

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DA FRAÇÃO RADIANTE  
EM QUEIMADORES POROSOS

por

Renan da Rosa Viana

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, novembro de 2014



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DA FRAÇÃO RADIANTE  
EM QUEIMADORES POROSOS

por

Renan da Rosa Viana

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.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Volnei Borges

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 14 de Novembro de 2014.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano pelas fundamentais discussões técnicas e apoio no projeto e execução do experimento.

Agradeço ao Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira, pelas contribuições técnicas a este experimento.

Agradeço a todos os membros do Laboratório de Combustão - LC, da UFRGS, por todo auxílio durante o experimento, em especial aos bolsistas de iniciação científica Fernando Amorim e Felipe Peng.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Antônio e Elizabete, por toda dedicação, apoio e incentivo incondicional que me proporcionaram durante toda a vida.

À minha namorada, Camila, por todo carinho, afeto e inspiração que me confortaram durante momentos difíceis.

Aos meus colegas Dárlon Soliman, Érgon Fleck, Filipe Geiger, Fladimir Barbosa e Simeão da Luz pela crucial relevância exercida em toda a jornada acadêmica e pelos laços de amizade que levarei pela vida inteira.

VIANA, R. R. **ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DA FRAÇÃO RADIANTE EM QUEIMADORES POROSOS**. 2014. 22. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## **RESUMO**

Queimadores de meios porosos têm sido o foco de diversos estudos, devido às suas vantagens em diferentes aplicações na indústria, por possuir uma emissão de radiação térmica direcional e pouca emissão de poluentes, causando benefícios em relação a produtividade e ao meio ambiente. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar o comportamento da radiação em queimadores de diferentes porosidades e materiais, variando a riqueza da mistura ar/combustível. Para isto foi construída uma bancada experimental composta por um sistema de alimentação ar/combustível, aquisição de dados, queimador, suporte para o sensor de radiação e o próprio radiômetro. Essa estrutura permite o deslocamento do dispositivo de 0° a 90°, possibilitando a análise da radiação a partir da área de um hemisfério. Constatou-se que o material composto por carbetto de silício possui maior eficiência de radiação que a zircônia, o que era esperado dado a sua maior condutividade térmica e emissividade. Contudo, o carbetto de silício degradou em uma das medições. A matriz de  $ZrO_2$  mostrou-se difícil de estabilizar a razões de equivalência inferiores a 0,6. Em relação a porosidade conclui-se que quanto maior a porosidade maior a eficiência de radiação, resultado previsto devido a maior área de contato para que ocorra a reação no interior dos poros.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fração radiante, queimador poroso, porosidade, relação de equivalência.

VIANA, R. R. **EXPERIMENTAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF RADIANT FRACTION IN POROUS BURNERS**. 2014. 22. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## **ABSTRACT**

Porous burners media has been the focus of many studies due to its advantage in different applications in industry, having a directional emission of thermal radiation and low emission of pollutants, resulting in benefits regarding productivity and environment. Thus, the aim of this paper is to analyze the behavior of radiation tax on materials of different linear densities and materials, varying the rate of air/fuel mixture. For this it was constructed a experimental set that consists of a supply system of air/fuel, data acquisition, burner support for the radiation sensor and the radiometer itself. This structure enables the displacement from 0° to 90° allowing the analysis of radiation in the area of a hemisphere. It was found that the silicon carbide has higher radiation efficiency than zirconia, which was expected, given its greater thermal conductivity and emissivity. However, the silicon carbide degraded in one of the measurements. The ZrO<sub>2</sub> matrix has proved difficult to stabilize for equivalence ratios below 0.6. Regarding the porosity it is concluded that the greater the porosity the greater the radiation efficiency, the expected result, because there is a larger contact area for the reaction to occur within the pores.

**KEYWORDS:** Radiant fraction, porous burner, porosity, equivalence relation.

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	1
2.1. Conceitos básicos da combustão.....	1
2.2. Porosidade de materiais porosos.....	2
2.3. Estabilidade da chama.....	2
2.4. Radiação térmica.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
4.1. Bancada experimental.....	4
4.1.1. Suporte para o posicionamento do queimador.....	5
4.1.2. Radiômetro.....	5
4.1.3. Controlador de fluxo ar/combustível.....	5
4.1.4. Placa isolante térmica distribuidora.....	5
4.1.5. Queimador de meio poroso.....	6
4.2. Procedimento experimental.....	8
4.3. Análise das incertezas de medição.....	8
4.3.1. Incertezas na determinação da relação de equivalência.....	9
4.3.2. Incertezas na análise da fração radiante.....	9
5. RESULTADOS.....	9
5.1. Carbetos de silício com 10 ppi.....	9
5.2. Carbetos de silício com 20 ppi.....	10
5.3. Zircônia com 20 ppi.....	11
5.4. Análise de resultados.....	11
6. CONCLUSÕES.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
APÊNDICE I.....	16
APÊNDICE II.....	16
ANEXO I.....	16

## 1. INTRODUÇÃO

O crescente consumo de energia é uma realidade mundial que se manterá pelas próximas décadas. Segundo dados da Agência Internacional de Energia, a demanda mundial crescerá 56 % até 2040. Já as emissões de carbono associadas à geração e consumo de energia em todo o mundo deverão aumentar em 46 % nos próximos 30 anos. Neste cenário, é cada vez maior a necessidade de utilização de processos que melhorem a eficiência e reduzam a emissão de poluentes atmosféricos.

Os queimadores porosos, devido a sua versatilidade no controle de potência radiante e alta eficiência de queima, fornecem uma economia de combustível considerável, conforme Pereira, 2002. Além disso, segundo Howell, 1996, a inserção de uma estrutura porosa faz com que a mistura ar/combustível produza uma menor emissão de poluentes. Deste modo, este tipo de equipamento vem sendo aplicado em diferentes segmentos industriais como o de papel, alimentício e cerâmico.

Dentre os parâmetros que afetam o funcionamento dos queimadores porosos, destacam-se o meio poroso, a porosidade e a relação de equivalência. Desta forma, entender a influência de cada um deles para a emissão de energia radiante é de fundamental importância para a otimização deste equipamento.

### 1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo a investigação do comportamento da radiação térmica pela combustão pré-misturada de combustível (GNV) e ar, em meios porosos, em relação a variação do material poroso e a porosidade do meio.

Para atingir o objetivo geral são estabelecidos os seguintes objetivos específicos do estudo:

1. Construir uma bancada experimental para avaliar o comportamento da radiação em queimadores porosos;
2. Avaliar a influência do material poroso na radiação emitida pelo queimador em diversas riquezas de mistura ar/combustível;
3. Avaliar a influência da porosidade do meio na fração radiante sob as mesmas condições;
4. Comparar os resultados obtidos no estudo com resultados encontrados na literatura.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta etapa serão descritos os principais conceitos sobre a combustão em queimadores de meios porosos.

### 2.1. Conceitos básicos da combustão

A quantidade de combustível presente em uma mistura pode ser medida pela riqueza da mistura ( $\phi$ ), calculada pelas seguintes equações:

$$\phi = \frac{f}{f_s} \quad (2.1)$$

$$f = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_{ar}} \quad (2.2)$$



sendo  $\dot{m}_{ar}$  e  $\dot{m}_{comb}$  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  $\phi$  igual a 1 tem-se uma mistura estequiométrica. Para  $\phi$  menor que 1, uma mistura pobre e para  $\phi$  maior que 1, uma mistura rica.

Em queimadores porosos a velocidade de chama é considerada igual à velocidade média do escoamento na seção compreendida pelo queimador, definida por:

$$u_{ch} = \frac{\dot{V}_g}{A_q} \quad (2.3)$$

onde  $\dot{V}_g$  é o fluxo volumétrico dos gases e  $A_q$  a área da seção transversal do queimador. No entanto, segundo Pereira, 2002, no interior do material poroso a área de passagem dos gases e a velocidade de chama real é igual a  $u_{ch}$  dividida pela porosidade do meio.

## 2.2. Porosidade de materiais porosos

Queimadores porosos radiantes são fabricados a partir de estruturas porosas metálicas ou cerâmicas, onde a combustão ocorre. As principais características das estruturas cerâmicas utilizadas são a porosidade e a densidade linear de poros.

A porosidade aparente ( $PA$ ), segundo Richerson, 1992, define quanto é o espaço vazio em relação a um determinado volume cerâmico, calculada por:

$$PA = \frac{P_U - P_A}{P_U - P_I} 100 \quad (2.4)$$

onde,  $P_I$  é o peso da amostra imersa em água,  $P_U$  é o peso da amostra úmida e  $P_A$  é o peso da amostra seca.

A densidade ( $\rho$ ) define o número de poros que existem em uma unidade de medida ao longo de uma linha reta. Pode ser obtida através do método de Arquimedes, seguindo os seguintes passos:

1. A amostra é pesada;
2. A amostra é colocada em um porta-amostra e mergulhada em água. O peso dela suspensa por um barbante de massa desprezível, é mergulhado e medido;
3. A densidade é calculada pela expressão:

$$\rho = \frac{\rho_{ag} P_A}{P_A - P_I} \quad (2.5)$$

onde,  $\rho_{ag}$  é a densidade da água,  $P_A$  é o peso da amostra seca e  $P_I$  é o peso da amostra imersa na água. A unidade mais utilizada é o ppi (poros por polegada), sendo também utilizado o ppcm (poros por centímetro).

## 2.3. Estabilidade da chama

A estabilidade da chama em queimadores porosos difere em relação a uma chama livre convencional. O primeiro possui uma faixa de velocidades onde é possível obter a estabilidade da chama no interior do meio poroso. Já uma chama livre apresenta somente uma única

velocidade de chama para cada riqueza de mistura. A chama é considerada estabilizada em um queimador poroso quando a reação química permanece no interior do meio sólido.

#### 2.4. Radiação térmica

A eficiência de radiação pode ser calculada pela razão entre a energia emitida pelo queimador por radiação ( $Q_r$ ) [W], e a energia total ( $S_r$ ) gerada pela reação de combustão [W]. Segundo Incropera et al., 2005, a energia radiante emitida para o ambiente  $Q_r$  pode ser obtido pela integração do fluxo radiante  $q_r$  [W/m<sup>2</sup>], ao longo de um invólucro hemisférico de raio  $R$  [m], onde  $\theta$  é a posição do sensor e varia de 0° a 90°, de acordo com a seguinte equação:

$$Q_r = \int q_r dA = \int_{\theta_2}^{\theta_1} q_r 2\pi R^2 \sin(\theta) d\theta \quad (2.6)$$

O fluxo total de energia  $S_r$  é dado por:

$$S_r = \dot{m}_c H \quad (2.7)$$

onde  $\dot{m}_c$  é a vazão mássica de combustível [kg/s] e  $H$  é o poder calorífico do combustível [J/kg].

A fração de calor radiante [adimensional], que é a fração de energia do queimador irradiada para o ambiente. Segundo Turns, 2000, é definida como:

$$\eta_{rad} = \frac{Q_r}{S_r} \quad (2.8)$$

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Khanna et al., 1994, investigaram experimentalmente a eficiência de radiação na combustão de metano e ar para riqueza de mistura ( $\Phi$ ) de 0,6 a 0,87. O queimador utilizado foi de zirconita (com região de pré aquecimento (RP) de 65 ppi, porosidade de 87 % e 3,5 cm de comprimento - região de estabilização da chama (REC) de 10 ppi, porosidade de 84 % e 2,55 cm de comprimento), com 51 mm de diâmetro e 60,5 mm de comprimento. A medição do calor transferido por radiação foi feita através de uma câmera de radiação infravermelha. Os resultados obtidos mostram que a eficiência de radiação diminui com o aumento da velocidade de chama e da relação de equivalência. Os valores obtidos para a eficiência de radiação chegam a 24 % para  $\Phi$  igual a 0,6 e caem para 17 % em  $\Phi$  igual a 0,8. Para a riqueza de mistura de 0,87 a eficiência de radiação volta a crescer chegando a 19 %.

Mital et al., 1997, analisaram a eficiência de radiação em queimadores porosos de cordierita (silicato de alumínio e magnésio, podendo conter ferro), com uma composição de (13,78 % MgO, 34,86 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 51,36 % SiO<sub>2</sub>). O efeito da variação na espessura e no tamanho dos poros da região de estabilização de chama foi avaliado para a riqueza de mistura de 0,9 em potências entre 150 e 650 kW/m<sup>2</sup>. Para uma REC de 4 ppcm, a variação na espessura de 3,2 para 6,5 mm não causou grandes alterações na eficiência de radiação - a eficiência máxima ficou por volta de 30 % para as duas condições. No entanto, mantendo a espessura da REC constante em 3,2 mm e variando a densidade linear de poros de 4 para 8 ppcm, a máxima eficiência de radiação medida caiu para 23 %. Esta diferença se dá devido à menor

espessura ótica da REC de 4 ppcm. Poros de maior diâmetro expõem ao ambiente partes mais profundas da matriz sólida fazendo com que a temperatura efetiva da superfície se eleve. Diferentemente dos queimadores testados por Khanna et al., 1994, a eficiência máxima foi encontrada em um ponto intermediário da faixa de estabilidade de chama (250 kW/m<sup>2</sup>).

Bouma e De Goey, 1999, também mediram a eficiência de radiação em queimadores porosos de cordierita. Estes queimadores possuem uma REC muito pequena, fazendo com que ocorra a estabilização da frente de chama próxima à superfície. Para uma riqueza de mistura fixa em 0,9 a potência do queimador foi variada de 100 a 600 kW/m<sup>2</sup>. Nesta faixa de variação ocorreu a queda da eficiência de radiação de 33 % para 8 %.

Os estudos experimentais de Pereira, 2002, mostram uma análise do desempenho de queimadores construídos a partir de filtros cerâmicos de zirconita/alumina, sob diversas condições de operação, avaliando a eficiência de radiação. A mínima riqueza de mistura em que a chama estabilizou foi em 0,4. A eficiência de radiação variou entre 18 % para velocidades de chama mais altas e 28 % para velocidades de chama mais baixas.

Catapan, 2005, desenvolve um novo fluido dinâmico de estabilização da chama, obtendo uma ampla faixa de estabilidade de chama. Com isto, avalia três configurações com diferentes camadas de esponjas cerâmicas de carbeto de silício e zircônia, operando com metano e ar pré-misturados, em uma faixa de riqueza da mistura de combustível de 0,35 a 0,65. Essa faixa de operação obteve uma variação na eficiência de radiação entre 20 % e 35 %, já no queimador de zircônia a eficiência de radiação variou entre 25 % e 50 %.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos utilizados para a realização do experimento.

##### 4.1. Bancada experimental

Para a realização do estudo foi construída uma bancada para o desenvolvimento do experimento. Esta bancada permite o controle das vazões de ar e combustível de forma independente e medição a fração radiante que é emitida pelo queimador de meio poroso.

Conforme a Figura 4.1, a bancada é composta por sistemas de alimentação de ar e combustível, sistema de medição de radiação térmica, sistema de aquisição de dados e o queimador de meio poroso.

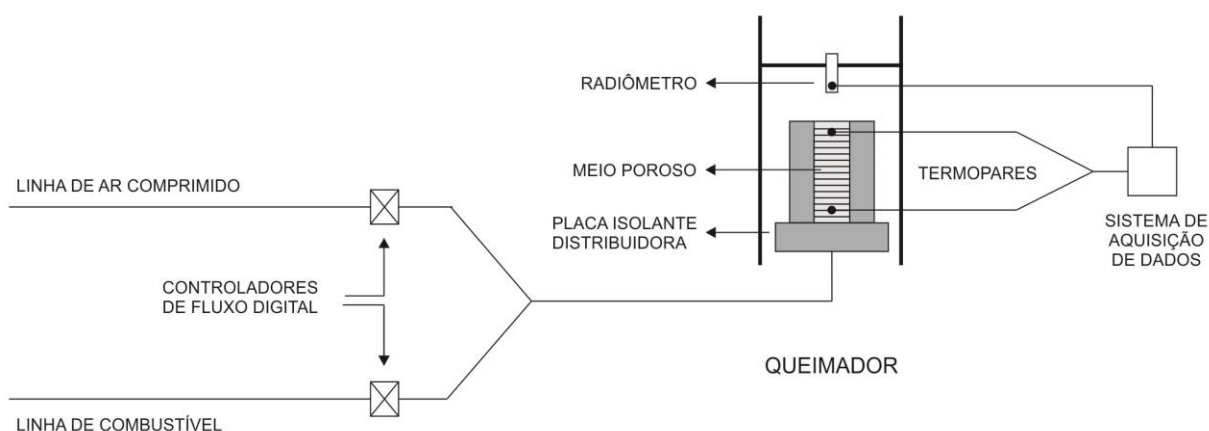


Figura 4.1. Desenho esquemático da bancada experimental.

#### 4.1.1. Suporte para posicionamento do radiômetro

Foi projetado e construído um suporte, visto na Figura 4.2. Colocando-se a fonte de radiação ao centro, o dispositivo facilita o posicionamento preciso do radiômetro em diferentes ângulos de leitura, podendo variar de 0 a 180°, bem como em diferentes posições radiais, podendo variar de a 50 a 500 mm.

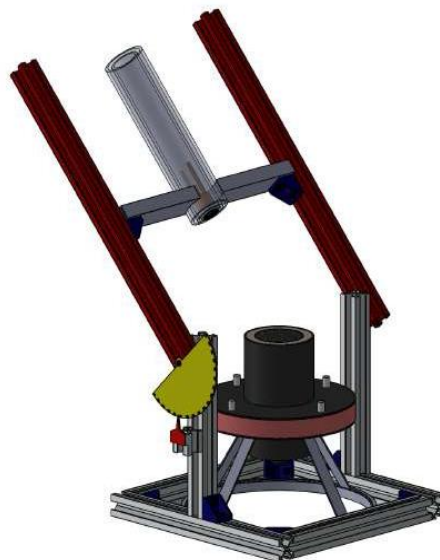


Figura 4.2. Suporte para posicionamento do radiômetro.

#### 4.1.2. Radiômetro

O dispositivo utilizado para medição da radiação no experimento foi um radiômetro da marca MEDTHERM, com incerteza de medição de 3 %. Ele é um dispositivo fotoelétrico que absorve o fluxo de calor na superfície do sensor e transfere para um dissipador de calor integrado que permanece em uma temperatura diferente do que a superfície do sensor. A diferença de temperatura entre os dois pontos selecionados ao longo do caminho do fluxo de calor do sensor é função do calor sendo transferido e do fluxo de calor líquido absorvido. Em dois desses pontos os transdutores possuem termopares, proporcionando um campo eletromagnético auto gerado para os condutores de saída que é diretamente proporcional à taxa de transferência de calor. Esta resposta é dada na ordem de  $mV$ , e o fator de conversão é  $3,705 \text{ mV} / \frac{W}{\text{cm}^2}$ .

#### 4.1.3. Controlador de Fluxo ar/combustível

No experimento foram utilizados dois controladores digitais de vazão da marca BRONKHORST. O primeiro modelo possui vazão de operação máxima de 9  $\text{m}^3/\text{s}$ , padrão que utiliza como referência a pressão de 1atm e a temperatura de 20 °C e incerteza de medição de 0,1 % do valor de fundo de escala. O segundo possui vazão de 0,6  $\text{m}^3/\text{s}$  e mesma incerteza. A unidade de leitura é a E-710 digital PS.

#### 4.1.4. Placa isolante térmica distribuidora

Para que a vazão da mistura ar/combustível ocorra em apenas alguns pontos do queimador e não em toda sua superfície é utilizada uma placa isolante com distribuição de

furos. A cada injeção fica associada uma chama que pode ou não se conectar com as demais, dependendo da distribuição de furos na placa isolante e do ponto de operação do queimador.

A vantagem desta configuração é que a mistura ar/combustível tem que sofrer uma aceleração para passar pelos orifícios da placa isolante perfurada. Assim, ao entrar na cerâmica os gases não reagidos apresentam altas velocidades, dificultando o retorno de chama. Outra vantagem é a possibilidade de otimização da distribuição dos furos na placa isolante de forma a obter um perfil de temperatura homogêneo em todo o queimador, mesmo para elevadas relações área superficial/espessura.

#### 4.1.5. Queimador de meio poroso

O queimador é montado no interior de uma carcaça de aço com diâmetro interno de 130 mm e flanges nas duas extremidades, para facilitar a montagem e desmontagem do equipamento, conforme Figura 4.3. O espaço entre o elemento poroso e a carcaça de aço é preenchido com uma camada de isolante térmico a base de alumina, resistente até 1200 °C.

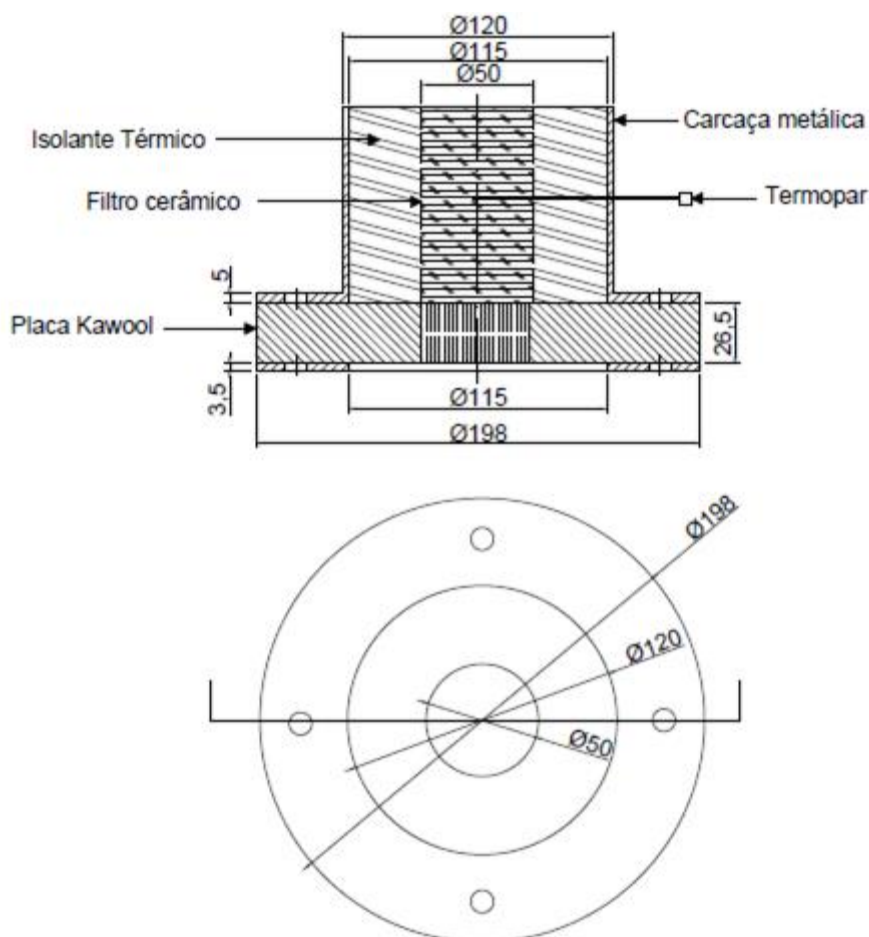


Figura 4.3 - Representação esquemática do queimador poroso.

A construção do queimador é realizada a partir de esponjas cerâmicas comerciais empregadas em processos de fundição de aço. Estes materiais possuem estrutura semelhante a esponjas.

Os materiais utilizados como meio poroso são de três modelos diferentes de filtros comerciais utilizados separadamente. A composição dos materiais utilizados são zircônia, com 50 mm de diâmetro e 22 mm de espessura e 20 ppi, conforme Figura 4.4.



Figura 4.4 - Esponja cerâmica de zircônia com 20 ppi de porosidade.

O meio poroso de carbeto de silício, com dimensões de 50 mm de diâmetro e 22 mm de espessura, com duas porosidades diferentes, uma de 10 ppi e outra de 20 ppi, pode ser visto na figura 4.5 e 4.6, respectivamente.

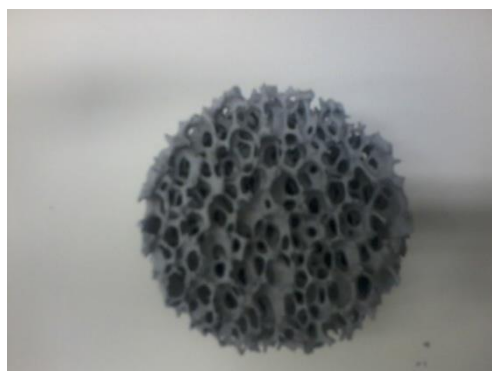


Figura 4.5 - Esponja cerâmica de carbeto de silício com 10 ppi de porosidade.



Figura 4.6 - Esponja cerâmica de carbeto de silício com 20 ppi de porosidade.

## 4.2. Procedimento experimental

A metodologia empregada no experimento foi baseada na proposta de Hsu et al., 1993, que consiste em encontrar, inicialmente, uma razão de equivalência ar/combustível e uma vazão volumétrica dos gases, em que ocorra a estabilização da chama no interior do meio poroso. Este valor é obtido através do estudo da bibliografia existente e de testes preliminares realizados para verificar a funcionalidade da bancada. Somente após a estabilização do processo no interior do queimador, verificado por um termopar, é que as medições podem ser iniciadas.

O correto posicionamento do queimador em relação ao radiômetro é de fundamental importância para a validação do experimento. Apenas com o preciso alinhamento do topo do queimador, com o eixo girante do suporte do radiômetro pode-se realizar as medições. Iniciando na posição de 0° (vertical) e variando o ângulo é que se pode ter uma estimativa em relação a um invólucro semiesférico de radiação.

No presente experimento foi utilizado o fator de correção na vazão do controlador de combustível no valor de 0,95057. Isso ocorre devido o controlador ser calibrado para metano, e no presente trabalho o combustível utilizado para combustão no interior do meio poroso foi gás natural.

Após a estabilização da chama, regulam-se os controladores de vazão para a razão de equivalência desejada. O procedimento de medição é realizado após ocorrer o equilíbrio térmico do sistema. Três termopares realizam o monitoramento térmico, de forma que é considerado este equilíbrio quando todas as temperaturas não variam mais de 2 °C em um período de 10 minutos.

Em seguida inicia-se a medição, posicionando o sensor a uma distância de 30 cm do queimador, realizando medições em quatro ângulos diferentes entre 0° (vertical) e 90° (horizontal). Com o posicionamento correto do sensor na angulação desejada, retira-se a barreira metálica, posicionada entre o queimador e o radiômetro, e é coletado por 100 segundos o fluxo de calor radiante. Após este período a barreira é reposicionada e espera-se até o dispositivo não ser afetado pelo procedimento anterior, através do monitoramento do sensor.

O processo é repetido para as razões de equivalência de 0,5, 0,6 e 0,7 nos três modelos de queimadores.

Desta forma pode-se avaliar o comportamento da radiação em relação a diferentes densidades de poros e materiais, para variações das razões de equivalência ar/combustível.

## 4.3. Análise das incertezas de medição

A análise da incerteza experimental ( $u$ ) causada por erros aleatórios (resultado do somatório de pequenos erros independentes e incontroláveis) foi realizada através da aplicação do método de propagação de erros proposto por Kline-Mc Clintock. Segundo Holman, 1994, o método é dado pela Equação 4.1:

$$u = \pm \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{dY}{di} u_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.1)$$

onde  $Y$ , a grandeza medida, é função de outras grandezas.

Essa ferramenta indica quantitativamente a incerteza e serve de parâmetro para análise da qualidade dos dados obtidos.

### 4.3.1. Incertezas na determinação da relação de equivalência

O cálculo da relação de equivalência da mistura foi realizado a partir da Equação 2.1. Como a fração  $f_s$  é conhecida, a proporção ar/combustível, nas condições do experimento, pode ter a incerteza determinada a partir da incerteza dos controladores de vazão digitais. Para tanto, o método de Kline-McClintock também foi utilizado, tal como expresso na equação a seguir:

$$u_\phi = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{d\phi}{d\dot{V}_{ar}}\right)u_{\dot{V}_{ar}}\right]^2 + \left[\left(\frac{d\phi}{d\dot{V}_{comb}}\right)u_{\dot{V}_{comb}}\right]^2} \quad (4.2)$$

A incerteza de fundo de escala para os controladores de vazão é de 0,1 %. Dessa forma, a incerteza associada ao controlador de ar para a maior vazão utilizada é de 0,0028 m<sup>3</sup>/s e a incerteza do controlador de combustível é de 0,05 m<sup>3</sup>/s. Assim, a incerteza de medição devido ao valor da relação de equivalência da mistura ar/combustível é de 0,76 %.

### 4.3.2. Incertezas na análise da fração radiante

O cálculo da fração radiante do queimador foi realizado a partir da Equação 2.8. O fluxo de calor radiante foi medido a partir do radiômetro, que possui erro de medição de 3,0 %. A incerteza de medição encontrada pela vazão de combustível foi de 0,0025. Desta maneira, podemos encontrar a incerteza de medição para a fração radiante através da Equação 4.3:

$$u_{\eta_{rad}} = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{d\eta_{rad}}{d\dot{m}_c}\right)u_{\dot{m}_c}\right]^2 + \left[\left(\frac{d\eta_{rad}}{dQ_r}\right)u_{Q_r}\right]^2} \quad (4.3)$$

Deste modo, a incerteza de medição da fração radiante igual a 1,57 %.

## 5. RESULTADOS

Para realizar os experimentos a vazão mássica combustível (GNV) foi mantida constante no valor de 0,15 m<sup>3</sup>/s, e conseqüentemente a energia total ( $S_r$ ) em 1451,5 W, e a de ar foi calculada segundo a Equação 2.1, para todos os casos.

### 5.1. Carbetto de silício com 10 ppi

As medidas foram realizadas primeiramente para o meio poroso composto por carbetto de silício com 10 ppi e 35,56 % de porosidade. Os resultados são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Fluxo e fração radiante para diferentes razões de mistura utilizando meio poroso de carbetto de silício com 10 ppi.

$\phi$	$\eta$ [%]	Fluxo Radiante [W]
0,5	15,03	210,14
0,6	17,39	252,41
0,7	20,02	290,64

Como se pode perceber, tanto o fluxo quanto a fração radiante aumentam com o crescimento da razão de mistura. Isso ocorre devido à relação da Equação 2.8, em que foi



utilizado o mesmo valor de potência total (1451,5 W) em todos os casos, visto que o combustível e sua vazão foram os mesmos.

## 5.2. Carbetto de silício com 20 ppi

Na segunda medição foi utilizado o meio poroso com composição de carbetto de silício com 20 ppi e porosidade de 30,87 %. Foi possível realizar somente duas medidas utilizando essa configuração de queimador, devido a decomposição do material para a razão de equivalência  $\phi = 0,7$ , que pode ser visto na Figura 5.1



Figura 5.1 - Meio poroso de carbetto de silício degradado termicamente.

Esse filtro cerâmico possui uma temperatura máxima de operação de aproximadamente 1300 °C como pode ser visto no Anexo 1. Durante a realização da aquisição de dados a temperatura atingida foi de 1500 °C, o que ocasionou sua decomposição, o que pode ter acontecido devido a uma imperfeição da matriz.

Os valores de fluxo e fração radiante para  $\phi = 0,7$  foram estimados pela interpolação dos dados medidos para as outras riquezas de mistura. Os cálculos desses dados foram realizados visando a comparação com outras porosidades e materiais. Essa aproximação pode ser considerada, pois o sólido anterior também apresentou comportamento linear. Os resultados podem ser observados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Fluxo e fração radiante para diferentes razões de mistura utilizando meio poroso de carbetto de silício com 20 ppi.

$\phi$	$\eta$ [%]	Fluxo Radiante [W]
0,5	14,48	210,27
0,6	16,05	232,02
0,7	17,87	262,63

## 5.3. Zircônia com 20 ppi

Finalmente, para o filtro de zircônia com 20 ppi e porosidade de 29,82 %, as medidas foram realizadas sob as mesmas condições dos experimentos anteriores, gerando a Tabela 5.3.

Para essa composição não ocorreu degradação para nenhuma razão de equivalência, visto que sua temperatura de operação é de 2300 °C e no experimento o termopar monitorou uma média de 1350 °C. Entretanto, houve dificuldade na estabilização de chama para  $\phi = 0,5$ .

Tabela 5.3: Fluxo e fração radiante para diferentes razões de mistura utilizando meio poroso de zircônia com 20 ppi.

$\phi$	$\eta$ [%]	Fluxo Radiante [W]
0,5	10,44	151,53
0,6	13,21	191,69
0,7	17,4	252,48

#### 5.4. Análise de resultados

Buscando obter relações entre as porosidades foram analisados os filtros cerâmicos de mesma composição (SiC).

Como pode ser observado na Figura 5.2, a fração radiante para mesma razão de equivalência, foi superior no queimador de menor densidade linear de poros, ou seja, quanto maior a porosidade mais radiação é emitida. Isso ocorre pois existe mais área para a troca de calor entre as regiões internas do poro, dessa forma, existe mais energia irradiada. Além disso, como há menos material, tem-se uma menor perda de calor por condução.

Esse comportamento está coerente com o esperado, conforme foi verificado por Mital et al., 1997, e é mais evidente conforme aproxima-se da razão estequiométrica ( $\phi = 1$ ). Nessa condição existe maior geração de calor, conseqüentemente a temperatura é maior, o que ocasiona mais perda de calor.

Assim como foi feita a análise de diferentes porosidades, pode-se comparar materiais distintos. A Figura 5.3 apresenta a variação da fração radiante pela razão de equivalência.

Percebe-se que o material de carbetto de silício possui uma fração de radiação superior quando comparada a matriz de zircônia para mesma razão de equivalência. Isso era esperado visto que o SiC possui parâmetros como condutividade térmica e emissividade superiores. Contudo os queimadores de zircônia possuem a vantagem de suportar maiores temperaturas de operação, conforme anexo 1.

Nota-se que a fração radiante, conforme equação 2.8, é uma relação entre toda a energia e a parcela medida. Esse valor não foi superior a 20% nos experimentos, um resultado considerado baixo se comparado com a faixa de 25 a 50 % de acordo com Catapan, 2005.

O fluxo radiante medido para as três configurações de queimadores pode ser analisado na Figura 5.4. Percebe-se que o meio poroso de carbetto de silício de 10 ppi obteve uma maior eficiência de radiação em todas as razões de riqueza. Como já analisado, o material e sua porosidade contribuem para esse fato.

Em todas os casos medidos o composto de carbetto de silício teve um fluxo radiante superior ao de  $ZrO_2$ , mesmo para o caso de 20 ppi. Porém nota-se que existe uma tendência ao se aproximar da razão estequiométrica. Novamente, é importante ressaltar que o fluxo radiante para a matriz de SiC com 20 ppi foi calculado e não medido, devido a sua decomposição, para fins comparativos.

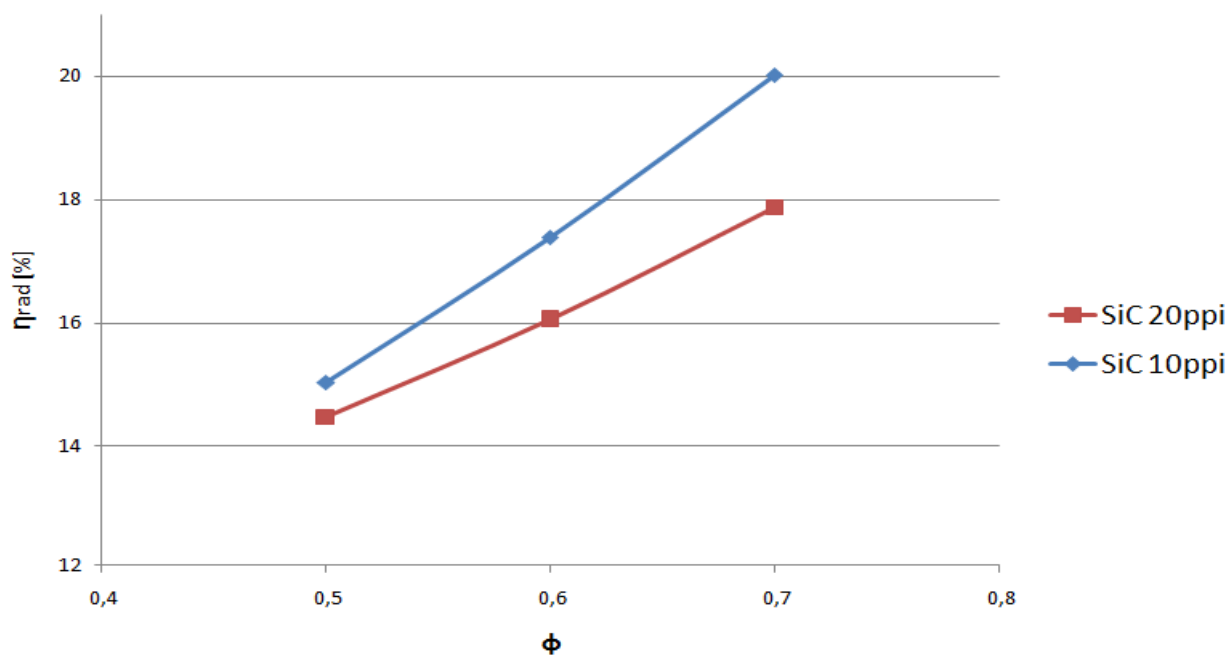


Figura 5.2 - Variação das frações radiantes ( $\eta$ ) pela razão de equivalência ( $\phi$ ) para mesmo material (SiC) com diferentes porosidades (10 e 20 ppi).

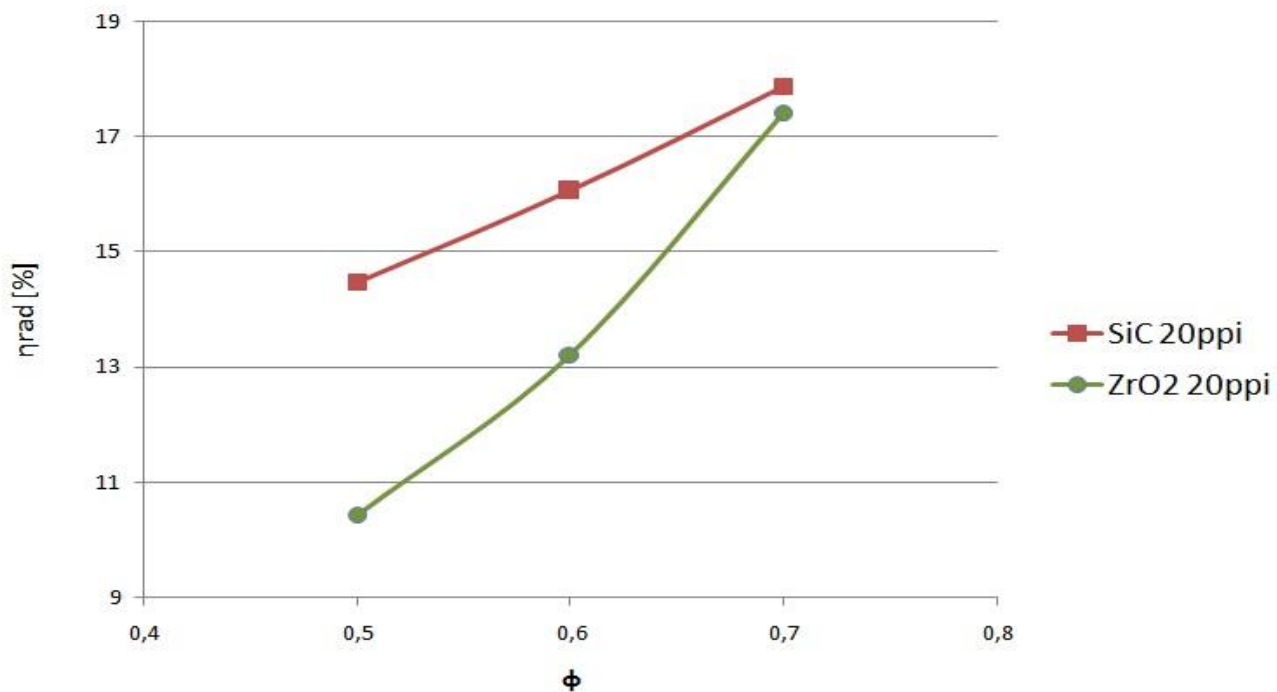


Figura 5.3 - Variação das frações radiantes ( $\eta$ ) pela razão de equivalência ( $\phi$ ) para mesma densidade linear (20 ppi) com diferentes materiais (SiC e ZrO<sub>2</sub>).

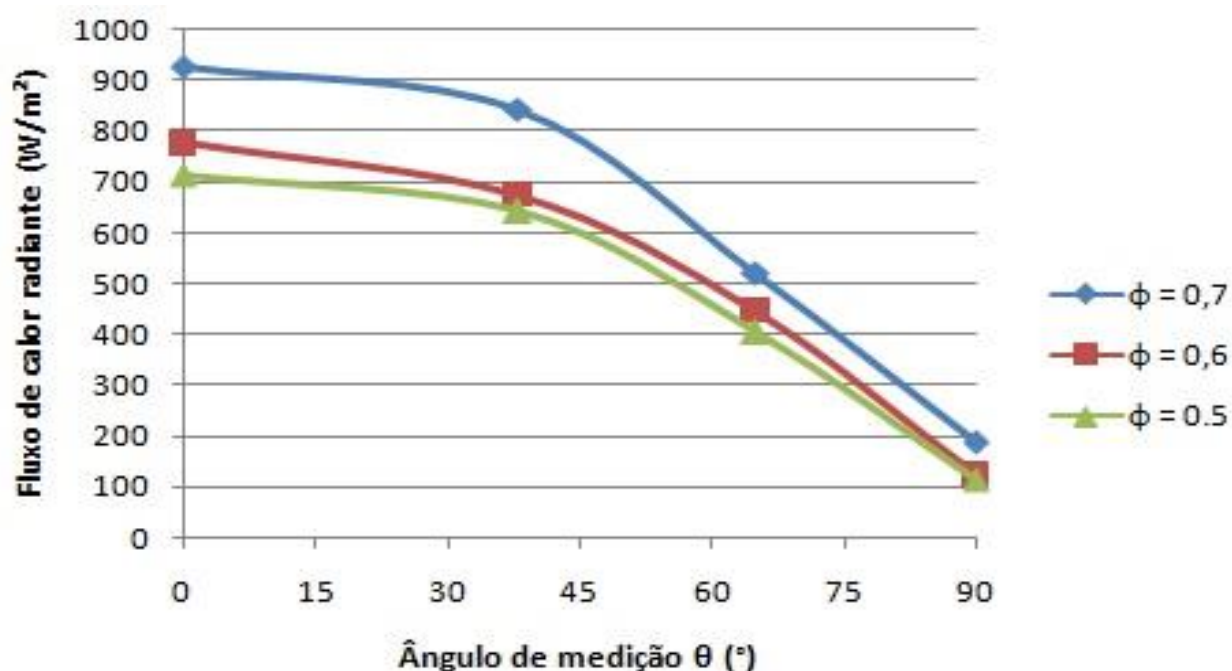


Figura 5.4 - Variação do fluxo radiante ( $Q_r$ ) pelo ângulo de medição ( $\theta$ ) para carbeto de silício com porosidade de 10 ppi.

A variação do fluxo radiante com o ângulo de medida, para a matriz de SiC com 10 ppi, pode ser observada na Figura 5.4. Percebe-se que, conforme o ângulo de medição aumenta (se afasta da posição vertical para horizontal), ocorre uma diminuição do fluxo. A diminuição do fluxo radiante é mais acentuada para os dois últimos ângulos medidos, em que ocorreu diminuição, na média das três curvas, de 13,2% de 0 a 38°, 43,6% de 38 a 65° e 52,3% de 68 a 90°. Esse decaimento também é percebido para os outros filtros e porosidades.

Segundo Pereira, 2002, os queimadores porosos possuem uma emissão de radiação direcional. Portanto, com a variação da posição do ângulo de medição de 0° (alinhado a fonte) até 90° houve alteração do fator de forma, ocorrendo a redução do fluxo com aumento do ângulo.

Novamente observa-se que o fluxo de radiação foi maior para razões de equivalência superiores em todos os ângulos. Uma vez que se espera que o maior fluxo radiante ocorra na razão de equivalência estequiométrica, ou seja,  $\phi = 1$ .

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi projetada uma bancada para medições de fluxo radiante para diferentes materiais e porosidades. As medições foram realizadas em ângulos distintos para mapear o comportamento da radiação através da área de uma semi-esfera.

A estabilização do processo se mostrou um desafio, pois para diferentes riquezas existe uma faixa de velocidade de chama que deve ser respeitada. As medições tinham validade apenas após atingir o equilíbrio térmico no interior do meio poroso.

A distribuição do fluxo de calor no em torno do queimador foi caracterizada.

A porosidade dos materiais cerâmicos afeta diretamente na eficiência de radiação, de modo que, quanto menor a densidade linear de poros maior a eficiência de radiação, devido a presença de uma maior área para a troca de calor entre os poros e principalmente pela diferença de penetração ótica do material.

Em relação aos materiais nota-se que o carbetto de silício possui maior eficiência térmica que a zircônia, resultado esperado, devido a maior emissividade e condutividade térmica do material. Contudo o SiC apresenta uma temperatura de operação máxima inferior ao outro composto, o que constitui uma desvantagem. Fato observado na degradação do filtro cerâmico de carbetto de silício de 20 ppi na razão de equivalência de 0,7.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Ampliar a gama de investigação em termos de porosidades e materiais;
- Analisar os limites de operação do queimador poroso em termos de velocidade do escoamento e riqueza da mistura;
- Empregar combustíveis de menor poder calorífico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abril, Planeta sustentável; [www.planetasustentavel.abril.com.br/noticia/energia/apetite-global-energia-subira](http://www.planetasustentavel.abril.com.br/noticia/energia/apetite-global-energia-subira), acessado em 09/11/2014.

Bouma, P. H.; De Goey, L. P. H.; "**Premixed combustion on ceramic foan burners**". Combustion and Flame, v. 119, p. 133-143, 1999.

Catapan, R. C.; "**Desenvolvimento de um queimador poroso a gás natural para baixas temperaturas**", Trabalho técnico experimental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

Holman, J. P.; "**Experimental Methods for engineers**" McGraw-Hill Int. Editions, 6 ed. Singapore, p. 616, 1994.

Hsu, P., Evans, W. D.; Howell, J. R.; "**Experimental and numerical study of premixed combustion within nonhomogeneous porous ceramics**". Comb. Sciand and Tech., v. 90, p.149-172, 1993.

Incropera, F. P., et. al., "**Fundamentos de transferência de calor e massa**", Editora LTC., sexta edição, 2005.

Mital, R.; Gore, J. P.; Visakanta, R.; "**A study of the structure of submerged reaction zone in porous ceramic radiant burners**". Combustion and Flame, v. 111, p. 175-184, 1997.

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 de Santa Catarina, 2002.

Richerson, D., W.; "**Modern ceramic engineering. Properties, Processing and Use in Design.**" Ed. Marcel Dekker, Inc. New York, USA, 1992.

Sivathanu, Y. R.; Gore, J. P.; "**Total Radiative Heat Loss in Jet Flames from Single Point Radiative Flux Measurements**". Combustion And Flame, vol. 94,1993.

Turns, S. R.; "**An Introduction to Combustion**", McGraw-Hill Higher Education", 2º ed., 2000.

## APÊNDICE I

Para o cálculo da incerteza de medição de  $\phi$ , as derivadas dos termos utilizados na Equação (4.3) estão dispostos a seguir:

$$\frac{d\phi}{d\dot{V}_{ar}} = -\frac{\dot{V}_{comb}}{\dot{V}_{ar}^2} \quad (I.1)$$

$$\frac{d\phi}{d\dot{V}_{comb}} = \frac{1}{\dot{V}_{ar}} \quad (I.2)$$

## APÊNDICE II

Para o cálculo da incerteza de medição de  $\eta_{rad}$ , as derivadas dos termos utilizados na Equação (4.4) estão dispostos a seguir:

$$\frac{d\eta_{rad}}{dQ_r} = \frac{1}{\dot{m}_c H} \quad (II.1)$$

$$\frac{d\eta_{rad}}{d\dot{m}_c} = -\frac{Q_r}{\dot{m}_c^2 H} \quad (II.2)$$

## ANEXO I

Tabela 1 - Propriedades de materiais empregados em materiais porosos. (Adaptado de Catapan, R. C., 2005)

Material	Condutividade térmica, W/mK		Temperatura máxima de operação, °C	Emissividade a 2000k
	a 20 °C	A 1000 °C		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30	5	1700	0,28
SiC	150	20	1300	0,8 a 0,9
ZrO <sub>2</sub>	2 a 5		2300	0,31