

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE RADIAÇÃO EM UM QUEIMADOR POROSO
RADIANTE UTILIZANDO GÁS NATURAL

por

Frederico Eggers

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 2016

ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE RADIAÇÃO EM UM QUEIMADOR POROSO
RADIANTE UTILIZANDO GÁS NATURAL

por

Frederico Eggers

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. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Volnei Borges

Prof. Dr. Horácio Antonio Vielmo

Prof. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 22 de junho de 2016.

“O homem é do tamanho do seu sonho”

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo carinho, apoio e incentivo ao longo desta trajetória, por compartilharem deste sonho e me ajudarem a torná-lo realidade.

Agradeço imensamente aos meus pais, Egon Eggers e Melasia Maria Wolfart Eggers, que me ensinaram princípios e valores e que nunca mediram esforços em minha educação, fornecendo todo suporte e estrutura para que eu pudesse continuar estudando. Agradeço por dividirem comigo minhas angústias e alegrias, por nunca deixarem desistir dos meus sonhos e por eles serem a minha motivação.

Agradeço em especial ao meu irmão e mestre Ismael Eggers por ser decisivo e fundamental na minha escolha e por estar sempre comigo, me incentivando, me apoiando, me guiando e sobre tudo acreditando e confiando no meu potencial.

À minha namorada, Kelli Daiana Klein, por todo apoio, conselhos, atenção, carinho, amor e por tudo aquilo que representa para mim. Por compartilhar comigo todos os momentos, sejam de batalhas, sejam de conquistas.

Ao meu orientador, Professor Fernando Marcelo Pereira pela disponibilidade e dedicação nos esclarecimentos teóricos e técnicos para o desenvolvimento deste trabalho. Por contribuir na minha formação, sendo um excelente professor e profissional.

À equipe do Laboratório de Combustão (LC) por permitir e auxiliar na realização dos experimentos desse trabalho. Em especial ao colega Orion Costa pelo auxílio com a montagem da bancada e realização dos experimentos. Ao técnico Rafael Quines por prestar todo suporte e ao mestrando Luis Quezada pelo acompanhamento e esclarecimentos teóricos.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial aos professores que compõem a banca examinadora.

À equipe de manutenção da UPMV da Pirelli Pneus de Gravataí.

EGGERS, F. **Estudo experimental da eficiência de radiação em um queimador poroso radiante utilizando gás natural**. 2016. 27. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

É desenvolvido um queimador poroso radiante capaz de operar com uma ampla faixa de temperaturas, sendo alimentado por uma combustão pré-misturada de gás natural e ar, através do qual são avaliados experimentalmente o diagrama de estabilidade de chama e a eficiência de radiação em função do efeito provocado pelas diferentes estruturas de matriz porosa. As vantagens de se trabalhar com esse tipo de queimador poroso são proporcionar a queima de combustíveis com baixo poder calorífico e permitir a baixa emissão de poluentes, além de apresentar elevada eficiência de radiação. O material poroso utilizado é o carbetto de silício (SiC) com porosidades de (10 e 30) ppi formando dois queimadores distintos, sendo que cada um deles é operado com razões de equivalência de (0,5 e 0,6). A bancada de ensaios em que os experimentos foram conduzidos conta com o queimador instrumentado com nove termopares ao longo do comprimento do queimador, mecanismo para acoplamento de dispositivo para a leitura do fluxo de calor (com possibilidade de posicionamento de 0 a 180°), linhas de ar comprimido, gás natural, e sistema de aquisição de dados. Para o queimador com matriz porosa de 30 ppi as faixas de estabilidade foram maiores e a eficiência de radiação foi levemente superior, o mesmo acontece quando utilizado razão de equivalência de 0,6. Os resultados para a eficiência de radiação variaram de 16 a 26%.

PALAVRAS-CHAVE: queimador poroso, carbetto de silício, esponja cerâmica, eficiência de radiação.

EGGERS, F. **Experimental study of radiation efficiency in a porous radiant burner using natural gas**. 2016. 27. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

A radiant porous burner is developed capable of operating with a wide range of temperatures, which is fueled by a premixed combustion natural gas and air, through which are experimentally evaluated the flame stability diagram and the radiation efficiency due to the effect caused by the different structures of the porous matrix. The advantages of working with this kind of porous burner is to provide the combustion of fuels with low calorific value and allow low emissions of pollutants, in addition to presenting high radiation efficiency. The porous material used is silicon carbide (SiC) with porosities (10 and 30) ppi forming two distinct burners, of which each is operated with equivalence ratios (0.5 and 0.6). The test bench the experiments were conducted has the burner instrumented with nine thermocouples along the burner length, mechanism for coupling device to read the heat flux (with the possibility of positioning from 0 to 180°), compressed air lines, natural gas, and data acquisition systems. To the burner with porous matrix of 30 ppi, the stability ranges were higher and the radiation efficiency was slightly higher, the same happens when using 0.6 equivalence ratio. Results for radiation efficiency ranging from 16 to 26%.

KEYWORDS: porous burner, silicon carbide, ceramic sponge, radiation efficiency.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
4.1. Combustão em meios porosos inertes.....	3
4.2. Estabilidade e propriedades de chama.....	4
4.3. Eficiência de radiação.....	5
5. MÉTODO.....	6
5.1. Queimador de meio poroso inerte.....	6
5.2. Dispositivo para medição do fluxo de calor.....	7
5.3. Bancada de ensaios.....	8
5.4. Procedimento experimental.....	9
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
6.1. Carbetos de silício com 10 ppi.....	10
6.2. Carbetos de silício com 30 ppi.....	12
6.3. Comparação entre as matrizes de 10 e 30 ppi.....	13
7. CONCLUSÃO.....	14
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14
APÊNDICE I.....	16
APÊNDICE II.....	17
APÊNDICE III.....	19

1. INTRODUÇÃO

A combustão sempre teve muita importância na vida do homem. Uma das grandes vitórias da humanidade foi sem dúvida a conquista do fogo, onde o homem aprendeu a provocar combustões e a controlá-las. Com o passar do tempo o homem foi adquirindo conhecimentos e aperfeiçoando os mecanismos de combustão, fato que levou a combustão a ser amplamente utilizada na indústria, inclusive pela necessidade de energia. Segundo Coelho e Costa, 2007, o consumo de energia a nível mundial tem aumentado de forma intensa, estimando-se que 90% da energia primária global é fornecida pela combustão.

Visando atender o setor industrial onde a demanda térmica depende da troca de calor por radiação, estudos e aprimoramentos da radiação térmica oriunda de processos de combustão permitiram o desenvolvimento de queimadores porosos radiantes. Estes queimadores são construídos a partir de estruturas porosas cerâmicas ou metálicas e a reação de combustão ocorre dentro do conjunto que forma a estrutura. Há pouco mais de três décadas pesquisas em meios porosos inertes vêm sendo desenvolvidas e estudadas. Esta tecnologia se caracteriza por altas taxas de transferência de calor por radiação térmica a partir do meio sólido, baixa emissão de poluente e grande eficiência de radiação. O meio sólido que é aquecido transfere o calor em ambos os sentidos do escoamento, permitindo um pré-aquecimento dos reagentes, e desta maneira proporcionando um acréscimo na velocidade de chama e um aumento na temperatura na zona de reação. Segundo resultados de diversos autores, os queimadores possuem uma faixa de velocidades onde é possível estabilizar uma chama para uma única razão de equivalência. Logo é possível ter várias velocidades de chama para cada razão de equivalência.

O foco principal do presente trabalho é a construção e instrumentação de uma bancada de ensaios, sendo o estudo da eficiência de radiação um dos principais parâmetros a ser analisado. O queimador poroso que foi desenvolvido é construído com matrizes cerâmicas de carbeto de silício e o combustível escolhido para os testes foi o gás natural, sendo que cerca de 90% deste gás é o gás metano. A eficiência de radiação calculada relaciona quanto de energia radiante está sendo emitida através da superfície do queimador pela potência de chama do mesmo, onde esta energia radiante é medida através de um instrumento que faz a leitura do fluxo de calor emitido pelo queimador. Os estudos se concentraram na determinação do diagrama de estabilidade de chama, do comportamento e da eficiência de radiação dos queimadores.

2. OBJETIVOS

Como objetivo geral se propõe avaliar experimentalmente o efeito da estrutura da matriz porosa sobre a eficiência de radiação térmica em um queimador poroso radiante utilizando gás natural.

Como objetivo específico se propõe:

- a) Construir um queimador com matriz cerâmica;
- b) Construir um dispositivo para a realização da medição do fluxo de calor;
- c) Instrumentar o queimador e a bancada de ensaios;
- d) Ensaar dois queimadores, um com matriz de 10 ppi e outro com matriz de 30 ppi;
- e) Calcular e avaliar a eficiência de radiação para cada ensaio.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Mital *et al.*, 1997, investigaram a eficiência de radiação em queimadores porosos com matriz cerâmica de cordierita reticulada ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$), o qual foi alimentado por metano e ar pré-misturados. Para a distribuição dos gases utilizaram uma placa também feita de cordierita com 19 mm de espessura e 26 (ppc) poros por centímetro. O ensaio compreendeu quatro queimadores com condições de espessura e ppc do suporte de chama diferentes, onde o efeito da variação na espessura e no tamanho dos poros da região de estabilização de chama foram avaliados segundo uma razão de equivalência de 0,9. Os resultados obtidos não mostraram grandes alterações na eficiência de radiação quando a REC foi alterada de 3,2 para 6,5 mm e a eficiência máxima ficou em torno de 30%. Porém, quando mantido a região de estabilização de chama em 3,2 mm e alterado a densidade linear de poros de 4 para 8 ppc, a máxima eficiência de radiação caiu para 23%. A disposição para a medição da eficiência de radiação é mostrada esquematicamente na Figura 3.1, onde o fluxo radiativo foi medido usando um radiômetro (Medtherm Corporation, Modelo 64 P-1-22) com uma janela de safira com ângulo de visão de 150° . A saída de radiação total do queimador foi obtida pela medição da distribuição do fluxo de calor incidente na superfície de um cilindro imaginário que envolve o queimador. Para obter a potência radiativa é realizada a integração do fluxo de calor medido em relação aos elementos de área diferenciais apropriados.

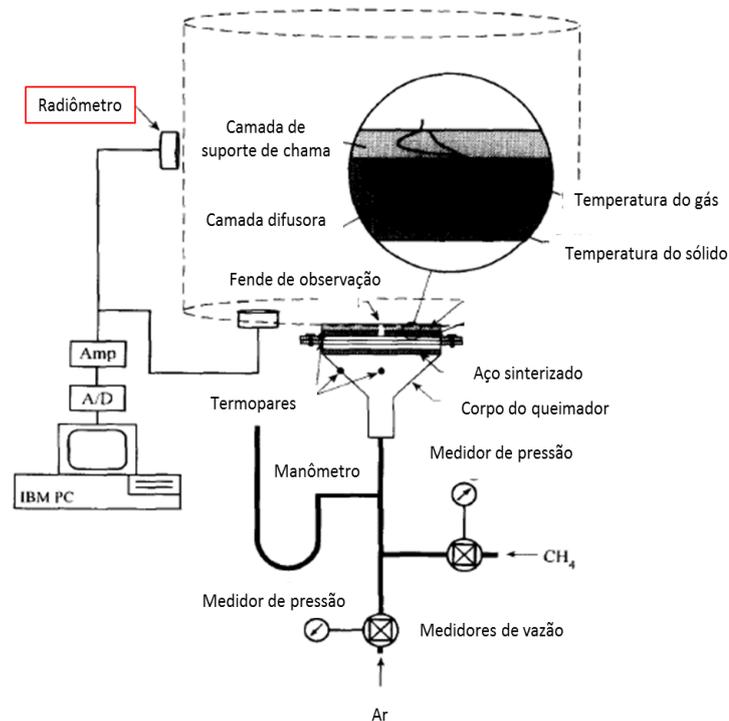


Figura 3.1 – Esquematização para medição do fluxo de calor (Traduzido de: Mital *et al.*, 1997).

Os estudos experimentais de Pereira, 2002, mostram uma análise da combustão pré-misturada de metano e ar em dois queimadores porosos, sendo o primeiro construído a partir de placas de esponja cerâmica de zirconita-alumina e o segundo com carbeto de silício, ambos com um empilhamento de quatro cerâmicas de 70 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. No estudo foram avaliados os mecanismos de estabilização de chama, as características térmicas e a eficiência de radiação. Para a matriz de carbeto de silício os resultados não foram satisfatórios quando comparado com a zirconita-alumina, pois a matriz de SiC apresentou degradação térmica em torno de 1400°C . Portanto os resultados experimentais somente foram

adquiridos para o primeiro queimador e a emissão de radiação a partir da matriz sólida variou de 18% para velocidades de chama mais altas e 28 % para velocidades de chama mais baixas. A variação da eficiência de radiação com a velocidade de chama para $\phi=0,6$ tem apresentado uma queda praticamente linear quando a velocidade de chama é aumentada, como mostra a Figura 3.2.

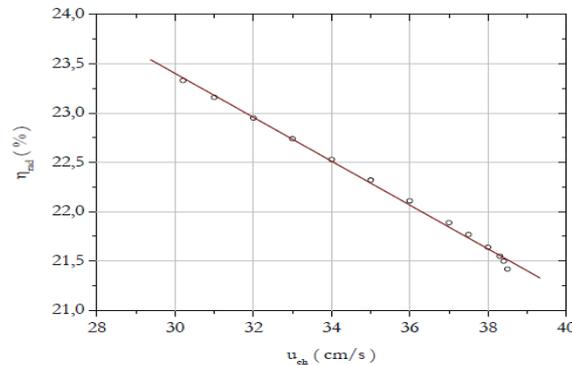


Figura 3.2 – Eficiência de radiação para razão de equivalência 0,6 (Pereira, 2002).

Gao *et al.*, 2011, realizaram um estudo experimental da combustão de biogás em um queimador poroso. Para tanto desenvolveram um queimador de 50 mm de diâmetro e 130 mm de comprimento de uma matriz cerâmica de Al_2O_3 , com uma configuração de placa de 30 cm e 60 ppi na seção de entrada da câmara, seguida de duas camadas de 50 mm de esferas de 3 e 8 mm de diâmetro, respectivamente. Foram avaliados os limites de estabilidade, a eficiência de radiação e a emissão de poluentes para misturas com e sem diluição de CO_2 . Os resultados mostraram que as razões de equivalência e as velocidades de mistura para obtenção de chamas estáveis decaíram com o aumento da diluição de CO_2 . Em virtude do aumento de CO_2 a mistura ar-combustível tornou-se mais pobre, o que fez a eficiência de radiação decair. Este resultado demonstra que a temperatura da superfície afeta explicitamente a eficiência da radiação, pois em virtude da altura do queimador fez com que a superfície superior seja pouco aquecida nessas baixas vazões. Desta forma, com o aumento da velocidade de chama a eficiência de radiação aumenta. Neste estudo a eficiência de radiação variou de 12 a 28% para o biogás em diferentes concentrações de CO_2 .

Para efeitos de comparação Gao *et al.*, 2013, realizaram a combustão de metano e ar pré-misturados projetando um queimador com diferentes materiais porosos. A montante utilizaram esferas de Al_2O_3 e a jusante um empilhamento alternado de outros materiais e ao longo do comprimento monitoraram a temperatura com nove termopares. Os resultados mostraram que com o aumento da condutividade térmica ou a diminuição da densidade dos poros os limites de estabilidade aumentaram.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Combustão em meios porosos inertes

A combustão em meios porosos difere significativamente de chamas livres devido a dois fatores principais. O primeiro fator é a elevada área de superfície do meio poroso, o que proporciona uma transferência de calor eficiente entre o gás e o sólido, e assim a mistura de combustível e oxidante em meios porosos proporciona uma efetiva difusão e transferência de calor na fase gasosa. O segundo fator é o pré-aquecimento dos reagentes. A transferência de calor por mecanismos de radiação e condução ocorrem a partir da região de pós-chama e estendem-se até a região de pré-aquecimento. Em queimadores, este pré-aquecimento pode

ser obtido inserindo um material sólido de alta porosidade entre estas fases. Esse fenômeno de pré-aquecimento da mistura de reagentes em um processo de combustão influencia significativamente no aumento da velocidade de chama e na temperatura máxima dos gases na zona de reação. A energia recebida por meio de um “empréstimo” pode fazer com que a temperatura máxima na região de combustão alcance valores acima da temperatura adiabática de chama, o que torna uma combustão superadiabática ou combustão com excesso de entalpia.

Em um processo de combustão as vantagens a partir do pré-aquecimento dos reagentes pelos produtos de combustão já é conhecida. Além de ser aplicado em queimadores porosos, este princípio é utilizado em sistemas térmicos e em unidades geradoras de vapor. Utilizando-se deste artifício é possível conseguir um aumento significativo da eficiência térmica do sistema e redução de poluentes. A vantagem de recuperação de calor de forma simples e consistente torna a combustão vantajosa e cativante.

4.2. Estabilidade e propriedades de chama

A matriz cerâmica dos queimadores é dividida em duas regiões distintas, em geral uma região de pré-aquecimento (RP) dos reagentes, com um tamanho de poros menores, e uma região de estabilização de chama (REC), com poros grosseiros. O intuito desta interface tem por finalidade forçar a estabilização da chama dentro do meio poroso. Esse mecanismo tende que a chama se estabilize na interface entre estas regiões como mostrado na esquematização da Figura 4.1 abaixo.

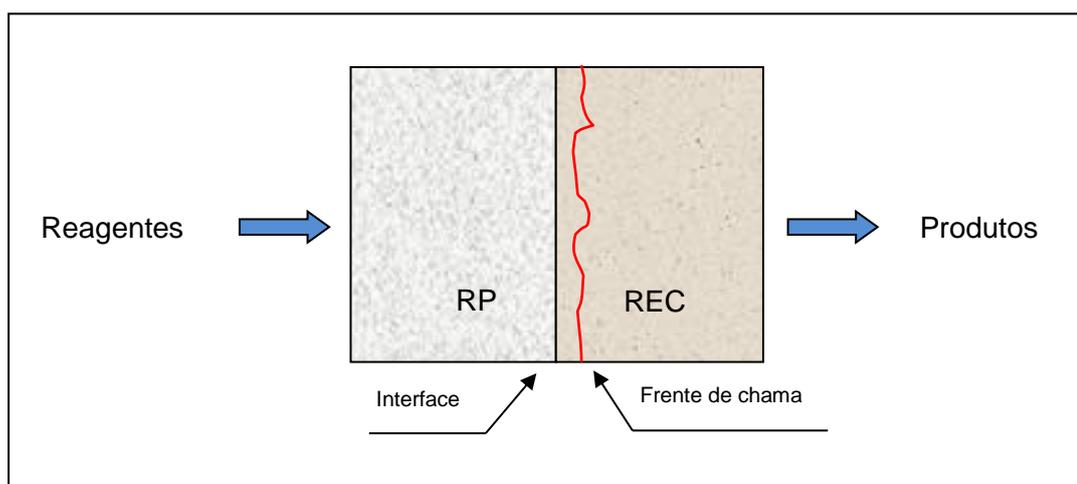


Figura 4.1 – Desenho esquemático da região de pré-aquecimento e da região de estabilização da frente de chama.

Os reagentes que entram no queimador poroso com certa temperatura inicial vão sendo aquecidos à medida que escoam ao longo do queimador a partir da troca de calor pela fase sólida. A matriz porosa então é aquecida pelos produtos formados pela combustão que fluem em direção à saída do queimador. Desta maneira ocorre um balanço entre fluxos de calor condutivo e radiativo, promovendo assim a transferência de energia dos gases quentes da reação para os gases frios que entram. Esse mecanismo também é chamado de recirculação de calor.

A temperatura adiabática de chama é a proporção de oxidante e combustível numa mistura arbitraria relativamente a uma mistura estequiométrica, que pode ser quantificada através da razão de equivalência (Φ). O efeito dominante da razão de equivalência na velocidade de propagação de chama advém da variação da temperatura de chama. A razão de equivalência é definida pela Equação 4.1 abaixo,

$$\phi = \frac{f}{f_s} = \frac{\frac{m_c}{m_a}}{\left(\frac{m_c}{m_a}\right)_s} \quad (4.1)$$

onde f e f_s são respectivamente a razão de combustível-ar e razão combustível-ar em condições estequiométricas. A massa de combustível é representada por m_c e a massa de ar por m_a . Se a razão acima for igual a um ($\phi = 1$), a mistura é estequiométrica. No caso de $\phi > 1$ temos uma mistura com excesso de combustível e em situações de $\phi < 1$ temos excesso de ar na mistura. Desta forma, quanto maior for ϕ mais rica será a mistura, logo mais combustível presente nos reagentes.

Em queimadores porosos a velocidade de chama é definida como a velocidade média do escoamento dos gases, sendo representada pela Equação 4.2 em seguida:

$$u_{ch} = \frac{\dot{V}_g}{A_q} = \frac{4\pi}{D_q^2} (\dot{V}_a + \dot{V}_c) \quad (4.2)$$

onde u_{ch} é a velocidade de chama do queimador, \dot{V}_g o fluxo volumétrico dos gases, \dot{V}_a e \dot{V}_c as vazões de ar e combustível respectivamente, A_q a área da seção transversal do queimador e D_q o diâmetro do filtro cerâmico.

Para relacionar as vazões ar-combustível com a razão de equivalência se faz uso da Equação 4.3, onde ρ_a é a densidade volumétrica do ar e ρ_c a densidade do combustível. As densidades são mantidas constantes na solução das equações.

$$\frac{\dot{V}_c}{\dot{V}_a} = \phi \left(\frac{\rho_a f_s}{\rho_c} \right) \quad (4.3)$$

4.3. Eficiência de radiação

Sabe-se que a radiação se origina pela emissão de energia e que seu transporte não exige a presença de qualquer meio material. Portanto, as aplicações com aquecimento de corpos ou superfícies a partir de uma chama é preferível trabalhar com este mecanismo de transferência de calor, pois tende ser mais eficiente.

A radiação térmica emitida pelo queimador pode ser quantificada através da eficiência de radiação, que é definida pelo quociente da potência radiativa e a potência de chama. A Equação 4.4 mostra como a eficiência de radiação, η_{rad} , pode ser calculada,

$$\eta_{rad} = \frac{\dot{Q}_r}{\dot{S}_r} = \frac{\int_A \dot{q}_r'' dA}{\dot{m}_c PCI_c} \quad (4.4)$$

onde \dot{Q}_r é a energia emitida pelo queimador para o ambiente dado em [kW], podendo ser calculado através da integração na área de uma calota hemisférica do fluxo de calor, \dot{q}_r'' , o qual é emitido pelo material poroso e pode ser medido através do radiômetro. Já a potência de chama, \dot{S}_r , é o fluxo total de energia do queimador e é definido pelo produto da vazão mássica de combustível, \dot{m}_c , em [kg/s] pelo poder calorífico inferior do combustível, PCI_c , dado em [kJ/kg].

5. MÉTODO

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Combustão - LC da UFRGS e tem como foco a construção de uma bancada de ensaios para a análise da eficiência de radiação em um queimador poroso sob algumas condições de operação. Em seguida serão descritos os materiais e métodos aplicados para a realização do estudo experimental.

5.1. Queimador de meio poroso inerte

Os queimadores ensaiados foram construídos a partir de filtros cerâmicos comerciais, os quais são aplicados principalmente em processos de fundição. Estes materiais possuem estrutura semelhante a esponjas vegetais, apresentando no seu interior cavidades tridimensionais que são interligadas por uma série de nervuras. Na Figura 5.1 é mostrado um conjunto de imagens ilustrando simplificada o processo de construção e montagem do queimador poroso. Inicialmente confeccionou-se a placa distribuidora dos gases da mistura e os anéis isolantes, ambos a partir de uma placa rígida a base de alumina e sílica. Os processos seguintes foram à montagem da placa distribuidora na base da carcaça cilíndrica, a colocação dos anéis isoladores e das esponjas cerâmicas no interior da estrutura metálica, sendo o anel e a cerâmica montados alternadamente. Nesse procedimento também foi utilizado manta isolante flexível para preencher os espaços vazios dando firmeza na montagem e evitando a fuga dos gases. Para finalizar foi necessário quebrar a cerâmica cuidadosamente fazendo furos até o centro para posterior colocação dos termopares.

A carcaça cilíndrica utilizada é flangeada em uma das extremidades para posterior acoplamento em outra carcaça metálica contendo esferas de vidro em seu interior, a qual tem função de servir como entrada dos reagentes, promover a pré-mistura dos gases e apagar a chama no caso de seu retorno. Na interface dessas carenagens metálicas é colocada uma malha metálica para evitar a saída das bolas de vidro e é posicionada a placa distribuidora. Essa placa distribuidora é cilíndrica e contém furos de 2 mm e espaçamento entre centros de 7 mm, tem como função direcionar e distribuir os gases no interior do conjunto cerâmico montado. Um parâmetro importante na confecção e montagem foi a concentricidade da matriz cerâmica no interior da estrutura cilíndrica, pois o erro de posicionamento pode afetar na resposta do fluxo de calor.

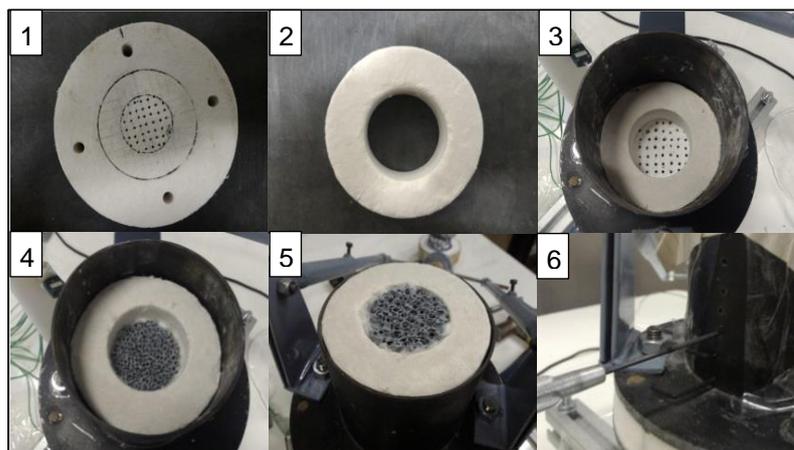


Figura 5.1 – Procedimento de construção e montagem do queimador poroso: 1) Corte e furação da placa distribuidora dos gases; 2) Corte e furação dos anéis isolantes; 3) Montagem de 1 e 2 na estrutura metálica; 4) Montagem das esponjas cerâmicas; 5) Finalização de montagem e preenchimento dos espaços vazios com manta isolante flexível; 6) Furação dos filtros cerâmicos para colocação dos termopares.

Foram desenvolvidos dois queimadores os quais são projetados com um empilhamento de quatro matrizes cerâmicas de carbeto de silício, sendo o primeiro queimador montado com esponjas cerâmicas com células de 10 ppi (média de poros por polegada linear), e o segundo queimador com 30 ppi. Ambas as cerâmicas possuem 50 mm de diâmetro e 22 mm de espessura e podem ser vistas na Figura 5.2.

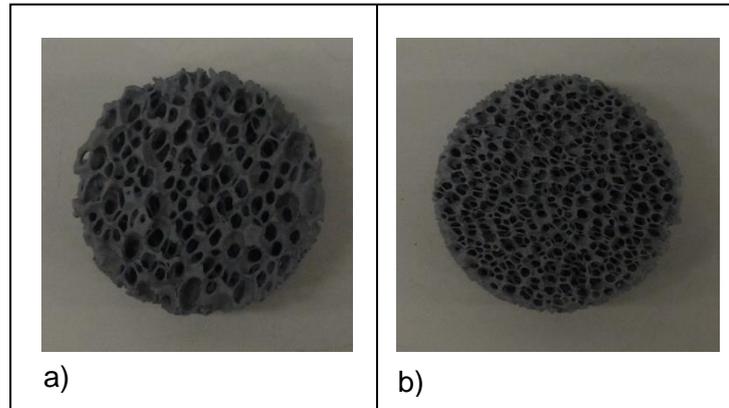


Figura 5.2 – Esponjas cerâmicas ensaiadas: a) Carbeto de silício de 10 ppi, b) Carbeto de silício de 30 ppi.

5.2. Dispositivo para medição do fluxo de calor

Para a medição do fluxo de calor emitido pela superfície do queimador poroso, foi projetado e construído um dispositivo onde é acoplado o transdutor de fluxo de calor radiativo. O mecanismo desenvolvido é montado na base flangeada do queimador, já aproveitando a linha média dos pontos de fixação com a carenagem cilíndrica, como pode ser visto na Figura 5.3 em seguida. Esse dispositivo permite a medição do fluxo de calor radiativo seguindo a coordenada polar de 0 a 180°. O suporte também tem capacidade de modificar o raio de varredura de 225 mm (mínimo) e 275 mm (máximo). Esse posicionamento radial pode ser definido em determinada posição, mais próximo ou mais afastado, evitando que ocorra o superaquecimento do sensor dadas as altas temperaturas.

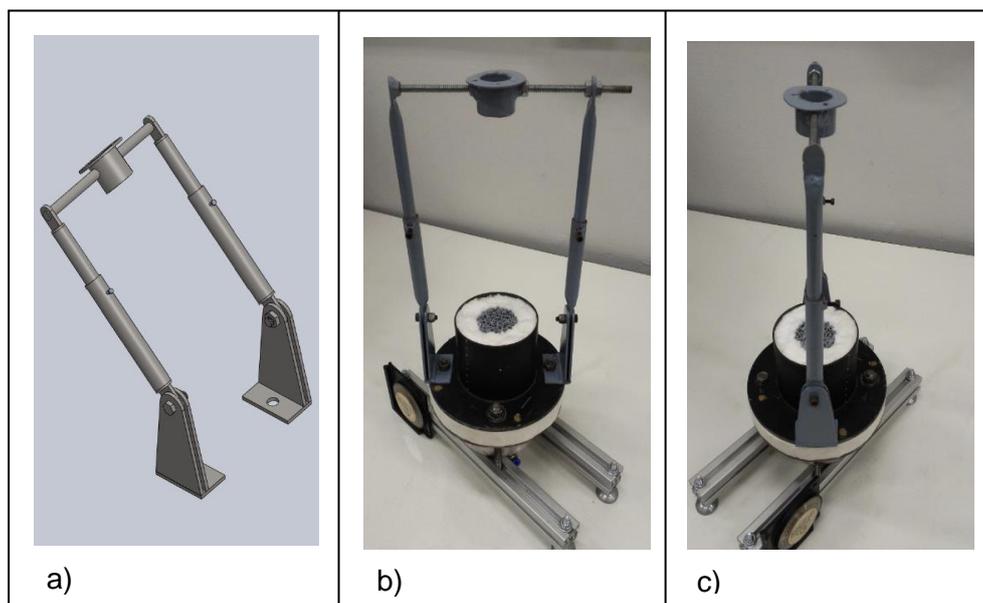


Figura 5.3 – Dispositivo para medição do fluxo de calor através do radiômetro: a) Projeto, b) Montagem em posição frontal, c) Montagem em posição lateral.

O radiômetro da marca Medtherm Corporation utilizado para a leitura do fluxo de calor é um dispositivo térmico que absorve esse fluxo na superfície do sensor e transfere para um dissipador de calor, que permanece a uma temperatura diferente do que a superfície do sensor. A diferença de temperatura é função do calor sendo transferido e do fluxo de calor sendo absorvido. O transdutor possui termopilhas para formar um circuito diferencial termoeletrico, proporcionando assim uma saída linear e diretamente proporcional à taxa de energia térmica que chega à superfície do sensor. O sensor também possui uma janela de safira para proteção da convecção. Essa janela possui um ângulo de visão de 150°, transmissão espectral de 0,85 para faixa de 0,15 a 5 μm e absorvidade de 0,94 para faixa de 0,6 a 15 μm . O queimador poroso emite na faixa do comprimento de onda da luz visível e do infravermelho. A garantia de estar medindo a maior parte da radiação térmica é em função dos parâmetros: temperatura na superfície medida, emissividade, a vazão e o fluxo radiante.

Para preservar e garantir a vida útil do radiômetro, e realizar uma leitura adequada sem interferência de leitura pelo aquecimento do sensor é necessário utilizar um banho ultra termostático que tende a manter o radiômetro em temperatura ambiente. A resposta do transdutor, com incerteza de medição de $\pm 3\%$, é dada em volt [V] e o fator de conversão é 8931000 [(W/m²)/V].

5.3. Bancada de ensaios

A combustão em matrizes cerâmicas inertes foi analisada experimentalmente em uma bancada de testes, conforme pode ser vista na Figura 5.4. A bancada desenvolvida é a integração do queimador poroso com os demais sistemas, que são compostos por - sistemas de alimentação de ar e combustível oriundos de vasos de pressão localizados na parte externa do laboratório, por medidores e controladores de vazão, sistemas de medição e controle de temperaturas e pressões, sistema de medição da radiação térmica e sistema de aquisição de dados.

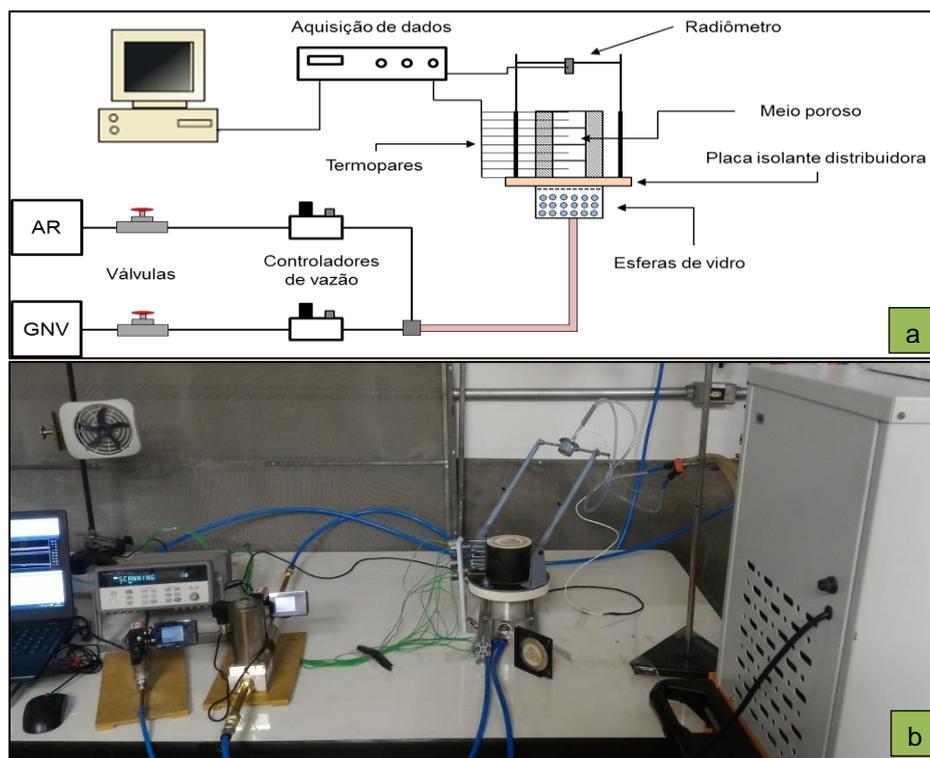


Figura 5.4 – a) Bancada experimental vista esquematicamente; b) Imagem da bancada durante o ensaio.

A bancada permite o controle independente das vazões de ar e combustível, a medição do fluxo de calor emitido pelo queimador poroso, medir a temperatura ao longo do queimador, acompanhar o deslocamento da frente de chama e permite observar a estabilização de chama através do perfil de temperatura da chama. Com o controle da vazão dos reagentes é possível queimar misturas em diferentes razões de equivalência e velocidades de chama, o que é essencial para encontrar a faixa de operação do queimador. A instrumentação do queimador é configurada por um conjunto de nove termopares do tipo R dispostos equidistantes ao longo do comprimento, iniciando na interface superior da placa distribuidora e finalizando no topo do queimador. Os termopares são posicionados no centro das esponjas cerâmicas para mapear o perfil de temperaturas e observar o deslocamento da frente de chama. Esses medidores ficam conectados em um sistema de aquisição de dados (*data logger*) e um notebook para plotagem instantânea dos dados. Da mesma maneira é realizado com o radiômetro para medição do fluxo de calor. A Tabela 5.1 especifica alguns componentes utilizados na bancada.

Tabela 5.1 – Principais componentes da bancada de experimentos

	Componente	Marca	Modelo
1	Controlador de Vazão de GNV	Bronkhorst	F-201CV-10K-AAD-22-V (10 L/min)
2	Controlador de Vazão de Ar	Bronkhorst	F-112AC-M10-AAD-55-V (150 L/min)
3	Radiômetro	Medtherm	Medtherm 64-5-20
4	Banho ultra termostático	Cienlab	-
5	Termopares	Omega	Tipo R (Pt / Pt-13%Rh)
6	Sistema de aquisição	Agilent	34972A

5.4. Procedimento experimental

Depois de finalizada a instrumentação da bancada de testes os ensaios foram iniciados. Primeiramente os controladores de vazões de ar e GNV são ajustados numa condição de operação próxima da estequiométrica e em seguida o queimador é ligado manualmente na parte superior a partir de uma ignição com isqueiro. A condição adotada foi uma relação de 20 L/min de ar e 2 L/min de GNV, equivalendo a uma velocidade de chama próxima de 20 cm/s e uma razão de equivalência de 0,9. A chama é vista externamente numa coloração azul, e a medida que a superfície do queimador vai aquecendo, a frente de chama vai se deslocando para dentro do meio poroso, fato que pode ser acompanhado pela leitura dos termopares instalados. No momento que o último termopar acusar uma temperatura próxima dos 1000°C as vazões são redefinidas para a razão de equivalência e velocidade de chama que se deseja operar, que neste caso foram duas razões de equivalência, (0,5 e 0,6) para cada queimador.

Para encontrar a faixa de estabilidade de chama do queimador poroso foi adotado um critério de estabilização de que não houvesse variações de temperatura maiores do que 15°C em todos os nove termopares instalados em um intervalo de 15 minutos. Diferentemente do critério descrito por Pereira (2002), que adotou variações de no máximo 5°C em 20 minutos. O critério adotado nesse estudo não foi tão rigoroso devido à dificuldade de estabilização de chama e do longo período para realização do ensaio. A partir de um primeiro ponto estável foram realizadas variações de 2 cm/s, tanto aumentando quanto diminuindo a velocidade de chama até mapear os limites superior e inferior de estabilidade. Esses limites de estabilidade foram definidos, sendo para o limite superior a chama se apresentar visivelmente fora do queimador ou ocorrer um decaimento lento e sucessivo dos termopares da base até o último termopar na superfície, o que caracteriza a chama sendo empurrada para fora do queimador. Já para o limite inferior de estabilidade os critérios são quando o termopar de segurança indicar

leitura acima de 1100°C ou quando para baixas vazões as temperaturas da matriz estiverem abaixo dos 1000°C e continuarem declinando ao longo do tempo, fenômeno contrário do esperado.

O mapeamento da faixa de operação do queimador foi iniciado com a matriz de carvão de silício de 10 ppi e com $\phi=0,6$ devido a menor dificuldade de estabilização de chama. Após varrido essa razão de equivalência, ajustou-se a combustão para $\phi=0,5$. Em seguida repetiu-se o procedimento, porém com matriz cerâmica de 30 ppi. Para a leitura do fluxo de calor o posicionamento do radiômetro é determinante para a aquisição de dados. O alinhamento do radiômetro a zênite deve ser concêntrico com as esponjas cerâmicas, as quais também devem estar concêntricas com a carcaça metálica, e as articulações dos braços telescópicos devem estar alinhadas na mesma cota da última cerâmica do empilhamento. Somente com o preciso posicionamento os dados podem ser adquiridos e validados. As medições com o sensor são iniciadas na posição de 15° com a horizontal (ângulo polar) e variando de 15 em 15° até chegar ao ângulo de 90°, totalizando seis medidas. A distância radial, que é à distância da articulação do braço telescópico até a janela do radiômetro, é de 250 mm. O procedimento é repetido para cada uma das diferentes porosidades, razões de equivalência e velocidade de chamas avaliadas. O cálculo do calor perdido por radiação é realizado, assumindo simetria azimutal, através da integração dos fluxos de calor radiativos medidos sobre uma calota esférica imaginária acima da superfície do queimador. Detalhes dessa integração são mostrados no Apêndice II de duas maneiras.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Carvão de silício com 10 ppi

A Figura 6.1 apresenta o diagrama de estabilidade para a matriz de carvão de silício com 10 ppi e razões de equivalência de (0,5 e 0,6), onde os pontos verdes representam os pontos estáveis e os pontos externos em vermelho são pontos de alta instabilidade de chama. Para os critérios assumidos, é possível verificar que, a faixa de estabilidade para a razão de equivalência de 0,6 é maior. Isso ocorre em função da mistura de ar e combustível não ser tão pobre quanto é em 0,5.

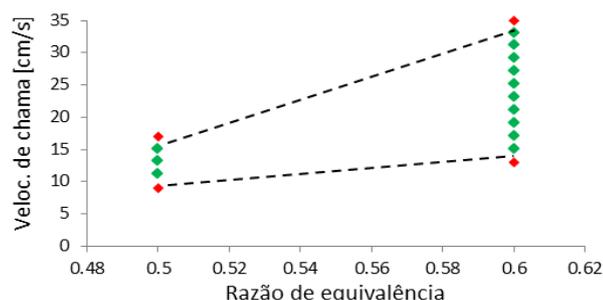


Figura 6.1 – Limites de estabilidade de chama para SiC de 10 ppi.

A Figura 6.2 abaixo mostra o mapeamento das temperaturas dos nove termopares dispostos equidistantes ao longo do comprimento do queimador, sendo que para cada razão de equivalência são mostradas as temperaturas para três velocidades, onde as linhas em azul e vermelho definem os limites superior e inferior de estabilidade respectivamente, já em verde representa um ponto central de estabilidade de chama. É possível verificar que o pico de temperatura ocorre normalmente próximo à região de 22 mm de comprimento do queimador. Com esse padrão é possível afirmar que a frente de chama é estabilizada nessa faixa e que a região que antecede é uma região de pré-aquecimento dos reagentes. Em ambos os gráficos é possível verificar uma queda maior da temperatura próximo a região de saída do queimador.

Esse decaimento mais acentuado acontece por uma perda de calor mais intensa em virtude da proximidade com a superfície do queimador. Para $\phi=0,6$ nota-se o deslocamento da chama dentro do queimador, já para 0,5 as medições não conseguiram capturar eventuais deslocamentos.

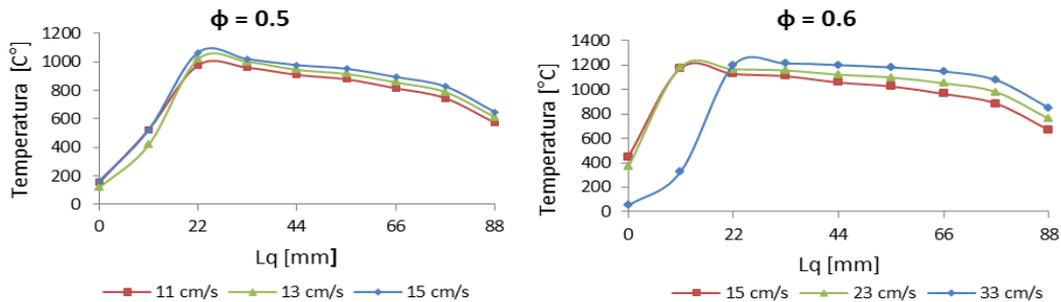


Figura 6.2 – Distribuição de temperaturas para três velocidades de chama testadas.

A variação do fluxo radiante em função do ângulo polar pode ser observada na Figura 6.3 para cada razão de equivalência testada. Nota-se que, à medida que o ângulo vai aumentando e se afastando da horizontal ocorre um aumento no fluxo de calor. Quando o radiômetro se aproxima de zênite, ou seja, no topo e apontando diretamente sobre a superfície plana do queimador a potência irradiada é ligeiramente mais acentuada. Esse fato ocorre porque, com a variação da posição do ângulo de medição, existe uma alteração no fator de forma para a radiação, fazendo com que o fluxo aumente para ângulos mais próximos de 90°.

Na figura abaixo também é possível verificar que para a razão de equivalência de 0,5 só existem duas curvas. Essa situação é em função da faixa de estabilidade ser muito estreita e, portanto, somente foram adquiridos dados de fluxo para o limite superior e um ponto central.

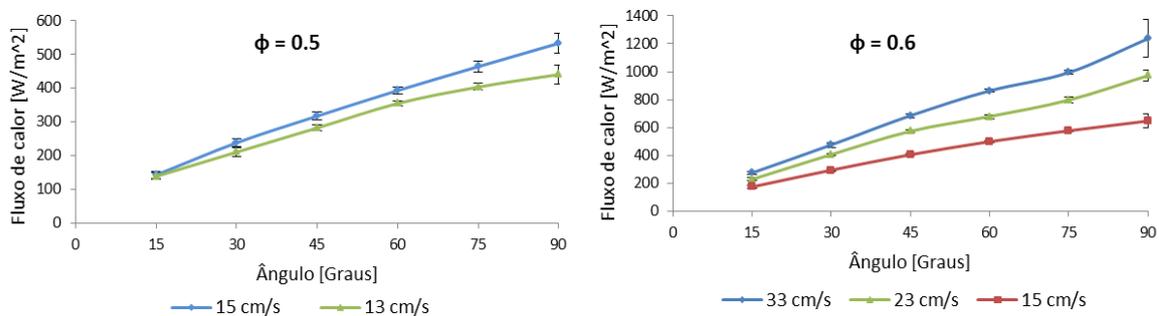


Figura 6.3 – Variação do fluxo de calor pelo ângulo de medição para SiC de 10 ppi.

A variação da eficiência de radiação para as razões de equivalência (0,5 e 0,6) em função das potências de chama dos pontos avaliados dentro do limite de estabilidade podem ser observados na Tabela 6.1 Com o aumento da potência de chama a eficiência de radiação diminui para ambos os casos.

Tabela 6.1 – Eficiência de radiação para diferentes condições de operação.

$\phi = 0.5$			$\phi = 0.6$		
u_{ch} [cm/s]	\dot{S}_r [kW]	η_{rad} [%]	u_{ch} [cm/s]	\dot{S}_r [kW]	η_{rad} [%]
13	0.43	21.02	15	0.59	21.11
15	0.50	20.14	23	0.90	18.91
			33	1.30	16.01

6.2. Carbetto de silício com 30 ppi

A Figura 6.4 apresenta o diagrama de estabilidade para a matriz de carbetto de silício com porosidade de 30 ppi e razões de equivalência de (0,5 e 0,6). Pelos mesmos critérios assumidos com a matriz de 10 ppi, é possível verificar que, a faixa de estabilidade para a razão de equivalência de 0,6 continua sendo maior do que para 0,5. Porém neste caso os limites de estabilidade para ambas as condições ficaram mais largas, o que permite uma faixa de operabilidade bem maior. Essa condição se deve ao menor tamanho dos poros. Poros menores (para uma mesma porosidade volumétrica) apresentam mais nervuras em sua matriz, levando a uma maior área de troca de calor entre sólido e gás, o que por sua vez aumenta a recirculação de calor induzida pela matriz porosa. Os limites superior e inferior para $\phi=0.5$ foram 27 e 9 cm/s respectivamente. Já para $\phi=0.6$ o limite superior foi de 57 cm/s e o inferior de 13 cm/s.

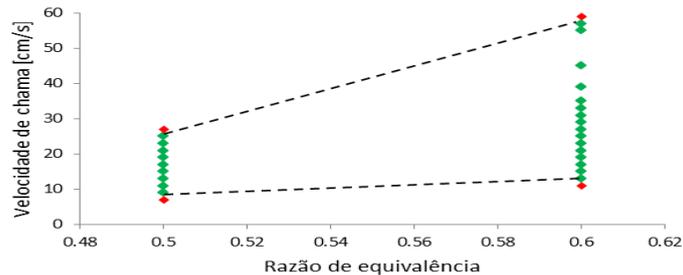


Figura 6.4 – Limites de estabilidade de chama para SiC de 30 ppi.

A distribuição das temperaturas ao longo do comprimento do queimador para as três velocidades escolhidas dentro de cada faixa de estabilidade podem ser vistas na Figura 6.5. Quando comparado com a Figura 6.2 é visível perceber as mesmas curvas características. No caso do limite superior, linha azul, as temperaturas dos dois primeiros termopares são menores devido ao limite de estabilidade da frente de chama. Se a velocidade for aumentada mais um pouco a frente de chama começa a se deslocar até a superfície do queimador, onde uma chama azul é propagada para fora do mesmo.

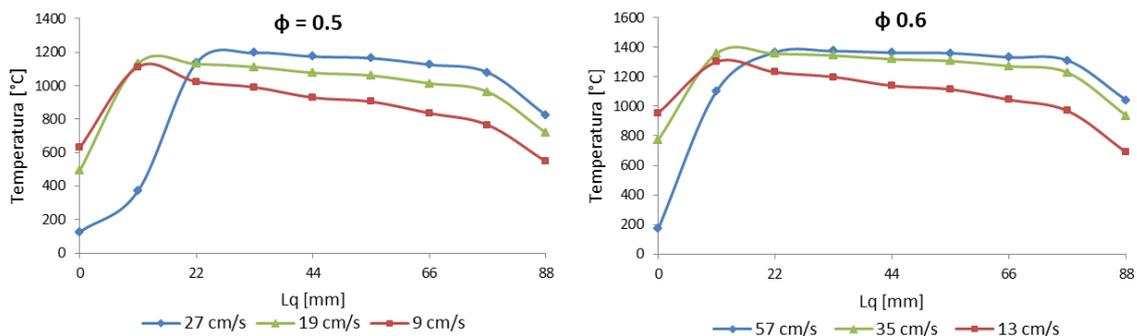


Figura 6.5 – Distribuição de temperaturas ao longo do queimador para ϕ (0,5 e 0,6) para as três velocidades de chama avaliadas.

O fluxo de calor medido nos ângulos atribuídos pode ser visualizado na Figura 6.6. O comportamento do fluxo radiativo é o mesmo que acontece no queimador com porosidade de 10 ppi, porém os fluxos emitidos para a matriz de 30 ppi são ligeiramente superiores. Em ambas as Figuras 6.3 e 6.6 a análise de dois desvios padrões para cima e para baixo dos valores lidos foram inseridos. Como praticamente todos os valores lidos ficaram muito próximos da média o desvio calculado foi pequeno, ficando assim praticamente imperceptível nas figuras. A exceção ocorreu no topo do queimador, em 90° , pois o resultado do fluxo de calor pode ter sido influenciado por uma parcela de calor convectivo.

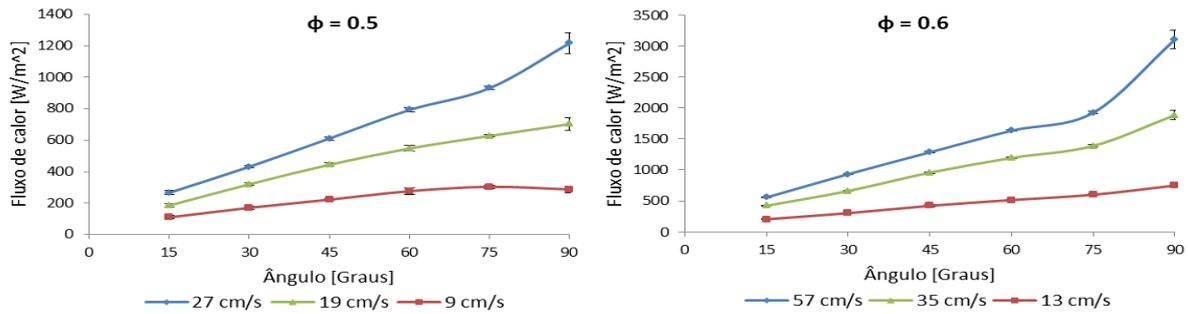


Figura 6.6 – Variação do fluxo de calor pelo ângulo de medição para SiC de 30 ppi.

Na Tabela 6.2, para a matriz de carvão de silício de 30 ppi são mostrados os resultados numéricos para as velocidades de chama utilizadas com suas respectivas potências de chama e eficiências de radiação. Onde a máxima eficiência foi de 26% e a mínima de 18% aproximadamente. O decaimento da eficiência de radiação com o aumento da potência de chama é o mesmo que na matriz de 10 ppi, entretanto nessa configuração as eficiências de radiação são maiores.

Tabela 6.2 – Eficiência de radiação para diferentes condições de operação.

$\phi = 0.5$			$\phi = 0.6$		
u_{ch} [cm/s]	\dot{S}_r [kW]	η_{rad} [%]	u_{ch} [cm/s]	\dot{S}_r [kW]	η_{rad} [%]
09	0.30	23.87	13	0.51	26.02
19	0.63	21.58	35	1.37	21.53
27	0.89	21.52	57	2.24	18.04

6.3. Comparação entre as matrizes de 10 e 30 ppi

A Figura 6.7 mostra a variação da eficiência de radiação em função da potência de chama do queimador para as duas estruturas de matriz cerâmica utilizadas. O decaimento da eficiência de radiação com o aumento da potência acontece em todas as situações avaliadas. Se traçado uma linha imaginária na vertical e fixando em alguma potência de chama entre 0,5 e 0,75 kW é possível verificar que para $\phi=0,6$ as eficiências são um pouco maiores. Logo podemos afirmar que ocorre um aumento na eficiência de radiação com o aumento das razões de equivalência. Quando analisado apenas uma razão de mistura e comparado as matrizes cerâmicas, foi percebida a influência da estrutura da matriz porosa, ou seja, a matriz com porosidade de 30 ppi resultou em índices de radiação superiores do que para as esponjas cerâmicas de 10 ppi. Outra diferença entre os materiais cerâmicos é a faixa de operabilidade do queimador ser maior quando utilizado poros menores.

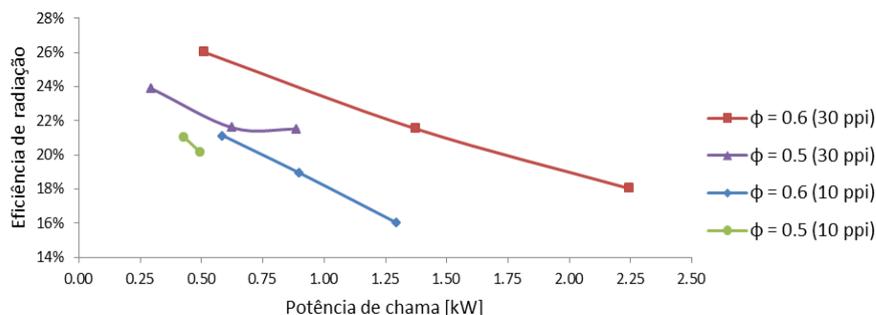


Figura 6.7 - Variação da eficiência de radiação em função da potência de chama para SiC de 10 e 30 ppi operado segundo as razões de equivalência de (0,5 e 0,6).

Na figura anterior, também foi percebido que em $\phi=0,5$ e 30 ppi (curva roxa) os dois pontos mais a direita praticamente ficaram na mesma cota, o que pode evidenciar um erro de leitura no ponto mais a direita devido à influência de um aumento de temperatura no sensor ocorrido na medição anterior.

7. CONCLUSÃO

A análise experimental executada em uma bancada de ensaios, que foi projetada e preparada para a realização da medição do fluxo de calor em um queimador poroso radiante, forneceu resultados satisfatórios para a eficiência de radiação.

Segundo os resultados obtidos, verificou-se que há uma influência razoável quanto à alteração estrutural da matriz de carbeto de silício, que compreendeu especificamente na alteração de poros por polegada linear. Para as esponjas cerâmicas com 30 ppi a estabilização de chama ocorreu com maior facilidade, proporcionando maiores faixas de operabilidade do queimador, inclusive desempenhando índices de eficiência de radiação superiores em relação à matriz de 10 ppi. Logo a porosidade dos materiais cerâmicos tem influência significativa na eficiência de radiação, de modo que, quanto mais e menores os poros, maior será a eficiência de radiação. Esse resultado se dá pela presença de mais área de troca de calor entre os poros e principalmente pela diferença de penetração ótica do material.

Também foi perceptível a mudança do comportamento do queimador quando alterado a razão de equivalência. De maneira que, para razões de equivalência 0,5 ou mais próxima de zero, a estabilidade ocorre com grande dificuldade, promovendo assim um encurtamento da distância entre os limites estáveis. Para a mesma potência de chama a eficiência de radiação é menor para $\phi=0.5$ em comparação com $\phi=0.6$.

Quando o queimador é operado no limite superior as velocidades de chama são as mais elevadas devido ao aumento das vazões dos gases, ar e GNV. Esse aumento é danoso para a eficiência de radiação, pois decrescem com o aumento da potência de chama que é influenciada pelo aumento das vazões.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdul, M.; Abdullah, M.; Abu Bakar, M.; Mohamad, A.; “**Applications of porous media combustion technology – A review**”, Applied Energy, p. 1365-1375, 2009.

Coelho, P., Costa, M.; “**Combustão**”, Edições Orion, 1ª Ed., 2007.

Gao, H.; Qu, Z.; Feng, X.; Tao, W., “**Methane/air premixed combustion in a two-layer porous burner with different foam materials**”, Fuel, p.154-161, 2013.

Gao, H.; Qu, Z.; Tao, W.; He, Y.; Zhou, J., “**Experimental Study of Biogas Combustion in a Two-Layer Packed Bed Burner**”, Energy and Fuels, p. 2887-2895, 2011.

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

Keramiotos, C., Founti, M. A., “**An experimental investigation of stability and operation of a biogas fueled porous burner**”, Fuel, p. 278-284, 2012.

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, UFSC, 2002.

Takeno, T.; Sato, K.; Hase, K., "**A theoretical study on an excess enthalpy flame**", Symposium on Combustion. p.465-472, 1981.

APÊNDICE I

Tabela I – A: Matriz de ensaios para carbetos de silício de 10 ppi. Onde u_{ch} é a velocidade de chama, \dot{V}_a é a vazão de ar, \dot{V}_c é a vazão de combustível e $\dot{V}_{c,cor}$ é a respectiva vazão de combustível corrigido.

ϕ	u_{ch} [cm/s]	\dot{V}_a [l/min]	\dot{V}_c [l/min]	$\dot{V}_{c,cor}$ [l/min]
0.5	11.00	12.36	0.60	0.63
	13.00	14.60	0.71	0.74
	15.00	16.85	0.82	0.86
0.6	15.00	16.69	0.98	1.02
	17.00	18.92	1.11	1.15
	19.00	21.14	1.24	1.29
	21.00	23.37	1.37	1.42
	23.00	25.60	1.50	1.56
	25.00	27.82	1.63	1.70
	27.00	30.05	1.76	1.83
	29.00	32.27	1.89	1.97
	31.00	34.50	2.02	2.10
	33.00	36.72	2.15	2.24

Tabela I – B: Matriz de ensaios para carbetos de silício de 30 ppi.

ϕ	u_{ch} [cm/s]	\dot{V}_a [l/min]	\dot{V}_c [l/min]	$\dot{V}_{c,cor}$ [l/min]
0.5	9.00	10.11	0.49	0.51
	11.00	12.36	0.60	0.63
	13.00	14.60	0.71	0.74
	15.00	16.85	0.82	0.86
	17.00	19.09	0.93	0.97
	19.00	21.34	1.04	1.08
	21.00	23.59	1.15	1.20
	23.00	25.83	1.26	1.31
	25.00	28.08	1.37	1.43
0.6	13.00	14.47	0.85	0.88
	15.00	16.69	0.98	1.02
	17.00	18.92	1.11	1.15
	19.00	21.14	1.24	1.29
	21.00	23.37	1.37	1.42
	23.00	25.60	1.50	1.56
	25.00	27.82	1.63	1.70
	27.00	30.05	1.76	1.83
	29.00	32.27	1.89	1.97
	30.00	33.39	1.96	2.04
	31.00	34.50	2.02	2.10
	33.00	36.72	2.15	2.24
	35.00	38.95	2.28	2.37
39.00	43.40	2.54	2.65	
45.00	50.08	2.94	3.05	
55.00	61.21	3.59	3.73	
57.00	63.43	3.72	3.87	

Foi necessário utilizar um fator de correção para o controlador de vazão de combustível devido ele ser padronizado para a utilização de metano, sendo que no presente trabalho foi utilizado GNV. A vazão de combustível corrigida é a razão da vazão de combustível calculada pelo fator 0,9618. A Tabela I – A e a Tabela I – B anteriormente mostram detalhadamente as combinações de mistura utilizadas para a matriz de carbeto de silício de 10 ppi e 30 ppi respectivamente.

APÊNDICE II

Para o cálculo da potência radiativa do queimador poroso, o fluxo de calor medido em alguma posição definida é multiplicado por uma parcela de área de uma calota esférica. Essa calota é dividida em seis áreas, as quais representam a região a ser multiplicada pelo fluxo de calor medido na posição atribuída. As Figuras II-1:A e 1:B ilustram detalhadamente essas parcelas de área.

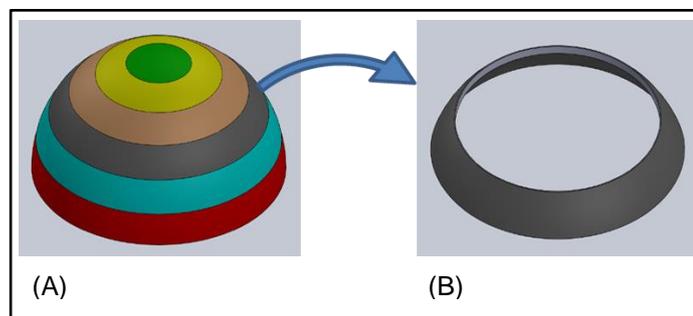


Figura II-1: (A) Calota hemisférica dividida em seis regiões, (B) Parcela de área ampliada da calota.

Primeiramente para definir essas parcelas da calota, foi necessário calcular as alturas h pela Equação II-1, que também pode ser vista simplificada na Figura II-2 para os ângulos de 45 e 60°. Com a altura h é calculada a área da parte superior da calota, acima dos ângulos, a partir da Equação II-2. Finalmente para encontrar a área de medição é necessário fazer uma subtração de áreas, por exemplo, a área acima do ângulo de 45° menos a área acima do ângulo de 60°.

$$h = r - r \cdot \text{sen}(\theta \cdot \pi / 180) \quad (\text{II-1})$$

$$A_{\text{calota}} = 2 \cdot \text{PI} \cdot r \cdot h(\theta) \quad (\text{II-2})$$

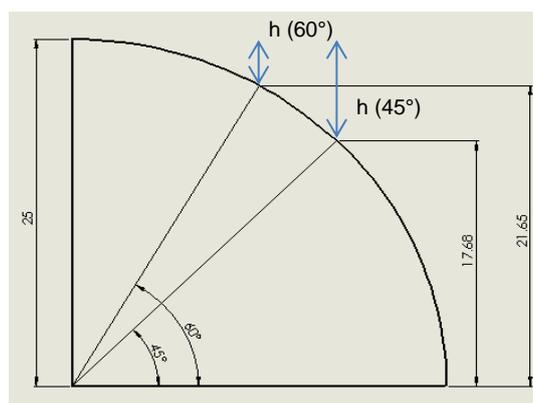


Figura II-2: Detalhamento para cálculo da altura h .

A Tabela II abaixo mostra os dados de todos os cálculos realizados, onde a coluna mais a direita da matriz representam as áreas de medição, que posteriormente são multiplicadas pelo fluxo de calor para cada ângulo medido. Para a potência radiativa total é realizado a soma das parcelas de potência radiante.

Tabela II – Matriz de dados das alturas e áreas de uma calota esférica de raio 25 cm.

r (cm)	ângulos	h (cm)	Área calota (cm ²)	Áreas de medição (cm ²)
25	0	25.00	3926.99	-
	7.5	21.74	3414.42	
	15	18.53	2910.61	1502.79
	22.5	15.43	2424.20	
	30	12.50	1963.50	887.81
	37.5	9.78	1536.39	
	45	7.32	1150.19	724.89
	52.5	5.17	811.50	
	60	3.35	526.12	512.58
	67.5	1.90	298.92	
	75	0.85	133.81	265.33
	82.5	0.21	33.60	
	90	0.00	0.00	33.60
			SOMA	3926.99

Outra maneira de realizar o cálculo da taxa de calor radiativa \dot{Q}_r é pela integração do fluxo de calor na área de uma calota esférica imaginária como pode ser verificado no desenvolvimento da Equação II-3

$$\dot{Q}_r = 2\pi R^2 \int_0^{\pi/2} q''_r(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (\text{II-3})$$

onde R é o raio da calota esférica e $q''_r(\theta)$ o fluxo de calor medido nos determinados ângulos. Conforme os resultados dos gráficos da Figura 6.3 e Figura 6.6 é possível assumir um polinômio de segunda ordem para o fluxo de calor medido, conforme pode ser visto na Equação II-4, onde a, b e c são constantes.

$$\dot{Q}_r = 2\pi R^2 \int_0^{\pi/2} (a + b\theta + c\theta^2) \cos(\theta) d\theta \quad (\text{II-4})$$

Resolvendo a integral chegamos à seguinte expressão, definida pela Equação II-5.

$$\dot{Q}_r = 2\pi R^2 \left[a + b \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) + c \left(\frac{\pi^2}{4} - 2 \right) \right] \quad (\text{II-5})$$

APÊNDICE III

A máxima incerteza de medição para a razão de equivalência e para a eficiência de radiação nas condições do experimento foi determinada pela metodologia de propagação dos erros de Kline-McClintock, a qual é definida pela Equação III-1:

$$u_r = \left(\left(\frac{\partial V}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial V}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right)^{1/2} \quad (\text{III-1})$$

onde u_r é a incerteza propagada, x_1 é uma variável dependente da grandeza V .

Abaixo segue as Equações III-2, 3 e 4 relativos ao erro associado à velocidade de chama - Equação 4.2, a razão de equivalência - Equação 4.3 e a eficiência de radiação - Equação 4.4.

$$\Delta u_{ch} = \left(\left(\frac{\partial u_{ch}}{\partial d_q} \Delta d_q \right)^2 + \left(\frac{\partial u_{ch}}{\partial \dot{V}_a} \Delta \dot{V}_a \right)^2 + \left(\frac{\partial u_{ch}}{\partial \dot{V}_c} \Delta \dot{V}_c \right)^2 \right)^{1/2} \quad (\text{III-2})$$

$$\Delta u_{\phi} = \left(\left(\frac{\partial \phi}{\partial \dot{V}_a} \Delta \dot{V}_a \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial \dot{V}_c} \Delta \dot{V}_c \right)^2 \right)^{1/2} \quad (\text{III-3})$$

$$\Delta \eta_{rad} = \left(\left(\frac{\partial \eta_{rad}}{\partial \dot{m}_c} \Delta \dot{m}_c \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{rad}}{\partial \dot{Q}_r} \Delta \dot{Q}_r \right)^2 \right)^{1/2} \quad (\text{III-4})$$

As Tabelas III-A, B e C mostram os dados relacionados para a estimativa dos erros associados às medições.

Tabela III-A: Dados de incerteza de medição da velocidade de chama.

u_{ch} [m/s]	d_q [m]	Δd_q [m]	$\frac{\partial u_{ch}}{\partial d_q}$	\dot{V}_a [m ³ /s]	$\Delta \dot{V}_a$ [m ³ /s]	$\frac{\partial u_{ch}}{\partial \dot{V}_a}$	\dot{V}_c [m ³ /s]	$\Delta \dot{V}_c$ [m ³ /s]	$\frac{\partial u_{ch}}{\partial \dot{V}_c}$	Δu_{ch} [m/s]	Δu_{ch} [%]
0.13	0.05	0.0025	-21.8	1.06E-03	7.79E-06	7.47E-03	1.47E-05	2.40E-07	5.38E-01	0.0546	5.46
0.57	0.05	0.0025	-6.2	2.41E-04	3.71E-06	3.28E-02	6.45E-05	4.89E-07	1.23E-01	0.0156	1.56

Tabela III-B: Dados de incerteza de medição para a razão de equivalência.

ϕ	\dot{V}_a [m ³ /s]	$\Delta \dot{V}_a$ [m ³ /s]	$\frac{\partial \phi}{\partial \dot{V}_a}$	\dot{V}_c [m ³ /s]	$\Delta \dot{V}_c$ [m ³ /s]	$\frac{\partial \phi}{\partial \dot{V}_c}$	$\Delta \phi$ [m/s]	$\Delta \phi$ [%]
0.6	1.06E-03	7.79E-06	-1.99E-22	1.47E-05	2.40E-07	9.04E+03	2.17E-03	0.217
0.6	2.41E-04	3.71E-06	-1.21E-25	6.45E-05	4.89E-07	3.98E+04	1.95E-02	1.945

Tabela III-C: Dados para estimativa da eficiência de radiação.

η_{rad} [%]	\dot{Q}_r [W]	$\Delta\dot{Q}_r$ [W]	$\frac{\partial\Delta\eta_{rad}}{\partial\dot{V}_c}$	\dot{V}_c [m ³ /s]	$\Delta\dot{V}_c$ [m ³ /s]	$\frac{\partial\Delta\eta_{rad}}{\partial\dot{Q}_r}$	$\Delta\eta_{rad}$	$\Delta\eta_{rad}$ [%]
26.02	132.71	3.98E-08	-1.77E+04	1.47E-05	7.79E-06	1.95E-03	2.65E-02	2.653
18.04	404.57	1.21E-07	-2.79E+03	6.45E-05	3.71E-06	4.44E-04	1.84E-02	1.839