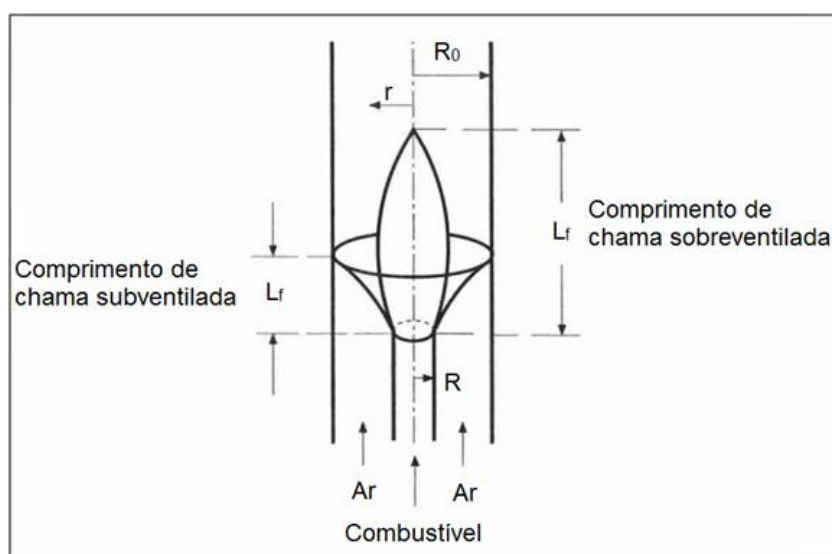


Figura 2.1: Desenho esquemático de uma chama difusiva laminar adaptada de [Coelho e Costa, 2007].

Segundo Coelho e Costa, 2007, a região onde combustível e oxidante se encontram em proporções estequiométricas ocorre a frente de chama. Coelho e Costa, 2007, ainda definem o comprimento de chama como a distância desde a saída do combustível até o ponto sobre a linha central onde a razão de equivalência é unitária. Pode-se mostrar que para um jato de secção circular, o comprimento de chama depende unicamente da vazão de combustível, Turns, 2000.

## 2.2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS EM CHAMAS DIFUSIVAS LAMINARES TIPO JATO

Para gerar uma chama laminar axissimétrica, Burke e Schumann, 1928, utilizaram um queimador com dois tubos concêntricos em seu conceito original. Segundo Zarden, 2008, esse tipo de queimador vem tornando-se normatizado com tubo interno de 4 mm de diâmetro e tubo externo com 50 mm de diâmetro a fim de que se possa coletar dados de diferentes experimentos usando o mesmo queimador.

Em seus experimentos Liu et al, 2006, utilizou uma bancada semelhante, porém com diâmetro do tubo interno 3,06 mm e diâmetro do tubo externo com 25,4 mm. Outra modificação interessante foi que Liu et al, 2006, utilizou espuma metálica sinterizada e pequenas esferas de vidro para uniformizar o fluxo de ar e gás ao mesmo tempo em que chanfrou a extremidade do tubo de gás para tentar minimizar os efeitos de borda do tubo.

Joo and Gülder, 2011 utilizou um queimador muito semelhante ao de Liu et al, 2006, porém colocou espuma de metálica sinterizada dentro dos tubos de oxidante e de combustível além de reduzir muito a espessura da saída do duto de gás.

## 2.3. SOLUÇÃO ANALÍTICA DE BURKE SCHUMANN

A primeira solução analítica para definir o formato de uma chama laminar na qual combustível e ar emergem de dois tubos verticais concêntricos foi proposta por Burke e Schumann, 1928. Para a solução, algumas hipóteses simplificativas são necessárias [Zarden, 2008]:

1. A velocidade média do ar e do combustível paralelos ao eixo de simetria são constantes -  $v = \text{constante}$ ;
2. O produto da massa específica  $\rho$  pela difusividade mássica  $D$  é assumido constante;
3. A difusão é somente radial, difusão axial é negligenciada;
4. A mistura entre os dois gases ocorre somente por difusão via movimento browniano.

Para esta solução seria necessário resolver as equações de difusão para o combustível e para o oxigênio, tendo algumas condições de contorno indeterminadas. Burke e Shumann, 1928, contornaram este problema definindo a concentração de oxigênio como sendo equivalente a uma concentração negativa de combustível. Desta maneira a variável  $C$  que define a concentração de combustível em qualquer ponto pode assumir valores positivos e negativos ao longo do domínio. A superfície de chama é definida onde a concentração de combustível  $C$  é zero.

Assumindo estas hipóteses, o problema se resume a solução de uma equação de difusão com um gás, Equação (2.1).

$$\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{D}{v} \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (2.1)$$

Na solução da Equação (2.1), assume-se como condições de contorno as Equações (2.2), (2.3) e (2.4).



$$\frac{\partial C}{\partial y} = 0 \begin{cases} \text{para } r = 0 \\ \text{para } r = R_0 \end{cases} \quad (2.2)$$

$$C = C_1 \text{ para } 0 \leq r \leq R \text{ em } y = 0 \quad (2.3)$$

$$C = -\frac{C_2}{i} \text{ para } R > r \leq R_0 \text{ em } y = 0 \quad (2.4)$$

Através do método de separação de variáveis, com as condições de contorno, Equação (2.2), condições iniciais, Equações (2.3) e (2.2), e assumindo  $C=0$  na frente de chama, pode-se solucionar a Equação (2.1), obtendo-se a Equação (2.5).

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\lambda_n R) J_0(\lambda_n r)}{\lambda_n J_0^2(\lambda_n R_0)} \exp\left(-\frac{D \lambda_n^2 y}{v}\right) = \frac{R_0^2 C_2}{2 R i C_0} - \frac{R}{2} \quad (2.5)$$

Na qual  $R$  é o raio do tubo de combustível [m],  $R_0$  é o raio do tubo de ar [m], e  $\lambda_n$  são as raízes positivas da equação  $J_1(\lambda_n R) = 0$  [adimensional],  $J_0$  e  $J_1$  são funções de Bessel de primeira espécie de ordem 0 e 1 respectivamente,  $r$  é a coordenada radial [m],  $y$  é a coordenada axial [m],  $D$  é a difusividade mássica [m<sup>2</sup>/s],  $C_1$  é a concentração inicial de gás combustível no tubo interno [mol/m<sup>3</sup>],  $C_2$  é a concentração inicial de oxigênio no tubo externo [mol/m<sup>3</sup>],  $i$  é o número de moles de oxidante em uma combustão estequiométrica [adimensional],  $C_0 = C_1 + C_2/i$ , em [mol/m<sup>3</sup>] e  $v$  é a velocidade do fluxo [m/s]. O comprimento de chama é normalmente elevado e causa um decréscimo rápido no termo exponencial, sendo assim, é possível utilizar com boa aproximação os primeiros termos da Equação (2.5), com  $\lambda_1 R_0 = 3,83$ ,  $\lambda_2 R_0 = 7,02$  e  $\lambda_3 R_0 = 10,17$ . A frente de chama pode ser determinada pelo par  $y, r$  que satisfaz a Equação (2.5), sendo que o comprimento de chama é encontrado, assumindo-se  $r=0$  para uma chama sobreventilada, Figura 2.1.

Segundo Coelho e Costa, 2007, Junto às extremidades de uma chama vertical, as forças quantidade de movimento do jato tendem a acelerar o escoamento e conseqüentemente, diminuem a largura de chama, mas este estreitamento da chama conduz a um aumento do gradiente de concentração, o que por sua vez tende a alargar a chama. Esses efeitos tendem a anular-se, assim, uma análise que não leva em conta as forças de empuxo, prevê com boa aproximação o comprimento de chama sobreventilada.

## 2.4. SOLUÇÃO ANALÍTICA DE ROPER

A solução proposta por Burke-Schumann, 1928, foi melhorada por Roper et al, Part II, 1977, que considerou o efeito quantidade de movimento do jato e o efeito do empuxo. Esse autor também determinou analiticamente os comprimentos de chamas para pórticos quadrangulares e retangulares. Coelho e Costa, 2007, traz a expressão teórica, Equação (2.6) para cálculo do comprimento de chamas para pórtico circular. Roper et al, Part II, 1977, também ajustou suas soluções para reproduzir dados experimentais, Equação (2.7).

$$L_f = \frac{V_{fu}(T_{\infty}/T_{fu})}{4\pi D_{\infty}^M \ln(1 + 1/S)} \left(\frac{T_{\infty}}{T_f}\right)^{2/3} \quad (2.6)$$

$$L_f = 1330 \frac{V_{fu}(T_{\infty}/T_{fu})}{\ln(1 + 1/S)} \quad (2.7)$$

Na qual  $L_f$  é o comprimento de chama [m],  $V_{fu}$  é vazão de combustível [m<sup>3</sup>/s],  $T_{\infty}$  é a temperatura ambiente [K],  $T_{fu}$  é temperatura do combustível [K],  $T_f$  é a temperatura da chama

[K],  $D_{\infty}^M$  é o coeficiente de difusão [ $m^2/s$ ] e  $S$  é o quociente entre o número de moles de oxidante e o número de moles de combustível em uma mistura estequiométrica [adimensional].

### 3. METODOLOGIA

Nas seções a seguir será detalhada a bancada experimental, bem como os instrumentos de medição que a compõem, a maneira como será caracterizado o perfil de velocidades, e também os dados relevantes para medição do perfil de temperaturas da chama

#### 3.1. BANCADA EXPERIMENTAL

Para este projeto foi proposta a utilização de um tubo externo modular com duas câmaras separadas por telas de malha fina, e um tubo interno alimentado por gás combustível, seguindo a configuração proposta por Burke Schumann, 1928 como é mostrado na Figura 3.1a. A bancada foi projetada em módulos para possibilitar estudar qual a configuração de montagem que permite o fluxo de ar mais uniforme possível.

Foi também utilizado um tubo de vidro com 50 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, Figura 3.1b, de modo a prevenir que correntes de ar do meio externo possam interferir na estabilidade da chama. Para que se obtenha uma distribuição uniforme das velocidades de ar na seção de testes, é proposta a utilização de esferas de vidro de diâmetro médio 1,8 mm preenchendo uma das câmaras, Figura 3.1c. As esferas possuem a vantagem de uniformizar o fluxo em comprimentos de tubo reduzidos de modo a tornar a bancada compacta. Na Figura 3.1d pode ser vista a bancada em operação.

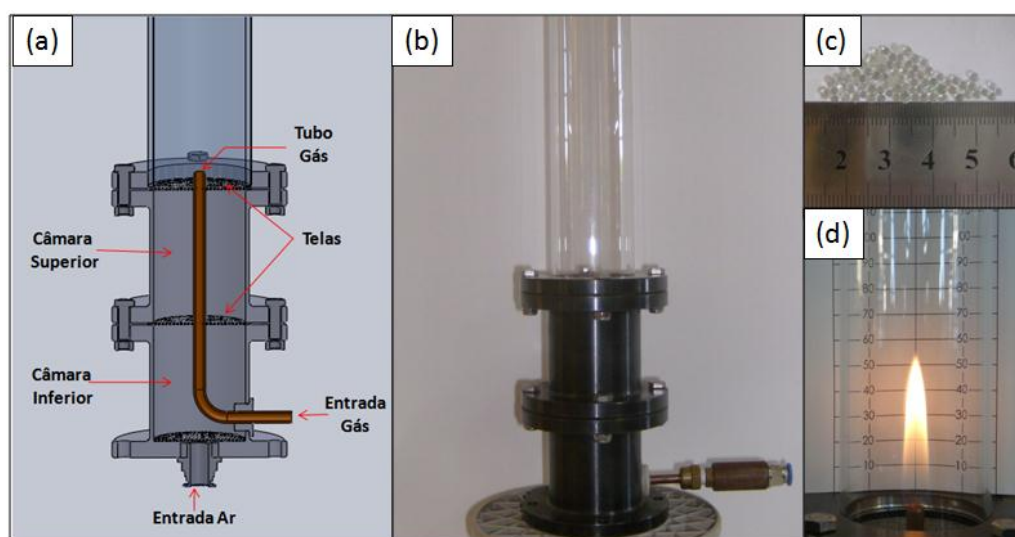


Figura 3.1: (a) Vista em corte da bancada em software CAD; (b) Montagem final da bancada; (c) Esferas de vidro utilizadas para preencher as câmaras; (d) Bancada em operação

Para medição dos parâmetros dos testes foram utilizados dois rotômetros montados em uma base, um para a vazão de ar e outro para a vazão de combustível. O rotômetro de ar possui escala de 15-160 SLPM, calibrado para pressão atmosférica e temperatura de 21°C, precisão de  $\pm 2\%$  do fundo de escala. O rotômetro de combustível possui escala de 0,15 a 1,4S SLPM, calibrado para metano, pressão atmosférica e temperatura de 21°C, com precisão de  $\pm 5\%$  do fundo de escala. Para a medição do comprimento de chama será utilizada uma escala de aço inox de 300 mm.

A configuração da bancada e seus instrumentos principais é mostrada na Figura 3.2, A linha de ar comprimido, pressão de 9 bar, tem sua pressão reduzida para 7,5 bar e assim é ligada ao rotômetro de ar e este é conectado ao engate rápido na parte inferior. O cilindro de combustível tem sua pressão reduzida para 3 bar e é ligado ao respectivo rotômetro e a saída

deste é ligada no engate rápido na lateral da bancada. Para estes experimentos foi utilizado gás metano com 99,995% de pureza, conhecido comercialmente como Metano 4.5.

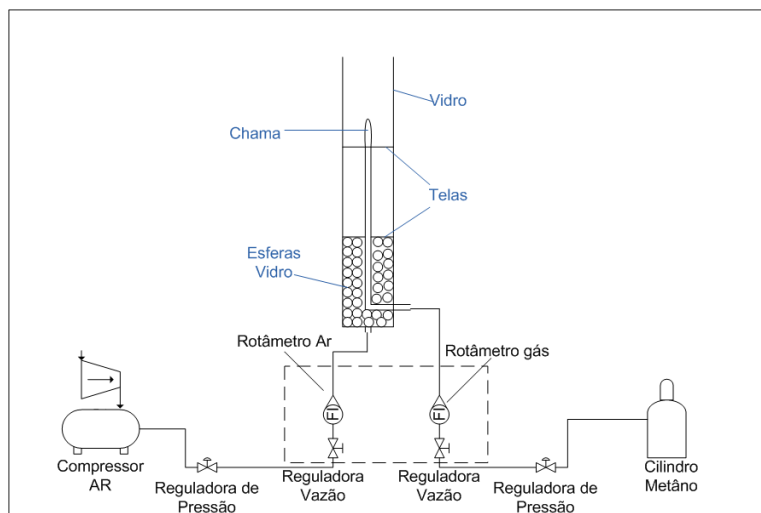


Figura 3.2 Configuração de montagem da bancada para medição do comprimento de chama

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES

A uniformidade do perfil de velocidades foi verificada utilizando um micro-manômetro com sensibilidade de 0,0001 mca e um tubo de pitot. A bancada foi montada em duas configurações diferentes: uma com as esferas na câmara superior e outra com as esferas câmara inferior. Na Figura 3.3a, pode ser vista a montagem da bancada juntamente com os rotômetros que possibilitam a medição da vazão de ar, o manômetro e o tubo de pitot.

Um desenho esquemático mostrando uma vista superior do ensaio e as duas linhas de medição cada uma com 26 pontos, pode ser vistos na Figura 3.3b. Os dados obtidos foram tratados estatisticamente conforme Apêndice I.

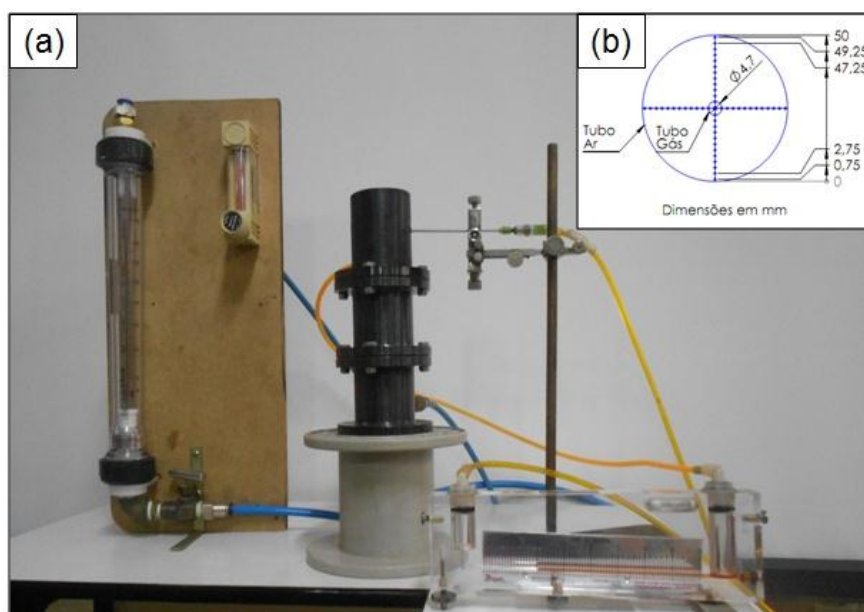


Figura 3.3: (a) Montagem da bancada para medição dos perfis de velocidade mostrando os rotômetros, manômetro, tubo de pitot; (b) Esquemático com a vista superior do ensaio mostrando as duas linhas de medição.

### 3.3. MEDIÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURAS

O perfil de temperaturas da chama foi medido utilizando um termopar do tipo K *standard*, conforme Figura 3.4a, com a junção do termopar de 0,8mm de diâmetro, fios de 0,2mm de diâmetro e limite de erro  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  ou  $\pm 0,75\%$  da medição [N.I.S.T., 2012]. Os fios foram encapsulados em um tubo cerâmico fino de 1,5 mm de diâmetro. A fim de manter a altura constante e poder variar as medições na direção radial, o termopar foi preso a um suporte, Figura 3.4c, que permite regulagem de altura e deslocamento radial através de uma cremalheira e o termopar tipo K foi ligado ao *data logger* HP Benchlink 34970A.

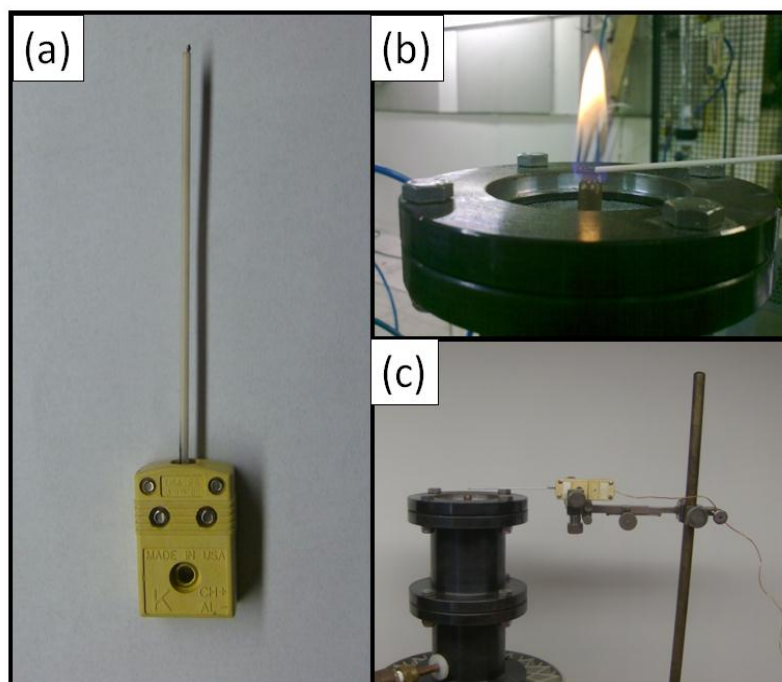


Figura 3.4: Termopar tipo K utilizado. (a) Encapsulado em um tubo cerâmico com conector; (b) Medindo a temperatura no centro da chama; (c) Fixado ao suporte que permite regulagem na altura e no sentido radial.

### 3.4. METODOLOGIA DOS TESTES

Para uma melhor compreensão da metodologia de execução dos testes, é detalhado nas próximas seções um roteiro de execução dos mesmos.

#### 3.4.1. MEDIÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES

As medições do campo de velocidade incluem os seguintes passos:

- a) O sistema de medição foi montado segundo a configuração mostrada na Figura 3.3a com ar comprimido alimentando tanto o tubo de gás quanto o tubo de ar. As vazões devem ser reguladas de modo a promover as mesmas velocidades médias para os dois tubos.
- b) O tubo de pitot foi fixado ao suporte e regulado para que o mesmo fique perpendicular ao escoamento.
- c) O pitot foi então posicionado nos pontos de medição conforme indicado na Figura 3.3b e então se aguardou meio minuto para estabilização do sistema antes de realizar cada leitura. Foram realizadas quatro medições em cada ponto.

- d) Os dados de pressão podem ser convertidos para velocidade com equações conhecidas na literatura [Fox et al, 2004].

### 3.4.2. MEDIÇÃO DO PERFIL DE TEMPERATURAS

Por motivos de segurança, esta etapa do projeto foi realizada sempre com a presença de no mínimo duas pessoas presentes no laboratório. O perfil de temperaturas foi medido seguindo as seguintes etapas:

- a) A bancada de ensaios foi montada conforme configuração indicada na Figura 3.2.
- b) O termopar tipo K foi fixado ao suporte conforme Figura 3.3c e ligado ao *data logger*, e então posicionado em duas alturas diferentes em relação a saída do tubo de combustível, sendo 3 e 12 mm.
- c) O termopar foi então inserido na chama na direção radial e medidos pontos de temperaturas a cada 1 mm do raio. Em cada ponto foi aguardado 3 minutos até a temperatura estabilizar e então realizadas sete medidas consecutivas.

### 3.4.3. MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO VISÍVEL DE CHAMAS

Semelhante as medição do perfil de temperatura, esta etapa do projeto foi realizada sempre com a presença de no mínimo duas pessoas presentes no laboratório. A medição dos comprimentos de chama obedeceu à seguinte metodologia:

- a) A bancada de ensaios foi montada conforme configuração indicada na Figura 3.2.
- b) A escala de inox de 300 mm foi fixada verticalmente atrás do vidro de modo que o ponto zero de sua escala coincidiu horizontalmente com a extremidade do tubo de combustível.
- c) As vazões de combustível e ar foram reguladas de modo a permitir a mesma velocidade dos fluidos na região dos testes, reproduzindo desta maneira das condições calculadas por Burke Schumann, 1928 e Roper et al, Part II, 1977, e em seguida foi dada a ignição da chama.
- d) Para cada patamar de vazão, foi aguardado um minuto de modo a estabilizar o sistema e então foi realizada a medição do comprimento visível de chama na escala. Foram realizadas quatro medições em cada patamar de vazão.
- e) Uma câmera digital foi posicionada em um tripé e com esta, foram retiradas fotografias das chamas em cada patamar de vazão

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma melhor compreensão dos resultados, estes foram divididos em três seções descritas a seguir:

### 4.1. PERFIS DE VELOCIDADES DE AR NA SEÇÃO DE TESTES

Os perfis de velocidade foram medidos utilizando a metodologia apresentada na Seção 3.4.1. de modo a determinar a configuração que apresentasse o campo de velocidades mais homogêneo possível. A Figura 4.1 mostra a distribuição do campo de velocidades com as esferas de vidro posicionadas na câmara superior, enquanto que a Figura 4.2 mostra a distribuição do campo de velocidades com as esferas de vidro posicionadas na câmara inferior. As duas linhas dos gráficos mostram a velocidade ao longo do diâmetro do queimador, porém defasadas de 90° e para uma melhor compreensão, foi representado neste gráfico a posição do tubo de gás combustível.

Comparando os perfis de velocidades apresentados nas duas configurações de montagem das esferas de vidro, fica evidente que as mesmas posicionadas na câmara inferior

permitem o perfil mais homogêneo, visto que, na configuração oposta, o ar cria caminhos preferenciais, distorcendo o fluxo e alcançando, em alguns pontos, velocidades aproximadamente três vezes maiores que as medidas no centro do queimador.

Outro ponto importante a ressaltar é a influência da espessura do tubo interno na distorção do perfil de velocidades. O tubo possui 0,9 mm de espessura e um chanfro na sua extremidade da mesma forma que Liu, 2006, entretanto continua a influenciar a distribuição de velocidades, conforme Figura 4.2.

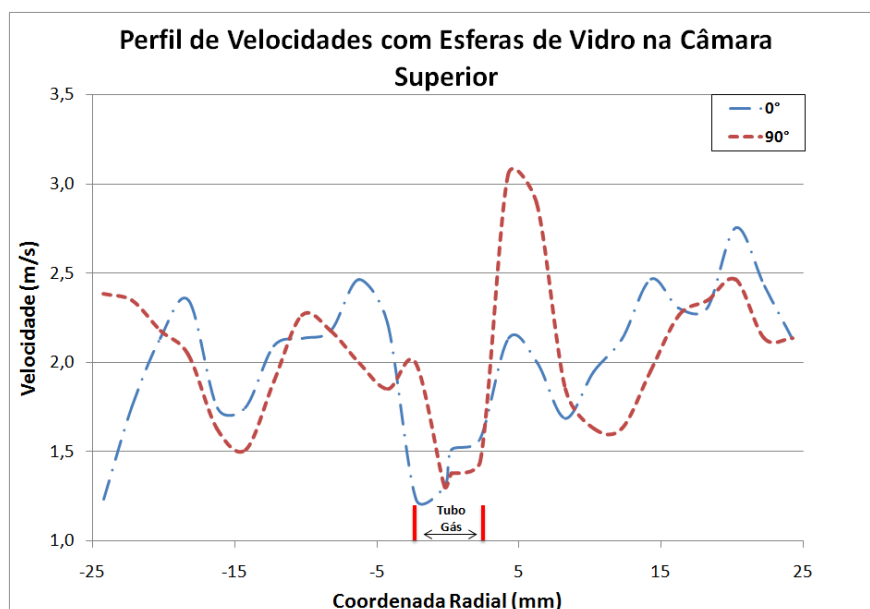


Figura 4.1: Distribuição do campo de velocidades com as esferas de vidro montadas na câmara superior.

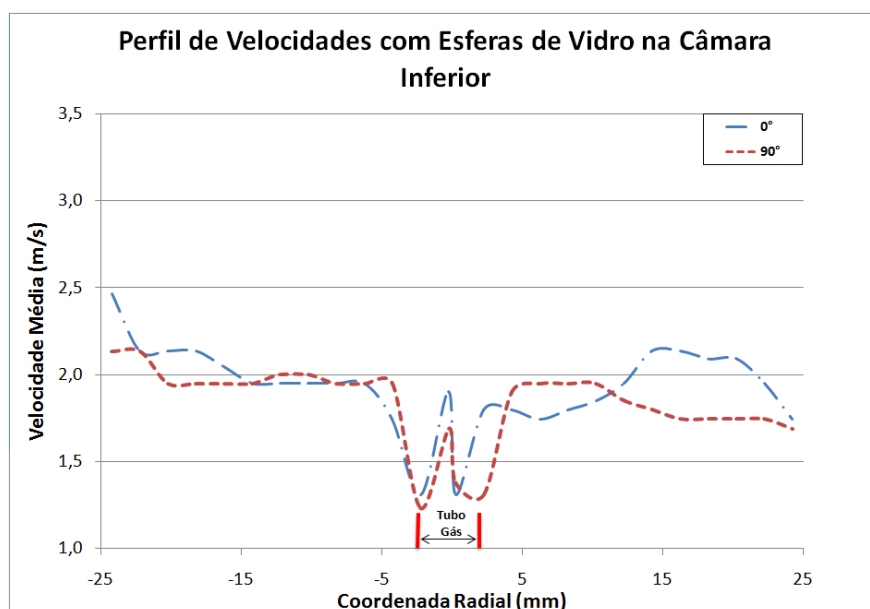


Figura 4.2: Distribuição do campo de velocidades com as esferas de vidro montadas na câmara inferior

Os dados apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 foram tratados estatisticamente conforme o Apêndice I. As velocidades apresentaram uma incerteza máxima de 33% do valor medido, que em termos absolutos representa  $\pm 0,7$  m/s. Esta incerteza deve-se em parte ao fato de se estar medindo velocidades relativamente pequenas com um tubo de pitot.

O perfil de velocidades produzido com a configuração das esferas montadas na câmara inferior se mostra menos homogêneo quando comparado a outro ensaio semelhante realizado por Blanken, 2007, mostrado na Figura 4.3. Neste experimento, Blanken, 2007 mediu velocidade do escoamento com anemômetro de fio quente em três diâmetros diferentes para o duto de ar, chegando a encontrar velocidades iguais a zero em alguns pontos.

No entanto, os ensaios do presente trabalho foram realizados com vazões superiores as utilizadas nos testes de combustão por limitação da medição de velocidade utilizando pitot e manômetro.

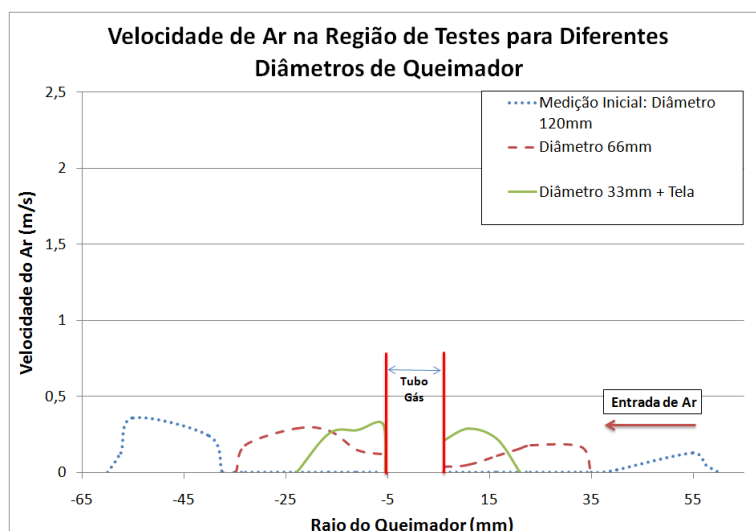


Figura 4.3: Perfil de velocidades para três diâmetros diferentes do duto de ar adaptado de [Blanken, 2007].

#### 4.2. PERFIL DE TEMPERATURAS

Foi realizada a medição do perfil de temperaturas de uma chama com 38 mm conforme Seção 3.4.2. Para esta chama, foram medidas temperaturas em duas alturas diferentes, 3 mm e 12 mm, e os resultados das medições encontram-se na Figura 4.4.

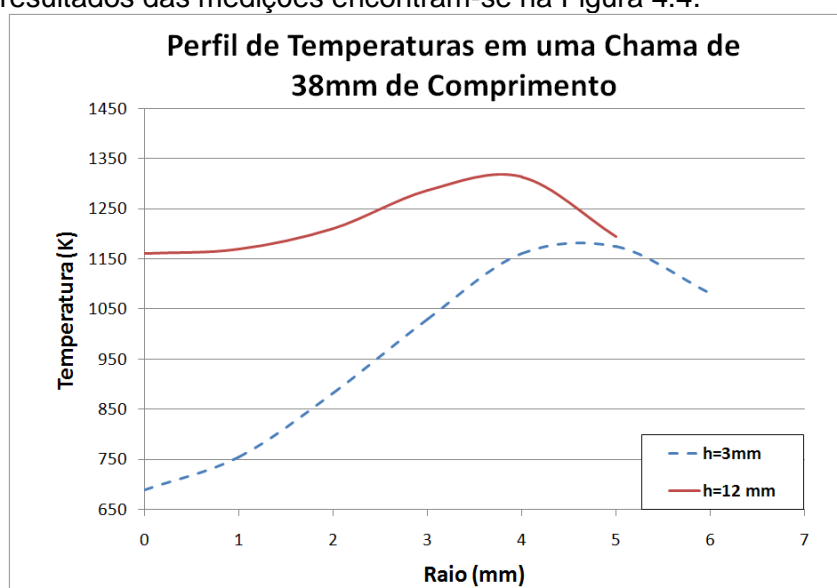


Figura 4.4: Perfil de temperaturas para uma chama de 38 mm medido com termopar tipo K em duas alturas diferentes (3 mm e 12 mm) utilizando Metano.

Estes resultados diferem dos perfis de temperaturas encontrados na literatura, conforme pode-se ver nas Figuras 4.5. Isso se deve a diversos fatores que quando comparados com McEnally et Al, 1997, tornam evidente que:

- Para realização da medição, dispunha-se de um termopar tipo K, que segundo N.I.S.T., 2012, mede temperaturas em um range de 0 a 1250°C, enquanto que McEnally et Al, 1997, utilizou um termopar de platina tipo R que mede temperaturas em torno de 1750°C;
- O diâmetro da junção do termopar utilizado foi de 0,8 mm, enquanto que McEnally et Al, 1997, utilizou junções de 0,16 a 0,3 mm. Sendo a espessura da frente de chama em torno de 0,1 mm, junções grandes, medem uma média da temperatura.
- Outro ponto a observar é que a temperatura indicada na medição é a temperatura do termopar, e não do gás, pois o mesmo perde calor para as vizinhanças por radiação, sendo necessário realizar a correção das temperaturas. Equações para a correção da temperatura podem ser encontradas na literatura, [McEnally et Al, 1997].
- Por fim, quando o termopar é inserido na chama, a fuligem decorrente da combustão acumula-se na junção, aumentando seu tamanho e alterando a emissividade.

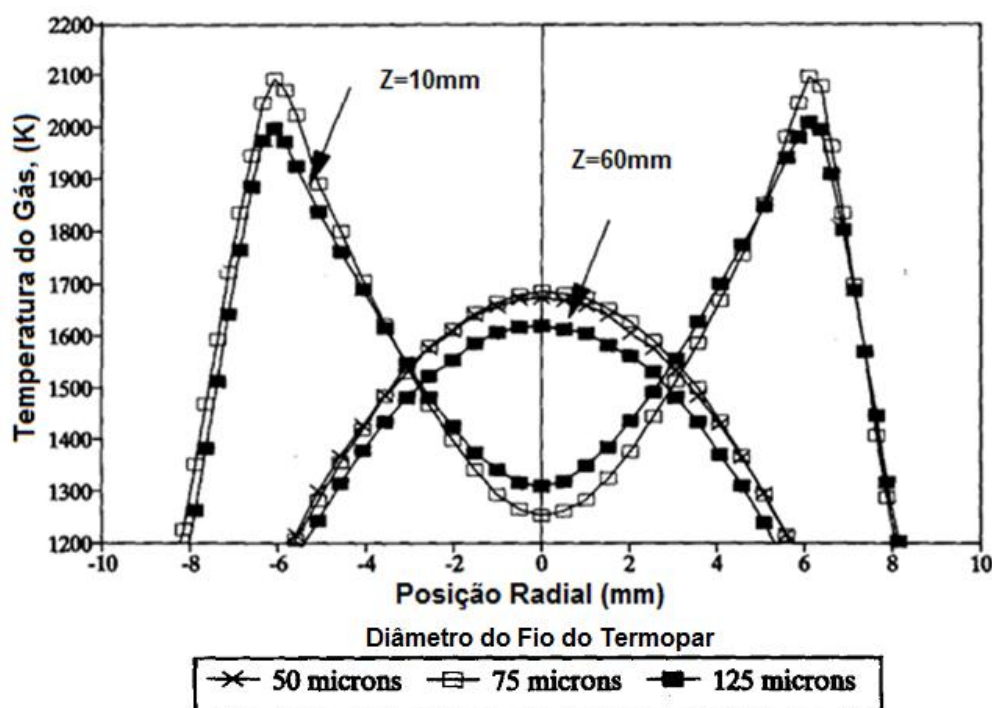


Figura 4.5: Perfil de temperaturas medidas em uma chama de difusão laminar de metano [McEnally et Al, 1997]

Com estas informações tem-se que as medidas realizadas com o termopar tipo K podem ser utilizadas qualitativamente para determinar o perfil da chama, visto que o perfil de temperaturas mostrou comportamento semelhante a McEnally et Al, 1997.

#### 4.3. MEDIÇÕES DO COMPRIMENTO VISÍVEL DE CHAMA

As medições do comprimento visível de chama foram realizadas conforme Seção 3.4.3. As Equações de Burke Schumann, 1928, (2.5) e Equações de Roper, 1978, teórica (2.6) e experimental (2.7) foram utilizadas para cálculo do comprimento de chama e os parâmetros e propriedades utilizados podem ser encontradas no Apêndice II. Os resultados das medições e cálculos foram dispostos na Figura 4.6.



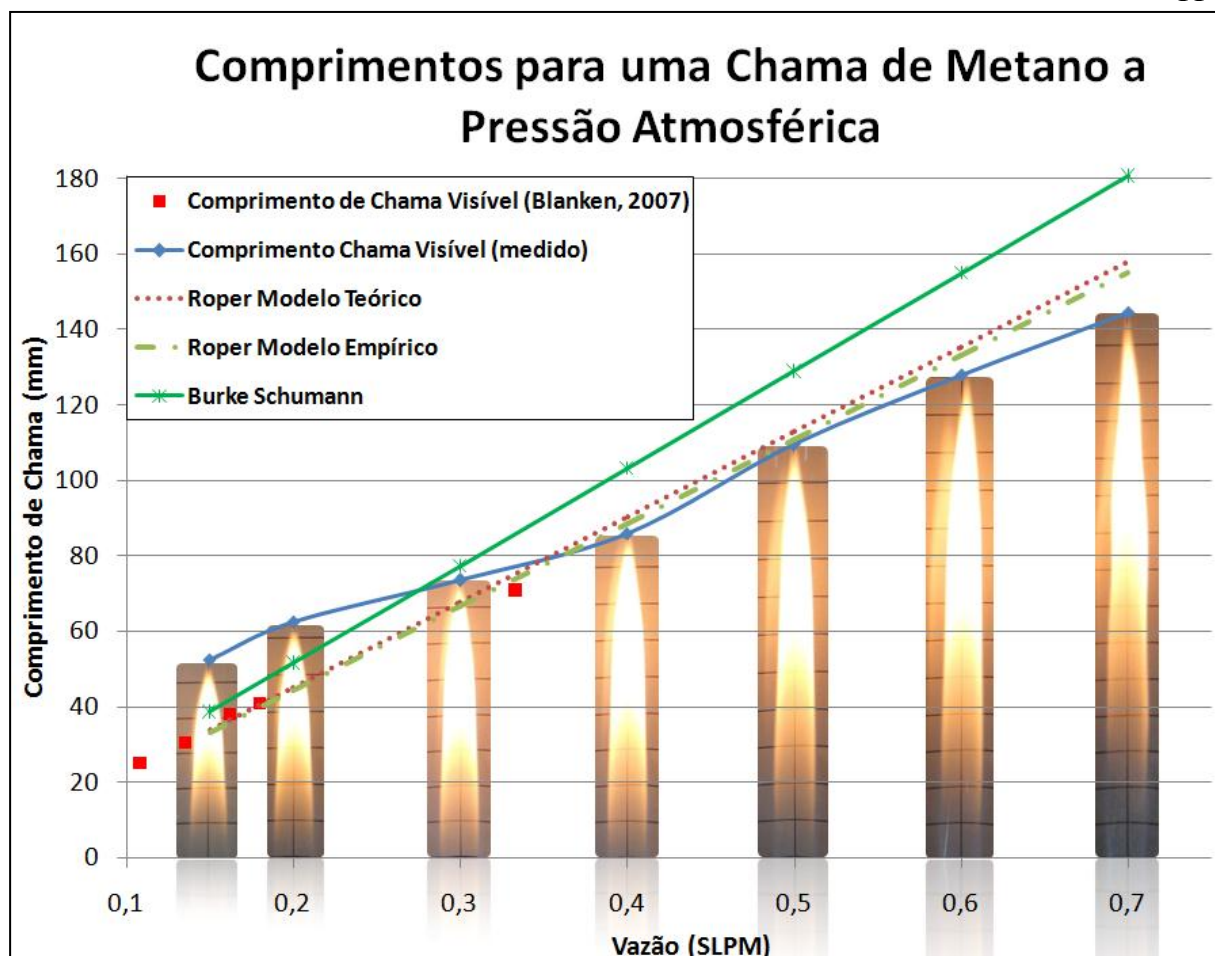


Figura 4.6: Comprimentos de chama visível para metano e pressão atmosférica, comparados às soluções analíticas de Burke Schumann, 1928, Roper et al, Part II, 1977 e Blanken, 2007.

Os dados experimentais demonstram comportamento semelhante aos dados calculados com a solução analítica proposta por Roper et al, Part II, 1977. Para vazões baixas de combustível, o sistema produziu chamas laminares estáveis, possibilitando fácil medição. Para vazões de combustível mais altas, acima de 0,5 SLPM, o sistema torna-se um pouco instável, mas ainda assim possibilitando medições até 0,7 SLPM. Acima de 0,7 SLPM não foi possível realizar medições de comprimento visível de chama, pois a mesma descola do bico do tubo de gás, envolvendo assim outros fenômenos não abordados neste trabalho. Os comprimentos de chama foram tratados estatisticamente conforme Apêndice I, para uma confiabilidade de 95%, apresentando incerteza máxima de  $\pm 3,6\text{mm}$ , correspondendo a 5% do valor medido.

A comparação dos comprimentos de chama calculados com a Equação de Burke Schumann, 1928, com relação aos valores medidos e também os valores calculados com as Equações de Roper et al, Part II, 1977, apresenta diferenças importantes. Isto ocorre porque as correlações de Roper não assumem algumas das simplificações assumidas por Burke-Schumann, por exemplo, Roper permite que as velocidades variem ao longo do tubo em função da expansão na chama. Porém, a Equação (2.5) apresenta a vantagem de se conseguir determinar o perfil da chama, o que não se consegue com as Equações (2.6) e (2.7), que calculam apenas o comprimento da mesma. A Figura 4.7 mostra o perfil de chama calculado com a Equação (2.5), em comparação com a imagem da chama, ambas para a vazão de combustível de 0,3 SLPM. Os dados encontrados para o contorno da chama são bons, levando-se em consideração as simplificações empregadas no desenvolvimento desta equação.

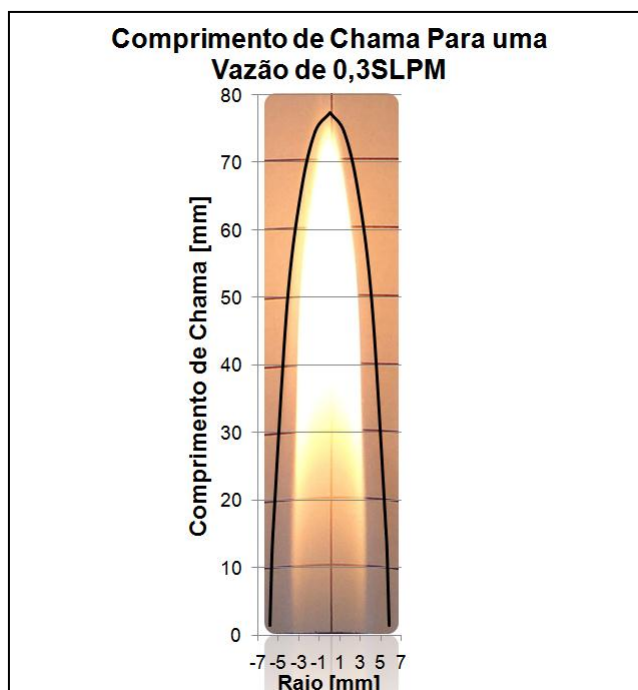


Figura 4.7: Perfil de chama calculado com a Equação (2.5), em comparação com a imagem de uma chama, ambos para uma vazão de 0,3SLPM

A incerteza relacionada à medição de vazão de combustível é de  $\pm 5\%$  do fundo de escala do rotâmetro, correspondendo a  $\pm 0,07$  SLPM. Nas vazões mais altas este valor não possui influência significativa, já quando se está trabalhando próximo à vazão mínima, esta incerteza corresponde a 46% do valor medido. Assim, para vazões de gás de 0,15, 0,20 SLPM, os dados experimentais de medição do comprimento de chama visível apresentam variação de 35 e 28% respectivamente, em função dos valores calculados pela equação de Roper et al, Part II, 1977 e dos dados experimentais de Blanken, 2007. Esse comportamento pode ser justificado pela incerteza de medição do rotâmetro de combustível.

O número de Reynolds associado às vazões de combustível apresentou valores de 48 para o menor comprimento de chama medido e 223 para o maior comprimento de chama medido, já o Reynolds para as vazões de ar apresentou valores de 544 para o menor comprimento de chama medido, 2140 para comprimento de chama de 128 mm e 2517 para o comprimento de chama de 145 mm. Segundo Fox et al, 2004, o número Reynolds crítico é de 2300, portanto, as chamas de 128mm e 145mm estão na região de transição para regime turbulento.

O formato da chama, para comprimentos pequenos, também apresentou-se bastante semelhante aos dados encontrados na literatura. A Figura 4.8 traz uma comparação entre a chama encontrada nos experimentos de Liu, 2011, Figura 4.8a e a chama produzida com a configuração de esferas de vidro na câmara inferior, Figura 4.8b.

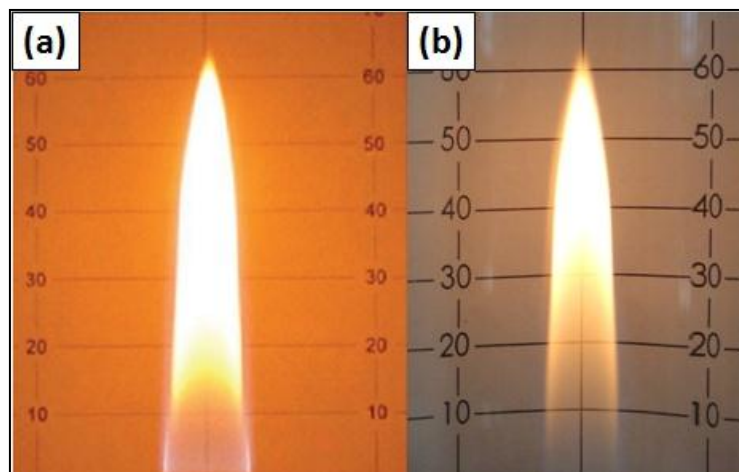


Figura 4.8: Comprimento de chama laminar (mm), para pressão atmosférica e metano (a) adaptado de [Liu and SmallWood, 2011], (b) Produzido com a configuração de esferas de vidro montadas na câmara inferior.

## 5. CONCLUSÕES

Da mesma maneira que na apresentação dos resultados, as conclusões serão divididas em quatro seções para facilitar o entendimento.

### 5.1. CAMPO DE VELOCIDADES

A configuração de montagem modular da bancada, associada à utilização das esferas de vidro, Figura 3.1c, mostrou-se bastante eficiente, pois permitiu a criação de um perfil de velocidades aproximadamente homogêneo na região de testes, tornando assim a bancada bastante compacta e barata. Em estudos de chama laminar, o perfil de velocidades é sempre um fator que requer atenção especial, pois afeta diretamente a forma da chama, desta maneira a qualidade dos resultados.

O campo de velocidades apresentou o comportamento aproximadamente homogêneo na região de testes com a configuração de esferas de vidro na câmara inferior, observado na Figura 4.2, sendo esta a configuração utilizada nas medições de perfil de temperatura e comprimento visível de chama. O perfil de velocidades na configuração de esferas de vidro montadas na câmara superior mostrou-se inadequado para realização das medições de comprimento de chama, vistos que desta forma cria caminhos preferenciais afetando a qualidade da chama.

O sistema de medição utilizado permitiu uma boa comparação entre os perfis de velocidade na região de testes sendo uma ferramenta utilizada na definição da maneira adequada de operação do queimador. Contudo, para um estudo mais aprofundado do escoamento envolvido nestes testes, um anemômetro de fio quente seria indicado para medir velocidades menores e com incertezas de medição menores, visto que com o manômetro que dispunha-se para realizar as medições, a menor velocidade que pôde ser medida foi de 1,2 m/s.

### 5.2. PERFIL DE TEMPERATURAS

A técnica utilizada para medição de temperaturas pode ser empregada para uma avaliação qualitativa do perfil da chama, que é identificada como sendo coincidente com as temperaturas mais elevadas alcançadas.

Para um próximo trabalho, a fim de se obter dados quantitativos, seria necessária a utilização de um termopar para uma faixa de temperaturas mais altas como, por exemplo, um termopar tipo C que mede temperaturas de até 2320°C [N.I.S.T., 2012]. Outro ponto de

modificação seria a utilização de um termopar com a união de diâmetro com aproximadamente 0,2 mm, ou menor, a fim de obter uma zona de reação mais representativa, além de realizar a correção para perda de calor por radiação para as vizinhanças sofrida pelo termopar.

Outra linha de pesquisa que pode ser adotada seria a utilização de termopares para medir a quantidade de fuligem na chama, pois uma vez dentro da chama, a união do termopar acumula fuligem, alterando seu diâmetro e emissividade. Dessa forma, o comportamento da indicação de temperatura pode ser associado à quantidade de fuligem na chama.

### 5.3. COMPRIMENTO DE CHAMA

Em baixas vazões, a bancada produziu chamas estáveis, permitindo fácil medição do comprimento de chama e também a medição do perfil de temperaturas. Assim, o experimento montado pode ser utilizado para trabalhos futuros como a medição de fuligem na chama e na geração de dados experimentais para validação de modelos computacionais.

Já para vazões maiores (acima de 0,6 SLPM para a vazão combustível, equivalendo a alturas acima de 128 mm e velocidade de 0,63 m/s) a chama torna-se instável. Esse fato deve-se ao número de Reynolds associado à vazão de ar, que se encontra na faixa de 2100, estando, portanto, na faixa de transição de escoamento laminar para turbulento.

Comparando-se os comprimentos de chama medidos em função dos resultados analíticos de Burke Schumann e Roper, Figura 4.6, é possível concluir que:

- a) Os comprimentos de chama calculados com as Equações de Roper et al, Part II, 1977, apresentam concordância com os dados medidos por Blanken, 2007, sendo desta forma validada a equação.
- b) Concordância entre os valores do comprimento de chama medido e os dados calculados com as Equações de Roper et al, Part II, 1977, para vazões acima de 0,3SLPM. Para vazões mais baixas, a incerteza na medição do combustível é da ordem de 40% o que produz chamas com valores 35% maiores com relação aos valores calculados.
- c) A Equação (2.5) de Burke Schumann, 1928, apresenta a vantagem de poder calcular o formato da chama, mas apresenta resultados inferiores aos de Roper.

Para um próximo trabalho seria necessário adquirir um rotâmetro com incerteza de medição menor ou com a faixa de medição que possibilite enquadrar os valores de 0,15 a 0,4 SLPM mais próximo ao final da escala, como por exemplo, 0,04 a 0,4SLPM.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blanken, I.R.; **Laminar Co-flow Burner**, Internal Research Traineeship, Eindhoven University of Technology, 2007

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

Burke S.P. and Schumann T.E.W., **Difusion Flames**, Combustion Simposium, vol. 20, N°10, pp 998-1004, 1928.

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

Empresa de Pesquisa Energética – EPE; **Balanco Energético Nacional**, Ano Base 2010, [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2011.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf), Acessado em 22/04/2012

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

Joo, H.I. and Gülder Ö.L.; **Experimental Study of Soot and Temperature Field Structure of Laminar Co-flow Ethylene–Air Diffusion Flames with Nitrogen Dilution at Elevated Pressures**, Combustion and Flame vol. 158, pp 416–422, 2011.

Liu, F.; Thomson, K. A.; Guo, H. and Smallwood, G. J.; **Numerical and Experimental Study of an Axisymmetric Coflow Laminar Methane–Air Diffusion flame at Pressures Between 5 and 40 Atmospheres**, Combustion and Flame vol. 146, pp 456–471, 2006.

Liu, F. and Smallwood, G. J.; **Control of the Structure and Sooting Characteristics of a Coflow Laminar Methane/Air Diffusion Flame Using a Central Air Jet: An Experimental and Numerical Study**, Proceedings of the Combustion Institute vol. 33, pp 1063–1070, 2011.

Mcenally, C.S.; Köylü, Ü.Ö.; Pfefferle, L.D., and ROSNER, D.E.; **Soot Volume Fraction and Temperature Measurements in Laminar Nonpremixed Flames Using Thermocouples**, COMBUSTION AND FLAME vol. 109 pp 701-720, 1997.

N.I.S.T., **Reference Tables Monograph 175**, Revised to ITS-90, Consultado em 31/05/2012.

Roper, F.G.; Smith, C and Cunningham, A.C., **The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Sizes: Part II. Experimental Verification**, Combustion and Flame, vol. 29, pp 227-234, 1977.

Turns, S.R.; **An Introduction To Combustion**, McGraw-Hill Higher Education, 2<sup>nd</sup> ed., 2000.

Zarden, R.M.G.; **Development of a Laminar Co-flow Burner Experiment to Study the Combustion of Modern Automotive (bio-) Fuels at Elevated Pressures**, Eindhoven University of Technology, 2008.

## APÊNDICE I - INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

### 1.1. PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

Segundo Beckwith, 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  $\Delta z$ , devido às das outras grandezas, obtido através do método apresentado por Kleine e McClintock, mostrado na Equação (01).

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial z}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (01)$$

Onde  $x_i$  é a variável independente,  $\Delta x_i$  é a incerteza da variável independente e  $z$  é a variável dependente.

### 1.2. INCERTEZAS DE REPETIBILIDADE

A grandeza física que é obtida através de um procedimento experimental é sempre uma aproximação do valor verdadeiro da mesma grandeza. A teoria de erros tem como objetivo determinar a melhor estimativa para a grandeza, e o quanto essa pode ser diferente do valor verdadeiro.

O desvio padrão amostral é utilizado para amostras com número de eventos inferior a 30, chamadas de pequenas amostras, sendo a distribuição *t de Student* a que melhor se adapta para este caso. A incerteza de repetibilidade  $\Delta E_R$  é dada pela Equação (02)

$$\Delta E_R = \pm t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (02)$$

Onde  $t_{\frac{\alpha}{2}}$  é o valor da distribuição para uma confiabilidade  $\alpha$ ,  $s$  é o desvio padrão amostral e  $n$  é o número de amostras.

### 1.3. INCERTEZA DE EXATIDÃO

No caso de medições com instrumentos analógicos assume-se que a incerteza de exatidão é dada pela Equação (03).

$$\Delta E_E = 0,5 \delta_x \quad (03)$$

Onde  $\delta_x$  é a menor divisão do instrumento.

### 1.4. INCERTEZA TOTAL

A incerteza total relaciona às incertezas de exatidão e repetibilidade, respectivamente e é dado pela Equação (04).

$$\Delta E_T = \sqrt{(\Delta E_R)^2 + (\Delta E_E)^2} \quad (04)$$

## APÊNDICE II – PARÂMETROS E PROPRIEDADES

Tabela 01: Parâmetros e propriedades utilizados nas Equações (2.5), (2.6) e (2.7)

<b>Equação de Burke Schumann - (2.5)</b>			
<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>	<b>Fonte</b>
Raio do tubo de combustível	0,025	m	Parâmetro Geométrico
Raio do tubo de ar	0,00235	m	Parâmetro Geométrico
Difusividade mássica	$4,925 \times 10^{-5}$	$m^2/s$	Burke e Shumann, 1928
Concentração inicial de combustível	1	$mol/m^3$	Burke e Shumann, 1928
Concentração inicial de oxigênio	0,21	$mol/m^3$	Burke e Shumann, 1928
Número de moles de oxidante em uma combustão estequiométrica	2	mol/mol	Burke e Shumann, 1928
Vazão de Combustível	0,15 a 0,7	SLPM	Valores Medidos

<b>Equações de Roper- (2.6) e (2.7)</b>			
Vazão de Combustível	0,15 a 0,7	SLPM	Valores Medidos
Temperatura ambiente	293	K	Roper et al, Part II, 1977
Temperatura do combustível	293	k	Roper et al, Part II, 1977
Temperatura da chama	1500	k	Roper et al, Part II, 1977
Difusividade mássica	$2 \times 10^{-5}$	$m^2/s$	Roper et al, Part II, 1977
Quociente entre o número de moles de oxidante e o número de moles de combustível em uma mistura estequiométrica	9,52	mol/mol	Coelho e Costa, 2007

## APÊNDICE III – DESENHOS DA BANCADA EXPERIMENTAL

A

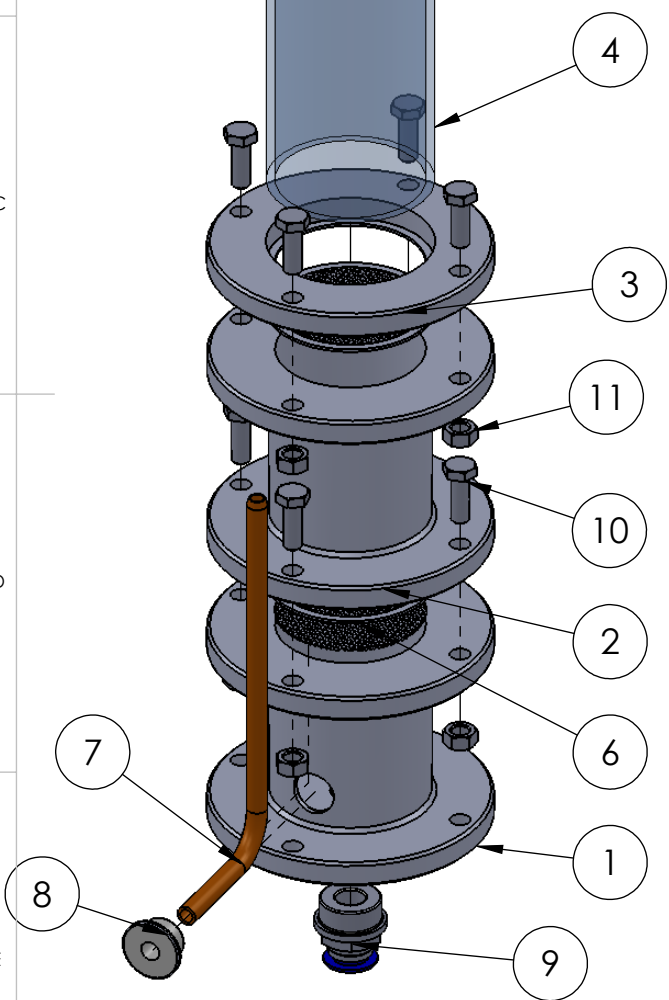
B

C

D

E

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	QDT.
1	Base Inferior	1
2	Base Superior	1
3	Flange	1
4	Vidro 50X300X3[mm]	1
5	Grade inferior	1
6	Grade	2
7	Tubo	1
8	Bucha Nylon	1
9	Engate rápido	1
10	Parafuso M6X35	8
11	Porca M6	8



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. DE SUPERFÍCIE:  
TOLERÂNCIAS:  
LINEAR:  
ANGULAR:

ACABAMENTO:  
**Conforme Desenho**

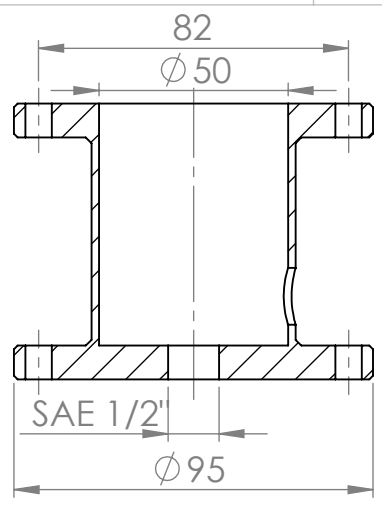
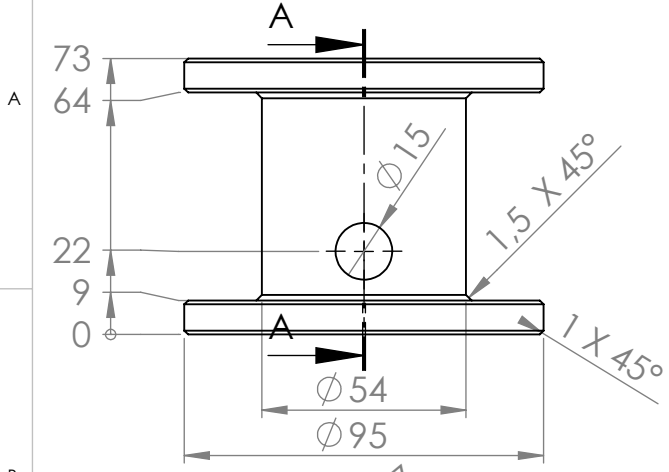
REBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO      REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES	Nunes, C. D.		30/05/12		
VERIF.					
APROV.					
F MANUF					
QUALID					
				MATERIAL:	
				<b>Conforme Desenho</b>	
				PESO:	

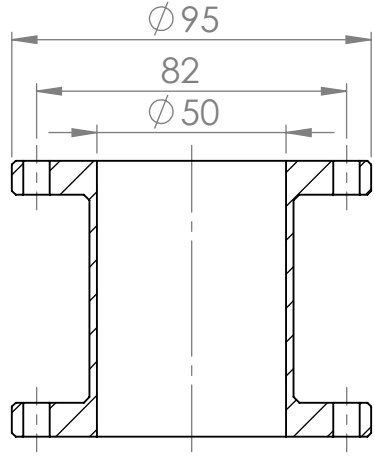
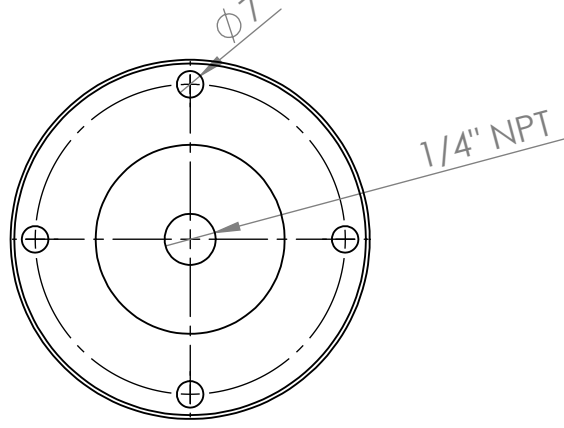
TÍTULO:		<b>Conjunto</b>	
DES. Nº	<b>01</b>	A4	
ESCALA: 1:5	FOLHA 1 DE 1		





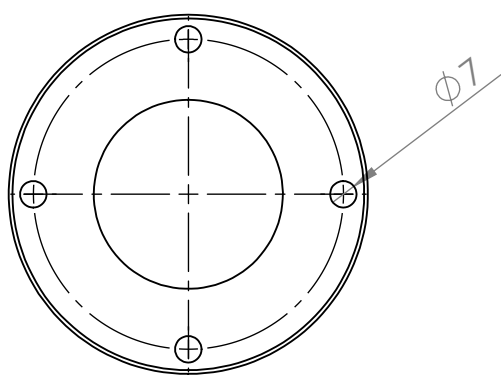
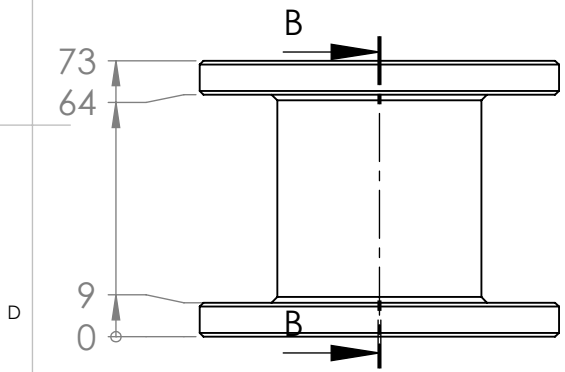
SEÇÃO A-A

Câmara Inferior



SEÇÃO B-B

Câmara Superior



SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. DE SUPERFÍCIE: PADÃO  
PROCESSO

ACABAMENTO:  
**OXIDAÇÃO NEGRA**

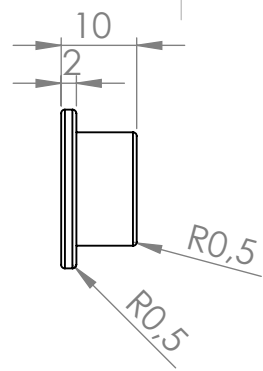
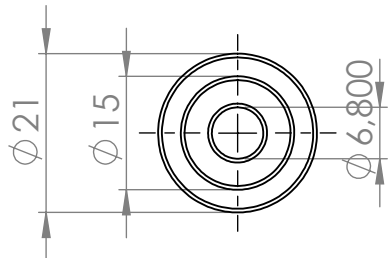
REBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO      REVISÃO

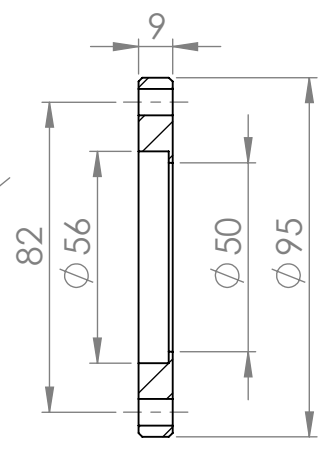
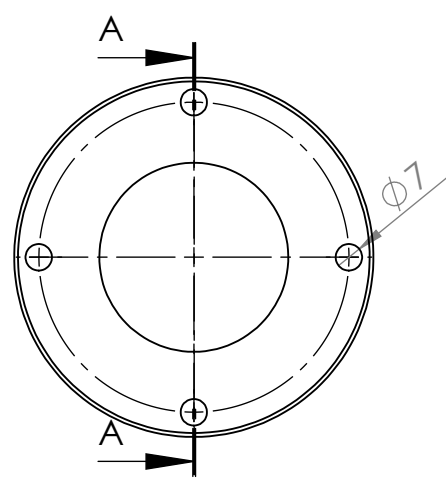
**QUANTIDADE: 01**

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES	NUNES, C.		31/05/12		
VERIF.					
APROV.					
F MANUF					
QUALID				MATERIAL:	
				<b>SAE 1020</b>	
				PESO:	

TÍTULO:	<b>Camaras</b>	
DES. Nº	<b>02</b>	<b>A4</b>
ESCALA: 1:2	FOLHA 1 DE 1	

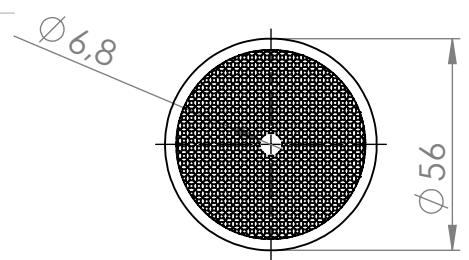


**BUCHA**  
Material: Nylon  
Quantidade: 01

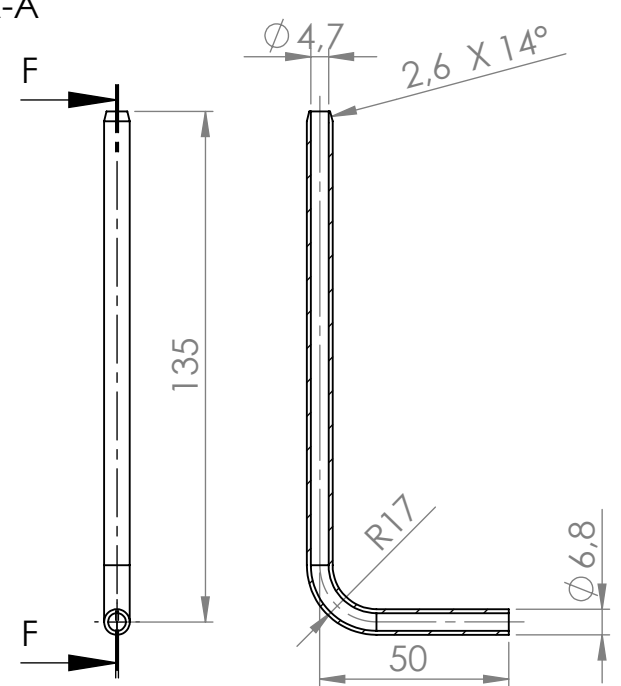


**FLANGE**  
Material: SAE 1020  
Quantidade: 01  
Proteção Superficial: Ox. Negra

SEÇÃO A-A



**TELA**  
Material: SAE 1020  
Quantidade: 02  
Mesh: 0,8mm



**TUBO GÁS** SEÇÃO F-F  
Material: cobre  
Quantidade: 01

SE NÃO ESPECIFICADO:  
DIMENSÕES EM MILÍMETROS  
ACABAM. DE SUPERFÍCIE: PADÃO  
PROCESSO

ACABAMENTO:  
Conforme desenho

REBARBAR E  
QUEBRAR  
ARESTAS  
AGUDAS

NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO REVISÃO

QUANTIDADE: Conforme Desenho

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DES	NUNES, C.		31/05/12		
VERIF.					
APROV.					
F	MANUF				
	QUALID				
				MATERIAL:	
				Conforme Desenho	
				PESO:	

TÍTULO:	<b>ACESSÓRIOS</b>	
DES. Nº	<b>03</b>	A4
ESCALA: 1:2	FOLHA 1 DE 1	