

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DA COMBUSTÃO EM UM QUEIMADOR POROSO RADIANTE

por

Franck Mocellin Bortoncello

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, julho de 2012

ESTUDO EXPERIMENTAL DA COMBUSTÃO EM UM QUEIMADOR POROSO RADIANTE

por

Franck Mocellin Bortoncello

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 Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Fernando Marcelo Pereira

Comissão de Avaliação:

Prof. Paulo Otto Beyer

Prof. Bardo E. Joseff Bodmann

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 05, julho de 2012.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Fernando M. Pereira pela efetiva orientação.

Ao técnico do laboratório João Batista e ao bolsista de iniciação científica Renato Pedrotti.

Aos meus pais Rubi e Juraci pelo apoio incondicional.

Aos financiadores da pesquisa: Programa de Recurso Humanos da Agência Nacional de Petróleo - 38 (PRH-ANP 38).

BORTONCELLO, F. M. **Estudo experimental da combustão em um queimador poroso radiante**. 2012. 18. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo experimental da combustão de metano e ar em um queimador poroso radiante. Uma bancada de testes capaz de avaliar a combustão em queimadores porosos radiantes sob diversas condições de operação foi construída e usada para estudar um queimador construído com esponjas cerâmicas comerciais. O diagrama de estabilidade do queimador foi determinado para um queimador poroso dentro da faixa de operação dos medidores de vazão disponíveis. A eficiência de radiação direcional do queimador foi estimada entre 20 e 23 % da energia total liberada pela reação de combustão do metano para uma razão de equivalência de 0,7.

PALAVRAS-CHAVE: Bancada experimental, estabilidade de chama, queimador poroso

BORTONCELLO, F. M. **Experimental study of the combustion within a porous media**. 2012. 18. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

An experimental study about the combustion of methane and air within a porous burner was performed. A test bench capable to evaluate the combustion within porous media for a range of different operating conditions was developed and used to study a burner made of commercial ceramic foam. The stability diagram was determined for a burner, within the range limits of the flow controllers. The radiation performance of the burner was estimated between 20 and 23% of energy released by the combustion of methane for a equivalence ratio of 0,7.

KEYWORDS: Test bench, flame stability, porous media

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4 MATERIAIS E MÉTODO.....	4
4.1 Bancada de testes.....	4
5 METODOLOGIA.....	6
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
7. CONCLUSÕES	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
Apêndice I	13
Apêndice II.....	14
Apêndice III.....	16
Apêndice IIII.....	18

1. INTRODUÇÃO

O esgotamento de combustíveis fósseis e a crescente preocupação ecológica em relação aos poluentes alavancaram o estudo para melhoria da eficiência dos dispositivos de combustão existentes. A combustão em queimadores porosos radiantes tem recebido uma atenção especial, dado a grande eficiência térmica e baixa emissão de poluentes destes equipamentos.

Queimadores porosos radiantes vem sendo utilizados em processos industriais, onde a demanda térmica requerida depende da troca de calor por radiação. Este tipo de queimador pode ser utilizado em aplicações como aquecimento de ambientes, preparação de alimentos, secagem de grãos, processamento de vidro, etc.

O princípio de queima de combustíveis no interior de meios porosos se baseia no pré-aquecimento da mistura de reagentes através da inserção do material poroso inerte com alta condutividade térmica na zona de reação, possibilitando a troca de calor entre a região de pós-chama e a mistura ainda não queimada. Pereira, 2002 ilustra na figura 1.1 um desenho esquemático da estrutura de chama no interior de um meio poroso, podendo visualizar o processo de “empréstimo de energia” proposto por Hardesty e Weinberg, 1974. A mistura de ar/combustível entra no meio poroso e recebe calor do sólido antes da frente de chama e, depois de ocorrência da reação de combustão, os gases de exaustão perdem calor para o meio sólido e para a mistura ainda não queimada por condução e radiação.

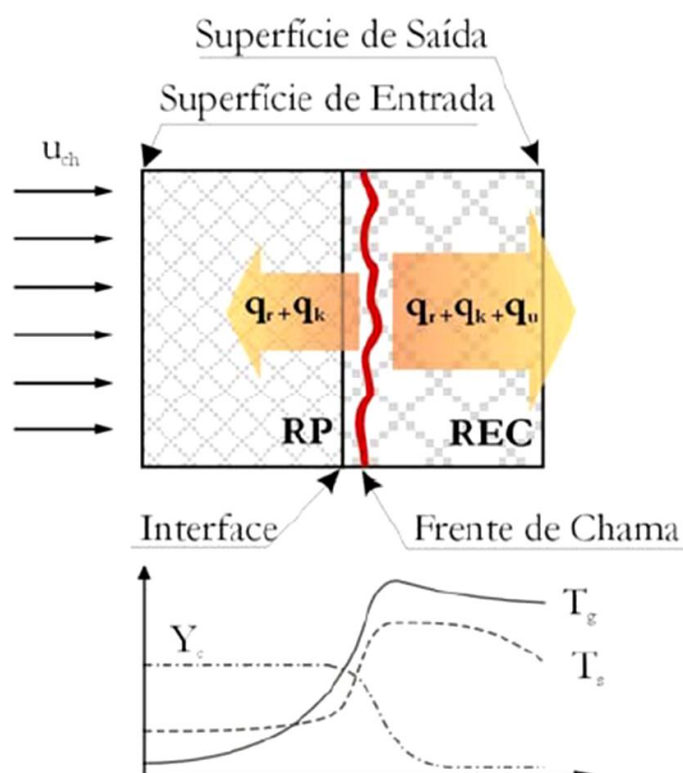


Figura 1.1 - Desenho esquemático da combustão em meios porosos, adaptado de Pereira, 2002. Onde " T_g " a temperatura dos gases, " T_s " a temperatura do meio sólido, " Y_c " a concentração de combustível na mistura, " u_{ch} " a velocidade de chama, " q_r " o fluxo de calor radiante, " q_k " fluxo de calor condutivo e " q_u " fluxo de calor convectivo pelos gases.

Este pré-aquecimento dos reagentes apresenta algumas características como aumento na taxa de reação química, na eficiência de combustão e na temperatura máxima na zona da reação, podendo fazer com que a chama alcance temperaturas acima da temperatura de chama adiabática, mencionada como combustão superadiabática ou combustão com excesso de entalpia por Hardesty e Weinberg, 1974. Ademais, possibilita queima de combustíveis com baixo poder calorífico ou misturas pobres em combustível. A presença de uma matriz sólida a alta temperatura resulta em um grande potencial de troca de calor direcional por radiação com o ambiente externo a partir do meio sólido.

O presente trabalho estuda experimentalmente a faixa de estabilidade de chama em um queimador poroso radiante dotado de uma placa para distribuição de reagentes na seção de entrada.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é determinar a faixa de operação para um queimador poroso cerâmico e avaliar a sua eficiência energética.

Os objetivos específicos são:

- i. Projetar, construir e instrumentar uma bancada de testes capaz de avaliar a faixa de estabilidade de queimadores porosos radiantes.
- ii. Determinar os limites de estabilização da chama dentro do queimador.
- iii. Analisar a eficiência de radiação do queimador.
- iv. Estimar as perdas de energia do queimador.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Conceitos fundamentais de combustão

A quantidade de combustível presente em uma mistura de gases é mensurada pela razão de equivalência (ϕ), calculada pelas seguintes equações:

$$\phi = \frac{f}{f_s} \quad (3.1)$$

$$f = \frac{m_c}{m_a} \quad (3.2)$$

assumindo como m_a e m_c os fluxos mássicos de ar e combustível respectivamente, f a razão combustível/ar e f_s a razão de combustível/ar avaliada em condições estequiométricas. Assim, para ϕ igual a 1 tem-se uma mistura estequiométrica, para ϕ menor que 1 uma mistura pobre e para ϕ maior que 1 uma mistura rica.

Neste trabalho a velocidade de chama é considerada igual à velocidade média do escoamento na seção compreendida pelo queimador, definida por.

$$u_{ch} = \frac{V_g}{A_t} \quad (3.3)$$

onde V_g a vazão volumétrica dos gases e A_t a área da seção transversal do queimador.

O limite inferior de inflamabilidade de um gás é definido como a mínima concentração de combustível na mistura para que a combustão em chama livre possa ocorrer. Para o metano esta relação é de 5 % do volume total, segundo Linde, 2012.

3.2. Estudo sobre queimadores porosos radiantes

As esponjas cerâmicas utilizadas se caracterizam pela densidade linear de poros e porosidade volumétrica. A densidade linear de poros é o número de poros por unidade de comprimento e a porosidade volumétrica ϵ é definida como:

$$u_{ch} = \frac{V_g}{A_t} \quad (3.4)$$

onde V_p é o volume total dos poros e V_t é o volume total do meio.

O estudo sobre queimadores porosos difere do queimador de chama livre convencional, de forma que o primeiro possui uma faixa de velocidades onde é possível obter uma chama estável no interior do meio poroso e o segundo possui somente uma única velocidade de chama para cada relação de equivalência. Por definição, a chama é considerada estável em um queimador poroso radiante quando a reação química permanece no interior do meio poroso. Estudos feitos por Hsu et al., 1992, indicaram que queimadores porosos radiantes possibilitam queima de mistura com razões de equivalência inferiores ao limite de inflamabilidade devido à recirculação de calor pela matriz porosa.

3.2.1. Estabilidade da chama

O Limite inferior e superior de estabilidade de chama são definidos através da velocidade de chama, assumindo valores limite os quais a frente de chama permanece estável e no interior do queimador. Estudos conduzidos por Hsu et al., 1992 relacionam as velocidades de chama máximas e mínimas para estabilidade de chama com a razão de equivalência para queimadores formados por 2 esponjas de zircotina com diâmetro de 51 mm e altura de 51 mm empilhadas. A cerâmica inferior, área de entrada da mistura, com porosidade de 65 ppi (poros por polegada) e a superior, área de saída dos gases, com valores de 10, 30 e 45 ppi para os casos 2, 3 e 4 respectivamente. A figura 3.1 abaixo ilustra o resultado obtido para os casos citados, o qual concluiu que para os casos 2 e 3 foi possível obter chama estável abaixo do limite inferior de inflamabilidade e que existe a possibilidade de controlar a energia liberada pelo queimador através do controle da velocidade de chama e razão de equivalência.

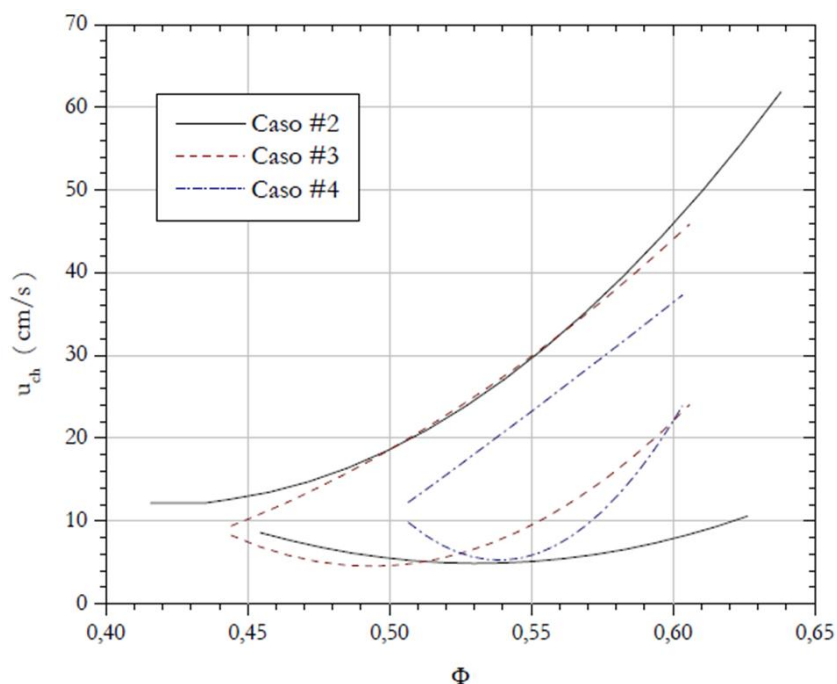


Figura 3.1 – Diagrama de estabilidade proposto por Hsu et al., 1992 para diferentes configurações de porosidade do queimador, no caso #2 (65ppi/10ppi), caso #3 (65ppi/30ppi) e caso #4 (65ppi/45ppi).

4. MATERIAIS E MÉTODO

4.1. Bancada de testes

Para o desenvolvimento do experimento com os meios cerâmicos porosos, foi projetada e construída uma bancada para a realização dos testes. Esta bancada permite controlar independentemente vazões de ar e combustível e medir temperatura em pontos críticos para o experimento. Abaixo a figura 4.1 mostra um desenho esquemático da bancada de testes.

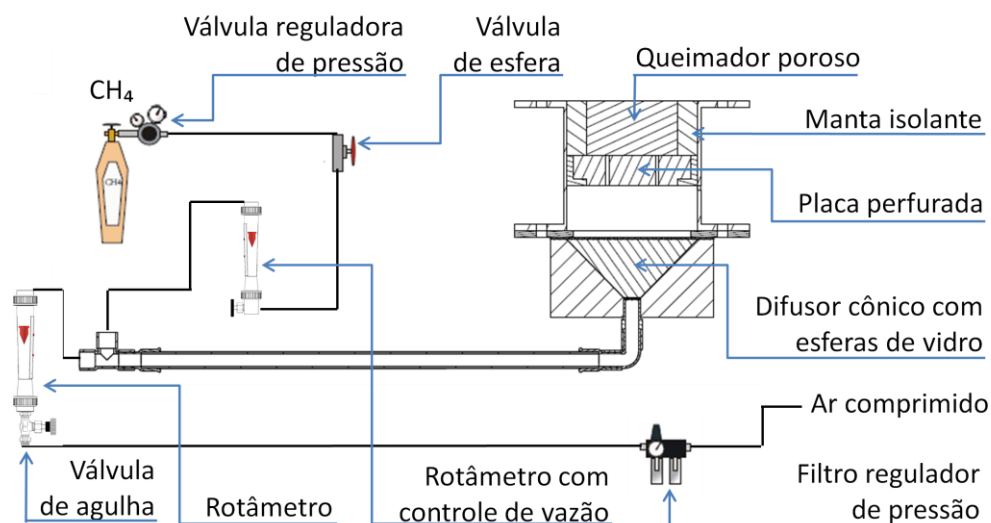


Figura 4.1 - Diagrama esquemático da bancada de testes.

4.1.1. Sistema de alimentação de mistura

O ar provém de uma linha de ar comprimido de 10 bar de pressão. Ligado a esta linha está um filtro regulador de pressão Festo LFR-D-MIDI, onde óleo e umidade são extraídos e a pressão é reduzida para 4 bar. O controle de vazão é realizado por uma válvula de agulha e medição é realizada por um rotâmetro Applitech AP 500 T com faixa de operação de 10 a 100 litros por minuto, lpm. A alimentação de combustível provém de um cilindro de metano fornecido pela Linde com concentração de 99,995% , ligado a esta linha está um regulador de pressão Linde HIQ, o qual reduz a pressão para 1 bar. O controle de vazão é realizado por um rotâmetro Applitech série 1900 com faixa de operação de 0.5 a 5 lpm.

A mistura de gás combustível ocorre a partir da inserção cruzada dos fluxos de ar e combustível, em um tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ polegada e 1 metro de comprimento. Dentro do tubo, o escoamento se dá em regime turbulento, número de Reynolds variando de 2500 a 22000, facilitando assim a homogeneização da mistura. Em seguida passa por um difusor em forma de cone com diâmetros 25 e 100 mm e altura 40 mm, preenchido por esferas de vidro com 2 mm de diâmetro médio, mantidas no interior do dispositivo por duas telas de contenção. Este difusor exerce a função de assegurar que no caso da ocorrência de retorno de chama, a frente de combustão encontrará o meio poroso frio formado pelas esferas, perderá calor e tenderá a extinguir-se.

Após a homogeneização da mistura, esta passa por uma placa perfurada com função de distribuir uniformemente o fluxo de mistura pela área do queimador e formar uma barreira ao retorno de radiação para o sistema misturador. Devido à dificuldade com manuseio da placa, por ser de material frágil, foi desenvolvida uma luva metálica para evitar que esta se danifique no processo de montagem. O desenhos detalhados dos componentes estão presentes no “apêndice 2”.

4.1.2. Montagem do elemento poroso

Os queimadores são montados no interior de uma carcaça de aço com diâmetro interno de 100 mm e flanges nas duas extremidades, com o intuito de facilitar montagem e desmontagem do equipamento. O espaço entre o queimador e a carcaça é preenchido com uma camada de isolamento a base de alumina (carborundum - Al_2O_3) resistente até 1200 °C.

O queimador testado foi construído a partir de filtros cerâmicos comerciais empregados em processos de fundição de aço, com estrutura semelhante a de esponjas e dimensionais de 70 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. A montagem foi realizada a partir do empilhamento de duas camadas desta esponja cerâmica, visualizada na figura 4.3 abaixo.



Figura 4.2 - Filtro comercial com densidade linear de 10 poros por polegada, ppi.

Os filtros comerciais utilizados são compostos de uma mistura de 65 % de zircotina (ZrO_2) e 35 % de alumina (Al_2O_3) com densidade linear de 10 ppi (3,9 poros por centímetro, ppcm) e 90% de porosidade volumétrica. Estes fabricados pela CETEBRA S.A. (cerâmica brasileira – SP).

4.1.3. Medição de temperatura

A medição de temperatura é realizada em pontos críticos para o estudo da estabilidade de chama em meios porosos e pontos relacionados à segurança durante realização do teste. Esta medição é realizada por 2 termopares tipo K situado na extremidade superior e inferior do meio poroso. Adicionado a 3 termopares tipo J situados na parte superior da camada de esferas e nas regiões superior e inferior da carcaça, como visualizado na figura 4.3 abaixo.

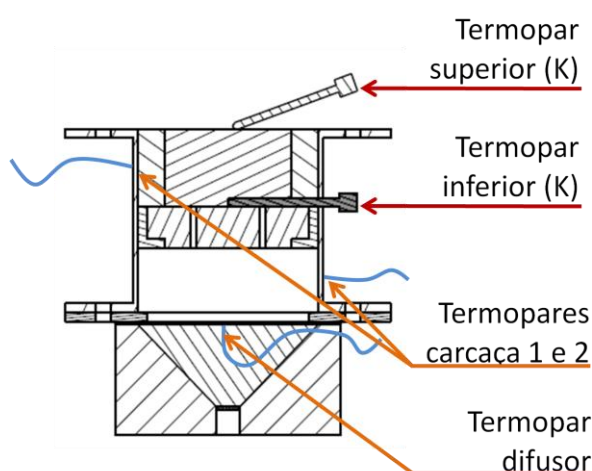


Figura 4.3 - Diagrama com posicionamento dos termopares.

Com o intuito de preservar a integridade dos equipamentos de medição, foi estabelecido um limite para temperatura de operação nos termopares. Este é obtido a partir de um coeficiente de segurança de 10 % em relação ao valor máximo indicado para medição do termopar em questão, para os termopares tipo K e J as temperaturas máximas para operação são 1125 °C e 225 °C respectivamente.

Cada termopar exerce uma ou mais funções perante o experimento, descritas na tabela 4.1 abaixo. As temperaturas são monitoradas com um intervalo de 3 segundos por um aquisitor de dados Agilent 34970A.

Tabela 4.1 – Descrição dos termopares.

Termopar	Função
Inferior (K)	Critério para determinar a estabilidade da chama no interior do queimador e indicar quando a frente de chama alcançar a extremidade inferior do queimador. O critério para indicar retorno de chama foi estabelecido como 1100 °C.
Superior (K)	Critério para determinar a estabilidade da chama no interior do queimador e parâmetro para avaliação de dissipação de calor por radiação pela superfície do queimador.
Carcaça 1 e 2 (J)	Critério para definição de equilíbrio térmico do dispositivo e parâmetro para avaliação da dissipação térmica por convecção e radiação pela carcaça.
Difusor (J)	Identificar a ocorrência de um possível retorno de chama.

5. METODOLOGIA

A metodologia para análise de estabilidade se inicia pela ignição do queimador, que é realizada regulando as vazões em uma condição a qual a chama se propaga com facilidade para dentro do meio poroso, valor obtido através de testes preliminares realizados para verificar a funcionalidade da bancada. Este ponto corresponde às vazões de 3 lpm de metano e 10 lpm de ar. A ignição é feita através de um dispositivo de centelha, ilustrado no apêndice 3. A chama se inicia como chama livre de cor azul, propagando para o interior do meio poroso a medida que este se aquece gradativamente.

Após a estabilização da chama no interior do meio poroso, deve-se aguardar por certo período de tempo para que o sistema alcance o equilíbrio térmico. O monitoramento do equilíbrio térmico é feito a partir das temperaturas medidas nos termopares, de forma que é considerado equilíbrio térmico quando a oscilação de todos os termopares monitorados é inferior a 2 °C, em um intervalo de 10 minutos.

Em seguida, é ajustada uma razão inicial de equivalência para a velocidade de chama obtida no processo de aquecimento, utilizando primeiramente a razão máxima de equivalência a ser testada, com o valor de 0,7. Posteriormente ajusta-se a vazões para um valor de teste para a determinada razão de equivalência, alterando primeiramente a vazão do combustível. O critério para definição do limite superior é obtido a partir de uma análise visual de “descolamento” de chama, este definido quando parte da frente de chama se torna chama livre e visível na cor azul. O critério para a definição do limite inferior é obtido a partir dos valores medidos no termopar localizado na parte inferior do meio poroso, quando a temperatura medida neste ponto alcançar 1100 °C é considerado que a frente de chama encontra-se no local em questão.

O processo é repetido reduzindo a razão de até o ponto onde não é possível estabilizar a chama no interior do meio poroso independente das vazões. O limite de inflamabilidade do queimador testado é obtido a partir da menor razão de equivalência a qual a chama permanece estável no interior do queimador.

Para evitar a degradação térmica do elemento poroso, foi estabelecida uma potência máxima de operação para o queimador. A figura 5.1 mostra o efeito produzido pela degradação térmica obtido em um teste preliminar. O teste preliminar foi realizado utilizando GLP como combustível, com potências impostas da ordem de 1800 kW/m². A partir deste resultado, foi determinada a potência máxima para operação do queimador como 50 % do valor de degradação térmica obtida no teste preliminar, correspondente a uma vazão máxima de metano igual a 6 lpm.



Figura 5.1 - Queimador poroso degradado termicamente.

6. RESULTADOS

A figura 6.1 abaixo mostra os resultados obtidos na bancada experimental para limites de estabilidade de chama na queima de uma pré-mistura de ar e metano. Os pontos assinalados em azul correspondem a vazões acima do limite superior de estabilidade e pontos assinalados em vermelho correspondem a vazões as quais a chama permaneceu estável no interior do meio poroso, segundo o critério descrito na metodologia.

O estudo da faixa de estabilidade para o queimador foi limitado pelos instrumentos de medição. O medidor de vazão de ar impossibilitou os estudos para razões de equivalência inferiores a 0,7, visto que a faixa de medição deste é de 10 a 100 lpm e para obter chama estável seria necessário imprimir vazões inferiores a 10 lpm, para razões de equivalência menos que 0,7. Os termopares limitaram o estudo para relações de equivalência maiores que 0,7 e limitaram a faixa de operação a velocidades de chama ente 6 e 8 m/s para a relação de equivalência de 0,7, visto que para valores fora desta faixa, a temperatura medida no termopar tipo K localizado na parte inferior do meio poroso ultrapassa o limite de operação estabelecido para o termopar, igual a 1125 °C.

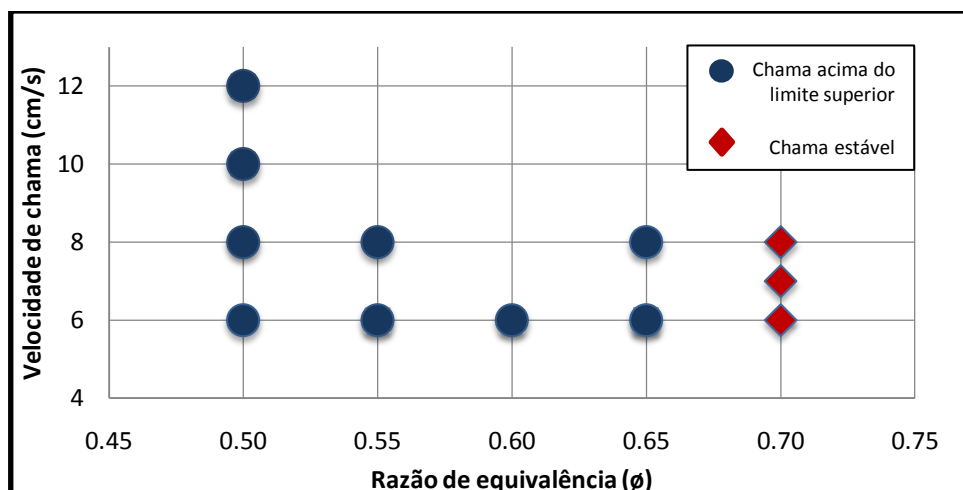


Figura 6.1 – Pontos de avaliação da estabilidade de chama.

As incertezas de medição relacionadas à relação de velocidade de chama e razão de equivalência são avaliadas no apêndice 1. Foi estimado um erro para medição de velocidade de chama de 7,8 a 14,8 % e para relação de equivalência de 12,5 a 25,0 %, dependendo do ponto de operação. As incertezas foram calculadas com base nas informações fornecidas pelo fabricante dos medidores de vazão e uma estimativa do erro de medição do diâmetro do queimador. Devido à grande incerteza de medição, o erro em relação a medição da razão de equivalência pode ultrapassar os valores absolutos medidos, fator o qual não garante a separação entre as medições.

Os testes realizados com o queimador apresentaram grande inércia térmica, isto pôde ser observado pelo efeito produzido nos testes que ultrapassaram o limite superior de estabilidade. Nestes testes se iniciou o processo com chama estável com relação de equivalência de 0,7, posteriormente ajustando a velocidade de chama para os valores de teste, foi observado que a frente de chama demora cerca de 5 minutos para alcançar o limite superior do meio poroso, o que indica que o meio foi se resfriando gradativamente e a frente chama foi se movimentando em direção a superfície superior do meio devido ao pré-aquecimento insuficiente da mistura. Efeito também medido pela queda da temperatura medida no termopar localizado na superfície inferior do meio poroso.

Utilizando os valores para chama estável apresentados na figura 6.1 relacionados com as temperaturas medidas na superfície superior do queimador, é possível obter uma estimativa da eficiência da troca de calor por radiação do queimador poroso. Para este cálculo foram assumidas algumas hipóteses, os poros do queimador são tratados como corpos negros e a emissividade total é calculada com uma média ponderada entre a e emissividade da matriz sólida e a dos poros, como visto na equação 6.1 abaixo.

$$\varepsilon_t = \epsilon \cdot \varepsilon_{cn} + (1 - \epsilon) \cdot \varepsilon_{ms} \quad (6.1)$$

onde ε_t a emissividade total do queimador, ε_{cn} a emissividade do corpo negro ($\varepsilon_{cn} = 1$), ϵ a porosidade volumétrica da cerâmica porosa e ε_{ms} a emissividade da matriz sólida da cerâmica porosa. A emissividade da matriz sólida é calculada a partir de uma média ponderada entre a emissividade da alumina e da zircotina, relacionando as suas proporções e emissividades. Proporções de 35% e 65% e emissividades 0,28 e 0,31 para alumina e zircotina respectivamente. O valor obtido para emissividade total do queimador foi 0,93.

A potência entregue ao meio por radiação é calculada através do conceito de troca de calor entre uma pequena superfície e uma superfície isotérmica muito maior, definida

por Incropera et al., 2005 na equação 6.2 abaixo, assumindo como a temperatura da superfície a temperatura medida no termopar localizado na superfície superior do elemento poroso e a área como a área do queimador.

$$Q_{rad} = \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot A_q \cdot (T_q^4 - T_\infty^4) \quad (6.2)$$

onde A_q é a área do queimador, T_q é a temperatura do queimador, T_∞ é a temperatura da vizinhança e σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

A figura 6.2 abaixo ilustra o efeito da velocidade de chama sobre a eficiência de radiação do queimador, para as velocidades de chama estáveis medidas com relação de equivalência igual a 0,7. A eficiência de radiação é definida pela equação 6.3 abaixo, relacionando a potência entregue por radiação com a potência total fornecida pela reação de combustão do metano.

$$\eta_r = \frac{Q_{rad}}{\dot{S}_r} = \frac{Q_{rad}}{\dot{m}_c \cdot PCI} \quad (6.3)$$

onde η_r a eficiência de radiação, Q_{rad} a potência entregue por radiação pela superfície do queimador e \dot{S}_r a potência total fornecida pelo combustível. A potência total fornecida pelo combustível é definida como a vazão mássica do combustível \dot{m}_c multiplicada pelo poder calorífico inferior, PCI , do mesmo. Em questão o metano com PCI igual a $49,9 \times 10^6$ kJ/kg.

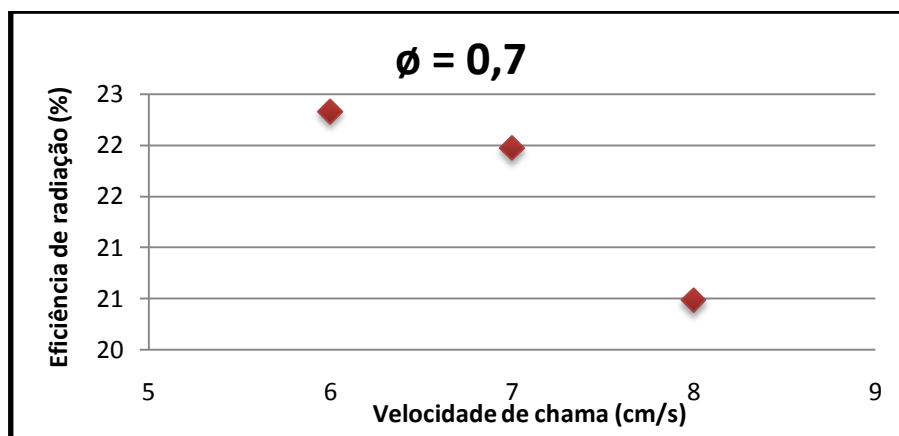


Figura 6.2 – Eficiência de radiação relacionada com velocidade de chama.

A partir das medições de temperatura realizadas na carcaça do dispositivo de teste é possível estimar a troca de calor deste com o meio, determinando algumas hipóteses e aproximações. Para o cálculo das perdas de calor pela carcaça, foi assumida como temperatura média para determinada seção, a temperatura medida nos termopares. A carcaça foi dividida em duas seções, como se pode visualizar na figura 6.3 abaixo, a seção em azul corresponde à parte superior da carcaça e a seção em amarelo à parte inferior. Os termopares foram colados aproximadamente na metade da altura de cada seção.

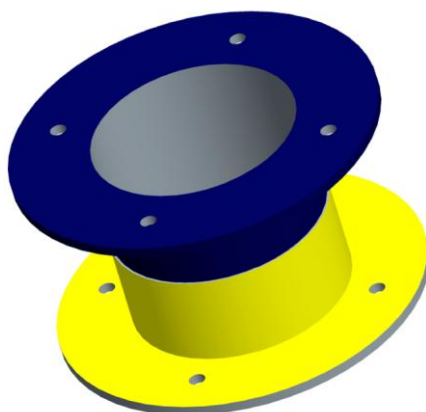


Figura 6.3 – Carcaça do dispositivo dividida em duas seções.

Foram consideradas trocas de calor por convecção e radiação das superfícies externas com o meio, com temperatura ambiente 24 °C. As trocas de calor pelas faces internas da carcaça com a mistura não são consideradas como perdas, pois influenciam no pré-aquecimento da mistura. Os valores para as perdas de calor pela carcaça foram calculados para as situações de estabilidade de chama citadas acima.

As trocas de calor por radiação e convecção foram calculadas conforme a metodologia proposta por Incropera et al., 2005. Os coeficientes convectivos médios foram calculados a partir de correlações de convecção livre para escoamento externo com valores de 5,8 e 5,2 W/m.K para as seções superior e inferior respectivamente. As perdas de calor por radiação foram calculadas a partir da equação 6.2 acima, considerando a área como a área externa total da seção e a temperatura como a medida na seção. As perdas de calor, somando convecção e radiação, ficaram entre 38 e 46 W, a depender do ponto em operação.

A partir do cálculo das perdas de calor pelo dispositivo, é possível realizar um balanço energético e estimar quantidade de calor contido nos gases de exaustão para as velocidades de chama estabelecidas. A figura 6.4 abaixo ilustra a frações da energia de combustão entregues no processo queima.

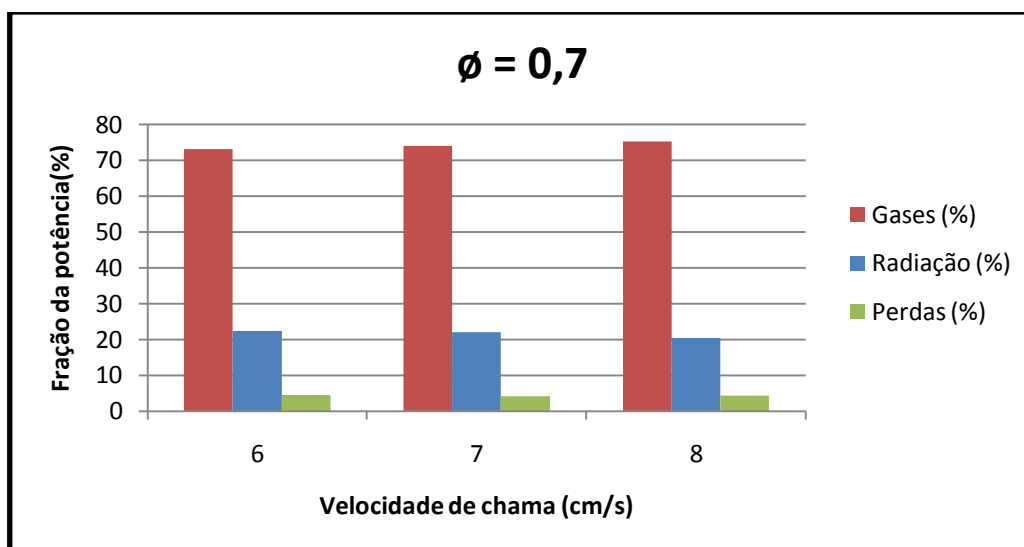


Figura 6.4 – Balanço energético.

7. CONCLUSÕES

A bancada de testes projetada e construída para estudo da combustão pré-mistura de um combustível e ar em um meio poroso inerte se mostrou versátil e estável. Com limitações pertinentes aos sistemas de medição, os quais podem ser substituídos por outros que atendam melhor os pré-requisitos para realização dos testes.

Os estudos indicam que para aumentar a faixa de estabilidade do queimador devemos aumentar a zona de pré-aquecimento da mistura, utilizando mais camadas da cerâmica porosa. O qual possibilita uma maior troca de calor entre os gases de exaustão e a mistura ainda não queimada, devido à maior área de contato entre matriz sólida e os gases.

Como visto no balanço global de energia, mais de 70% da energia proveniente da combustão é retirada do sistema em forma de calor nos gases de exaustão. Com eficiência de radiação em torno de 20 %, apresenta grande potencial a aplicações que requerem trocas de calor em forma de radiação.

Com as conclusões obtidas no presente trabalho, abrem novas possibilidades de pesquisa na área de combustão:

- 1) Realizar estudo de estabilidade para um queimador com mais camadas de material cerâmico, visando a combustão de misturas pobres.
- 2) Pesquisar novos materiais capazes de suportar temperaturas mais elevadas, podendo assim aplicar maiores potências ao queimador.
- 3) Estudar configurações com diferentes disposições de porosidades, a fim de obter uma maior faixa de estabilidade para o queimador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Glassman, I.; **“Combustion”**, San Diego: Academic Press Inc, 2nd edition, 1987.

Hardesty, D. R., Weinberg, F. J.; **“Burners producing large excess enthalpies”**. Combust. Sci. and Tech, v.8, 1974.

Hsu, P., Evans, W. D., Howel, J. R.; **“Experimental and numerical study of premixed combustion within nonhomogeneous porous ceramics”**, Comb. Sci. and Tech., v. 90, p.149-172, 1992.

Incropera F. P., Dewitt D. P., Bergman T. L., Lvine A. S.; **“Fundamentos de transferência de calor e massa”**, Editora LTC., sexta edição, 2005.

Linde ; **“Catálogo de informações técnicas”**, 2012.

Pereira, F. M.; **“Medição de características térmicas e estudo do mecanismo de estabilização de chama em queimadores porosos radiantes”**, Dissertação. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

APÊNDICE 1

As incertezas de medição para velocidade de chama u_{ch} e relação de equivalência ϕ foram calculadas a partir das expressões abaixo, propostas por Pereira, 2002.

$$IM_{\phi} = \sqrt{\left(\frac{\rho_{CH_4} IM_{CH_4}}{\rho_{ar} f_s \dot{V}_{ar}}\right)^2 + \left(\frac{-\rho_{CH_4} \dot{V}_{CH_4} IM_{CH_4}}{\rho_{ar} f_s \dot{V}_{ar}}\right)^2} \quad (a.1)$$

$$IM_{u_{ch}} = \sqrt{\left(\frac{4IM_{CH_4}}{\pi D_q^2}\right)^2 + \left(\frac{4IM_{ar}}{\pi D_q^2}\right)^2 + \left(\frac{-8(\dot{V}_{CH_4} + \dot{V}_{ar}) IM_{D_q}}{\pi D_q^3}\right)^2} \quad (a.2)$$

Os erros percentuais de ϕ e u_{ch} são definidos por

$$E_{\phi} = 100 \left(\frac{IM_{\phi}}{\Phi} \right) \quad (a.2)$$

$$E_{u_{ch}} = 100 \left(\frac{IM_{u_{ch}}}{u_{ch}} \right) \quad (a.2)$$

Os valores de incertezas utilizados acima provém das informações fornecidas pelo fabricante sobre a incerteza dos medidores de vazão, $\pm 0,25$ lpm para o medidor de combustível (5% do fundo de escala) e ± 2 lpm para o medidor de ar (2% do fundo de escala). Adicionado a uma incerteza na medição do diâmetro dos queimadores de ± 1 mm. A tabela A.1 abaixo indica o erro de medição para os pontos avaliados no presente trabalho.

Tabela A.1 – Erros de medição para razão de equivalência e velocidade de chama.

ϕ	u_{ch} (m/s)	E_{ϕ} (%)	$E_{u_{ch}}$ (%)
0.50	6	25.0	14.8
0.50	8	18.7	11.3
0.50	10	15.0	9.2
0.50	12	12.5	7.8
0.55	6	22.9	14.8
0.55	8	17.1	11.3
0.60	6	21.2	14.8
0.65	6	19.5	14.8
0.65	8	14.7	11.3
0.70	6	18.2	14.8
0.70	7	15.6	12.8
0.70	8	13.6	11.3

APÊNDICE 2

Nesta secção consta os desenhos de fabricação e montagem dos componentes utilizados na construção da bancada de testes.

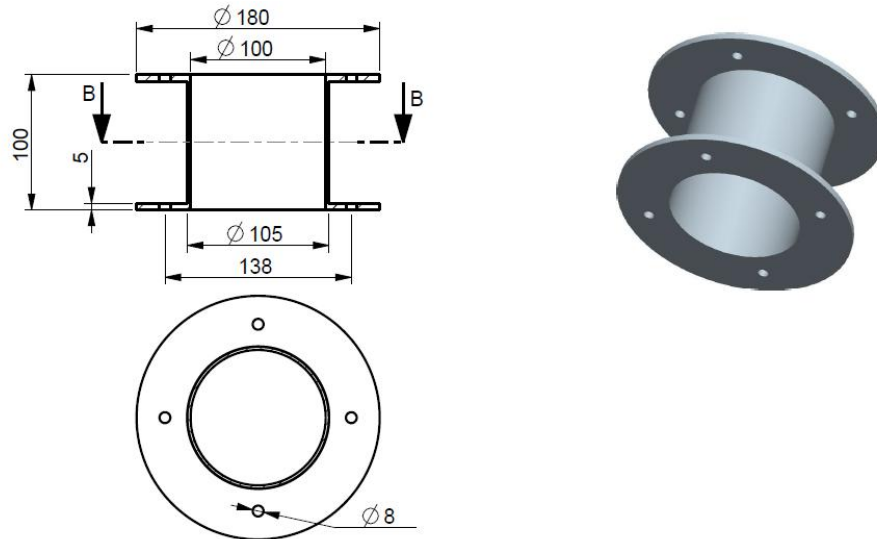


Figura A.1 – Carcaça fabricada em aço.

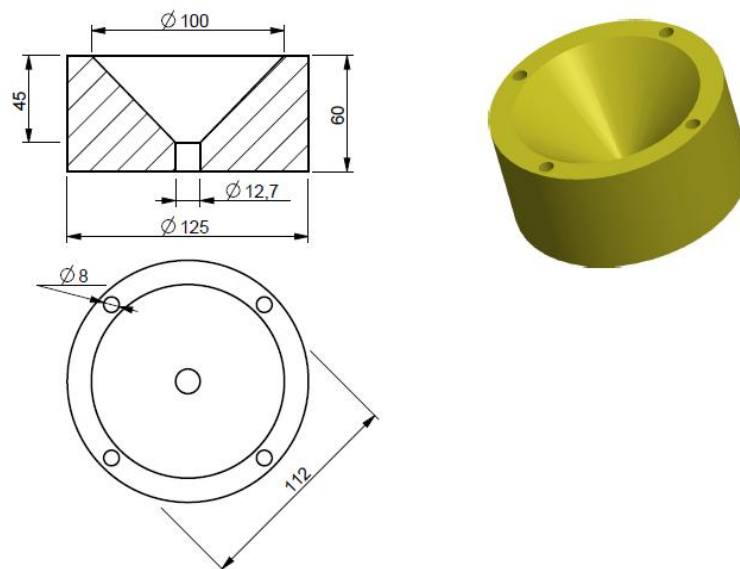


Figura A.2 – Flange fabricado em nylon.

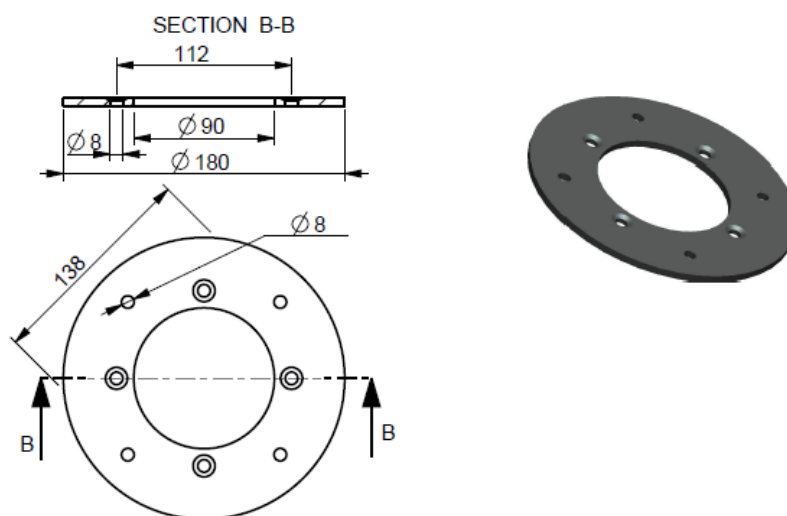


Figura A.3 – Flange fabricado em aço.

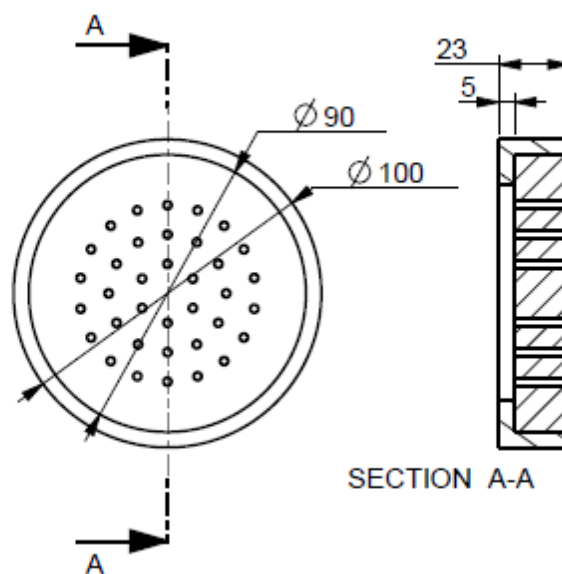


Figura A.4 – Placa perfurada em material cerâmico, montada no interior de uma luva de alumínio.

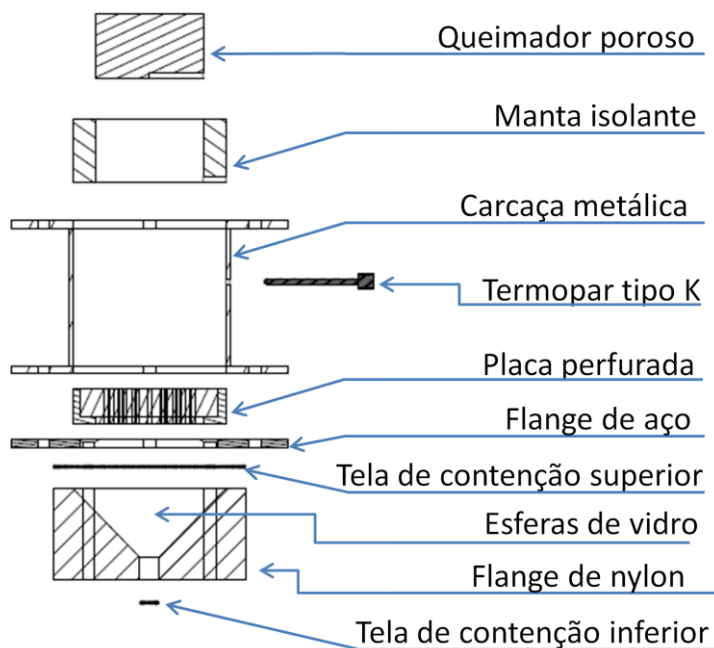


Figura A.5 – Vista explodida da montagem do queimador.

APÊNDICE 3

Nesta seção constam fotos da bancada, no processo de construção e em funcionamento.



Figura A.6 – Difusor cônico preenchido por esferas de vidro, com termopar instalado no centro da tela de contenção para as esferas.



Figura A.7 – Bancada e teste em operação, com meio cerâmico incandescente.



Figura A.8 – Dispositivo de centelha.

APÊNDICE 4

Nesta secção consta o detalhamento do procedimento para a realização dos testes, visando a segurança dos operadores.

A realização dos testes deve ser conduzida por dois operadores utilizando os equipamentos de proteção individuais, estes sendo óculos de proteção, avental industrial e luvas. Com o intuito de garantir a segurança dos operadores durante a realização do experimento, foi proposto um procedimento detalhado para a condução do experimento.

Para a realização adequada do procedimento de teste, as atividades devem ser divididas entre os operadores. O “operador A” monitora e age sobre o funcionamento das válvulas de segurança, de controle de vazão de ar e de controle da vazão de combustível. O “operador B” monitora as temperaturas e age sobre a ignição do equipamento.

Procedimento de teste: Divida em procedimento de ignição e apagamento

Tabela A.2 – Procedimento de teste em passos.

Passo	Operação	Operador
1	Realizar verificação do funcionamento correto de todas as válvulas.	A
2	Abrir a válvula de ar em vazão conhecida de estabilidade da chama.	A
3	Abrir válvula de combustível em vazão conhecida de estabilidade da chama.	A
4	Aproximar fonte de ignição ao meio poroso.	B
5	Após ignição monitorar constantemente temperaturas.	B
6	Ao efetuar alteração nos parâmetros de vazões, sempre alterar primeiramente a vazão de ar.	A
7	Para encerrar o teste, fechar primeiramente a válvula de combustível do cilindro de gás.	B
8	Manter o escoamento de ar até o resfriamento do meio poroso.	A
9	Fechar todas as válvulas.	A