

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

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA COMBUSTÃO DE BIOGÁS SINTÉTICO EM UM
QUEIMADOR POROSO RADIANTE

por

Leonardo Fernandes Ribeiro

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 2015.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA COMBUSTÃO DE BIOGÁS SINTÉTICO EM UM
QUEIMADOR POROSO RADIANTE

por

Leonardo Fernandes Ribeiro

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^a. Dr^a. 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^a. Dr^a Adriane Prisco Petry

Prof. Dr. Jorge R. S. Zabadal

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, Cleide Antonio Fernandes, Sônia Ramos Mai e Estefânia Pickler Fernandes pela educação a mim passada, pelo incentivo e suporte ao longo da graduação. Agradeço em especial ao meu tio, Claudio Antonio Fernandes, pelo constante incentivo ao estudo, investimentos na minha educação e os inúmeros exemplos de dedicação e força de vontade.

Agradeço ao professor orientador, Fernando Marcelo Pereira, pelo constante apoio no desenvolvimento deste trabalho, esclarecimentos teóricos e técnicos e por compartilhar sua vasta experiência na área, tanto neste trabalho, como nas disciplinas em que fui seu aluno.

Agradeço aos meus colegas e amigos da engenharia pelos mais variados momentos vividos ao longo do curso. Em especial, deixo meu agradecimento aos amigos Frederico Scheinpflug Blanco, Matias Seyboth, Marcelo Tapparello, Bruno Destefani, Breno Strüssman Junior, Henrique Candia, Erik Radke, Octávio Bortoncello, George Zanetti, Eduardo Schmidt, Guilherme Araujo, Guilherme Gallon, João Júnior Lopês, Otávio de Oliveira, Bruno Zart, Marcéu Heinzmann, André Stefenon, Bárbara Schaefer e Lisandro Maders pelos diversos momentos de suporte, estudos, trabalhos e lazer.

Estendo também, meus agradecimentos ao corpo técnico do Laboratório de Combustão (LC) por permitir e auxiliar na realização dos experimentos desse trabalho. Em especial, agradeço aos amigos Rafael Quines, Órion Costa, Thiago Gardin Fernandes e Luis Quezada pelo acompanhamento e esclarecimentos teóricos e técnicos.

Por fim, agradeço ao corpo docente da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Em especial, agradeço aos professores que compõem a banca examinadora do presente trabalho, pela leitura, sugestões e contribuições.

RIBEIRO, L. F. **Análise experimental da combustão de biogás sintético em um queimador poroso radiante.** 2015. 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Algumas composições do biogás contêm altos teores de compostos inertes, sendo sua queima somente possível com a adição de combustíveis suplementares. As vantagens trazidas pelo uso de queimadores porosos permitem a queima de combustíveis de baixo poder calorífico, como o biogás. Esse trabalho apresenta o desenvolvimento e resultados de uma série de experimentos conduzidos em laboratório, buscando caracterizar e comparar parâmetros operacionais da combustão de gás natural e biogás sintético (composto por gás natural e dióxido de carbono) em um queimador poroso com uma matriz de carvão de silício. Esse queimador foi adaptado de um já existente, sendo trocado o material de sua matriz porosa com o intuito de comparar os resultados com estudos similares. A bancada onde os experimentos foram realizados contava com o queimador instrumentado com termopares tipo R e linhas de ar comprimido, gás natural e dióxido de carbono (CO₂) com controladores independentes de vazão. Os resultados foram satisfatórios, denotando um adequado projeto do queimador testado e estabelecendo uma ampla faixa de operação em baixas razões de equivalência e velocidades. As razões entre potências máxima e mínima de chama foram de 12,5 para gás natural e de 9,5 para a composição de biogás testada.

PALAVRAS-CHAVE: biogás, queimador poroso, combustão.

RIBEIRO, L. F. **Experimental analysis of synthetic biogas combustion in a porous media burner.** 2015. 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

Some biogas compositions may have high contents of inert gases, fact that requires addition of high calorific fuels for stable burning. The advantages of using porous burners allow low calorific fuels combustion, such as biogas. The present work shows the development and results of laboratorial experiments aiming to characterize and compare operational combustion parameters of natural gas and synthetic biogas (formed by natural gas and carbon dioxide) in a silicon carbide matrix porous burner. This burner was adapted from a previous one, being its matrix material substituted in order to compare with similar studies. The test rig was formed by the burner with thermocouples inserted on its matrix and independent flow control valves for the three gases: air; natural gas; and carbon dioxide (CO₂). The results were satisfactory, denoting a competent burner design and establishing a wide range of operability in low equivalence ratio and low speed. The ratio between maximum and minimum flame power registered were 12.5 for the experiments involving pure natural gas and 9.5 for the experiments involving the CO₂ dilution tested.

KEYWORDS: biogas, porous burner, combustion.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.1	Objetivos	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	Modelo de Reação de Combustão.....	2
2.2	Propriedades de Chamas	2
2.3	Combustão em Meios Porosos.....	3
2.4	Materiais	4
2.5	Eficiência de Radiação	4
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.	METÓDO.....	8
4.1	Bancada de Testes.....	8
4.2	Procedimento de Teste.....	9
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
5.1	Distribuição de Temperaturas.....	10
5.2	Limites de Estabilidade.....	11
5.3	Eficiência de Radiação	13
5.4	Incertezas.....	13
6.	CONCLUSÕES	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
	APÊNDICE I.....	I
	APÊNDICE II.....	II
	APÊNDICE III.....	III

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O estudo da combustão em meios porosos inertes vem sendo desenvolvido há pouco mais de três décadas (Takeno e Sato, 1979). O conceito concentra-se em confinar a chama dentro de uma matriz porosa inerte. Numa reação de combustão genérica, há liberação de energia pela oxidação de um combustível. Por consequência, há um aumento da temperatura dos produtos. Quando a combustão ocorre dentro de uma matriz porosa inerte, esse meio sólido é aquecido e transfere calor nos dois sentidos: a favor do escoamento; e no sentido contrário ao escoamento, que é o chamado calor de recirculação. A existência desse calor, junto do aquecimento do meio sólido, garantem vantagens como: maior temperatura de chama, devido ao pré-aquecimento dos reagentes; maior velocidade de queima no regime laminar, devido à temperatura de chama ser maior; maior eficiência de reação – ou de queima – também por conta da temperatura de chama mais elevada; maior faixa de estabilidade, sendo comum queimadores com razões entre potência de chama máxima e mínima na ordem de 20; ampliação da faixa de inflamabilidade; e maior eficiência na troca de calor por radiação, em virtude do aquecimento do corpo sólido.

O biogás é o produto gasoso da decomposição de matéria orgânica. Sua composição, apesar de contar com diversos compostos e em variadas proporções, pode ser delimitada – para fins de modelamento experimental – a uma mistura de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Como o CO_2 é um gás inerte, quanto maior o seu teor na composição do biogás, menor é o poder calorífico desse combustível. A redução do poder calorífico resulta em chamas de menor temperatura, menos estáveis e mais sujeitas a extinções locais, com consequente aumento das emissões de CO. Muitas vezes, para elevados teores de CO_2 , a queima do biogás somente é possível com o uso de combustíveis suplementares, requerendo maior controle do processo de combustão e, por consequência, o uso de plantas mais complexas, o que pode ser inviável para algumas aplicações. A ampliação dos limites de inflamabilidade decorrente da inserção da matriz porosa na chama possibilita a queima estável de combustíveis de baixo poder calorífico. Por isso, a combustão do biogás em queimadores porosos é uma solução tecnológica promissora.

A combustão de biogás sintético em queimadores porosos pode ser considerada um assunto recente para a comunidade científica, apesar de vários outros trabalhos já terem estudado a queima de combustíveis sintéticos diversos, muitas vezes contendo CH_4 e CO_2 , como fez Francisco et al. (2013). Entretanto, não é frequente o uso do termo biogás como referência. Gao et al. (2011) conduziram experimentos envolvendo CH_4 puro e quatro diluições (25, 30, 35 e 40%) de CO_2 em CH_4 . O queimador desenvolvido para essa série de testes contava com um empilhamento de uma matriz porosa de alumina sob duas camadas de esferas também de alumina, porém de diâmetros diferentes. Keramiotos e Founti (2012) conduziram experimentos envolvendo uma única diluição de biogás sintético (60% de CH_4 e 40% de CO_2). O queimador desenvolvido para esses experimentos possui geometria retangular e conta com um empilhamento de uma placa perfurada de alumina a montante de uma matriz porosa de carbetto de silício.

1.2 Objetivos

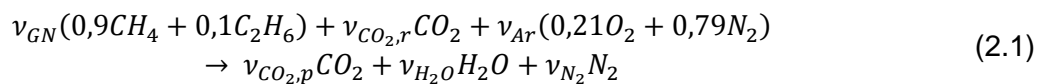
Caracterizar experimentalmente a operação de um queimador poroso radiante de carbetto de silício na queima de biogás sintético. Para tanto, os objetivos específicos se concentram em:

- 1) Construir um queimador poroso de esponjas cerâmicas;
- 2) Construir e instrumentar uma bancada de testes para esse queimador poroso;
- 3) Estabelecer os limites de estabilidade de chama e estimar a eficiência de radiação para queima de gás natural (GN) puro e diluído com 20% de CO_2 nesse queimador poroso;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Modelo de Reação de Combustão

O modelo de reação de combustão adotado para esse trabalho simplifica a composição de GN para 90% de CH₄ (metano) e 10% de C₂H₆ (etano) e considera combustão completa. O modelo também desconsidera reações de dissociação, uma vez que não foram avaliadas emissões de poluentes. O ar foi modelado como uma composição de 21% de O₂ e 79% de N₂. Portanto, a reação global – na forma estequiométrica, isto é, sem excesso de ar – conta com os seguintes compostos: CH₄, C₂H₆, CO₂, O₂ e N₂ nos reagentes; e CO₂, H₂O e N₂ nos produtos. A Equação 2.1 representa o modelo adotado, na forma estequiométrica, para definição de vazões nos experimentos e posterior estimativa de eficiência de radiação.



Onde os termos v_{GN} e $v_{CO_2,r}$ representam o teor de GN e CO₂ no combustível, sendo a soma dos dois igual a 1, pois a reação é representada por mol de combustível. O termo v_{Ar} representa a quantidade (em mols) de ar na reação. $v_{CO_2,p}$, v_{H_2O} e v_{N_2} representam a quantidade (também em mols) de CO₂, H₂O e N₂ nos produtos da reação, respectivamente. A Tabela 2.1 mostra a quantidade de ar para reações estequiométricas de GN puro ($v_{GN} = 1$ e $v_{CO_2,r} = 0$) e uma diluição de 20% de CO₂ ($v_{GN} = 0,8$ e $v_{CO_2,r} = 0,2$).

Tabela 2.1 – Quantidade de ar (mols) para reações estequiométricas.

Combustível	v_{GN}	$v_{CO_2,r}$	v_{Ar}
GN Puro	1.00	0.00	10.23
GN/CO ₂	0.80	0.20	8.19

2.2 Propriedades de chamas

A razão de equivalência é um número inteiro positivo que relaciona a quantidade de oxidante fornecida à chama com a quantidade de oxidante em uma queima estequiométrica. A Equação 2.2 mostra como calculá-la.

$$\phi = \frac{v_{Ar}}{a} \quad (2.2)$$

Onde ϕ é a razão de equivalência, v_{Ar} é a quantidade de ar (mols) para queima estequiométrica de um mol de combustível e a é a quantidade de ar empregada na queima, em mols, por mol de combustível. Se a queima for estequiométrica, a razão de equivalência tem valor um. Havendo excesso de ar, ela é menor que um, e com excesso de combustível maior que um. O oposto da razão de equivalência é chamado de coeficiente de excesso de ar e representado por λ .

Um parâmetro utilizado para estudo de regimes de combustão é a potência de chama, que é calculada através da Equação 2.3.

$$\dot{S}_r = \dot{m}_{comb} PCI_{comb} \quad (2.3)$$

Onde \dot{m}_{comb} é a vazão mássica de combustível, em kg/s, e PCI_{comb} é o poder calorífico inferior do combustível, em kJ/kg, sendo a unidade da potência de chama, \dot{S}_r , geralmente expressa em kW. Quando se deseja realizar comparações entre queimadores, a potência de chama deve ser parametrizada pela a área do queimador. Sendo esse novo parâmetro, portanto, chamado de potência específica de chama e expresso pelo símbolo \dot{S}_r'' , em kW/m².

2.3 Combustão em Meios Porosos

O pré-aquecimento dos reagentes em combustão garante diversas vantagens que refletem num aumento da eficiência térmica global de um determinado processo ou sistema térmico. Esse pré-aquecimento pode ser obtido diretamente dos produtos, como é feito em diversas unidades geradoras de vapor, onde o ar primário é pré-aquecido pelos produtos gasosos da combustão. Tratando-se de queimadores porosos radiantes, a continuidade da matriz garante trocas térmicas entre as regiões a montante (fria) e a jusante (quente) da frente de chama. Esse calor proveniente da recirculação faz com que os gases da combustão excedam o limite termodinâmico, por isso o termo “combustão com excesso de entalpia”. Tal fato pode ser verificado – assistido de instrumentação – com a distribuição de temperaturas ao longo da chama chegando a valores acima da temperatura de chama adiabática. Em virtude disso, esse fenômeno também é chamado de combustão “superadiabática”. Hardesty e Weinberg (1974) publicaram um dos primeiros trabalhos a abordarem esse assunto. A Figura 2.1 mostra um desenho esquemático do processo de recirculação de calor unidirecional em um queimador poroso.

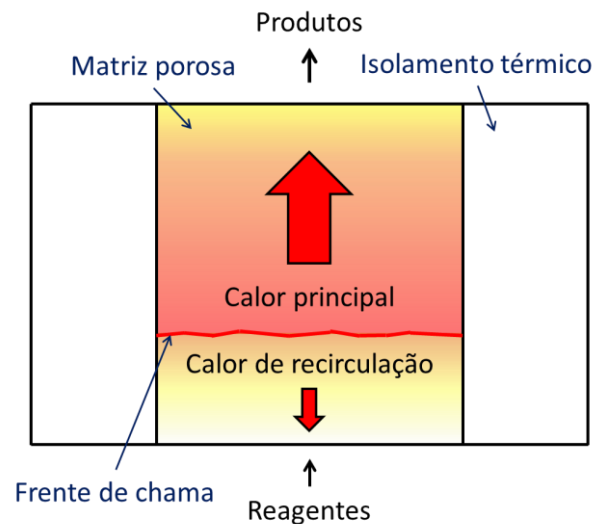


Figura 2.1 – Desenho esquemático do processo de recirculação de calor unidirecional em um queimador poroso.

A Figura 2.2 mostra um gráfico comparativo da entalpia dos gases ao longo da combustão, para queimadores com chama livre e meios porosos.

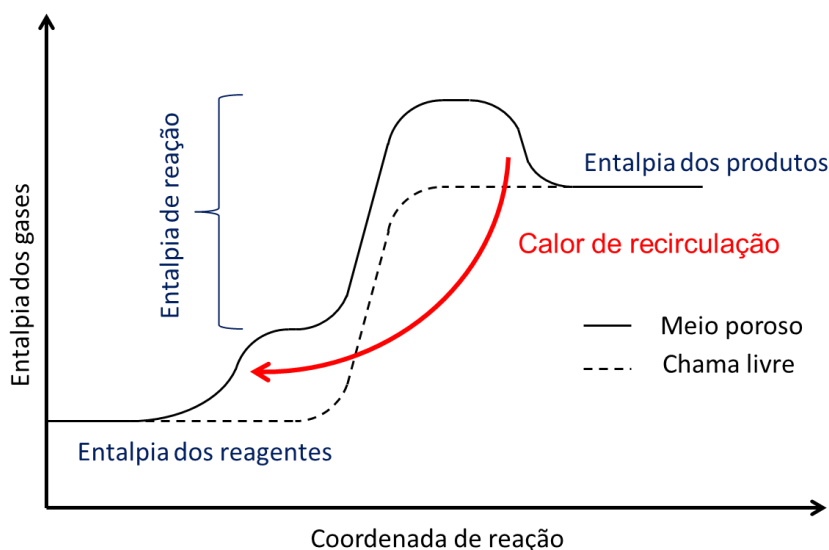


Figura 2.2 – Gráfico da entalpia sensível ao longo da reação para queimadores de chama livre e porosos.

A partir da Figura 2.2, é possível notar que a entalpia de reação é a mesma para ambos os casos, havendo apenas saltos a montante e a jusante da reação devido ao calor de recirculação trocado com o meio sólido.

2.4 Materiais

Os materiais mais indicados para essa aplicação, segundo Möbauer et al. (1999), são: esponjas cerâmicas de SiC, ZrO₂ ou C/SiC; estruturas a base de fibras de Al₂O₃; e malhas metálicas de ferro-cromo-alumínio ou aços a base de níquel. Os metais apresentam ótima resistência mecânica, ótima resistência a choques térmicos, alta condutividade térmica, porém baixa temperatura de fusão, 900 a 1300°C, comparados aos cerâmicos, nos quais alguns podem operar em temperaturas acima de 1600°C. Buscando agregar as propriedades e características de ambos, também podem ser empregados, em queimadores porosos, corpos híbridos destes materiais.

O material escolhido para ser empregado na matriz porosa do queimador projetado foi o SiC (carbeto de silício), que, segundo Möbauer et al. (1999), pode operar até 1300°C, possui alta condutividade térmica – de 20 W/mK a 1000°C até 150 W/mK a 20°C –, alta resistência a choques térmicos e emissividade entre 0,8 e 0,9 a 2000 K. No entanto, as propriedades definitivas do meio poroso são desconhecidas, sendo a estimativa adotada uma média ponderada entre as propriedades da matriz sólida e as propriedades dos gases (produtos) que a preenchem. Essa ponderação é feita baseada na porosidade da matriz sólida. A porosidade é definida como um adimensional calculado a partir da razão entre o volume dos poros de um sólido poroso e volume total do corpo na ausência de poros, que para a matriz sólida selecionada é de 85%. A densidade linear de poros, que é o número de poros presentes numa dada escala linear de comprimento, é de 10 ppi (poros por polegada) para a matriz selecionada.

2.5 Eficiência de radiação

Pensando no aquecimento de corpos ou superfícies a partir de uma chama, o mecanismo de troca térmica radiante tende a ser mais eficiente, principalmente em baixas vazões, que o de troca térmica convectiva. Isso se deve a fatores como: o mecanismo de troca de calor

radiante independe do contato direto dos gases da combustão com o corpo ou a superfície a ser aquecida; o mecanismo de troca de calor convectivo depende da velocidade com que os gases passam pela superfície; a velocidade desses gases é proporcional ao consumo de combustível. Desta forma, é preferível a predominância desse mecanismo de troca térmica para aplicações com aquecimento a partir de chama.

A eficiência de radiação é um adimensional que relaciona o quanto de calor radiante está sendo emitido pela superfície do queimador com a potência de chama. A Equação 2.4 mostra como a eficiência de radiação é estimada.

$$\eta_{rad} = \frac{\sigma A_q \varepsilon_{ef} (T_{sup}^4 - T_{\infty}^4)}{\dot{S}_r} \quad (2.4)$$

Onde η_{rad} é a eficiência de radiação, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, A_q é a área da superfície do queimador, ε_{ef} é a emissividade efetiva da superfície da matriz porosa – que é estimada como uma média ponderada entre a emissividade de um corpo negro (poros) e a emissividade do material –, T_{sup} é a temperatura na superfície da matriz porosa, T_{∞} é a temperatura do ar na sala de testes, \dot{S}_r é a potência de chama. Os dados de poder calorífico inferior, densidade sob Condições Normais de Temperatura e Pressão assumidos para cada composto e elemento químico utilizado nesse modelo foram extraídos das tabelas dos apêndices de Coelho e Costa (2012).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Gao et al. (2011) desenvolveram um queimador de 50 mm de diâmetro, o qual possuía uma camada inicial de 30 mm de espessura de uma matriz porosa de Al_2O_3 com 60 ppi de densidade linear de poros, seguida de duas camadas subsequentes (50 mm cada) de esferas de Al_2O_3 , de 3 e 8 mm de diâmetro, respectivamente. A porosidade do empacotamento randômico de esferas da camada superior foi estimada pelos autores em 40%. A Figura 3.1 mostra um desenho da montagem do queimador.

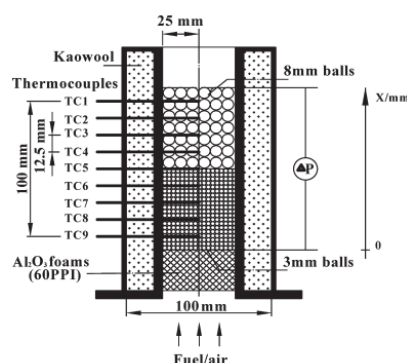


Figura 3.1 – Montagem do queimador utilizado para os experimentos (Gao et al., 2011).

O mapeamento das temperaturas foi feito no centro do queimador com termopares tipo B. Os resultados desse experimento deram base para uma série de conclusões: 1) as razões de equivalência e velocidades de mistura para obtenção de chamas estáveis decaíram com o aumento da diluição de CO_2 , segundo o autor, isso ocorreu devido à redução da disponibilidade de combustível e, portanto, redução da velocidade de chama (S_L); 2) o aumento no conteúdo de CO_2 da mistura produziu uma redução na eficiência de radiação. A Figura 3.2 apresenta os

resultados de estabilidade de chama obtidos para experimentos com metano puro e diluição de 25% de CO₂ realizados por Gao et al. (2011).

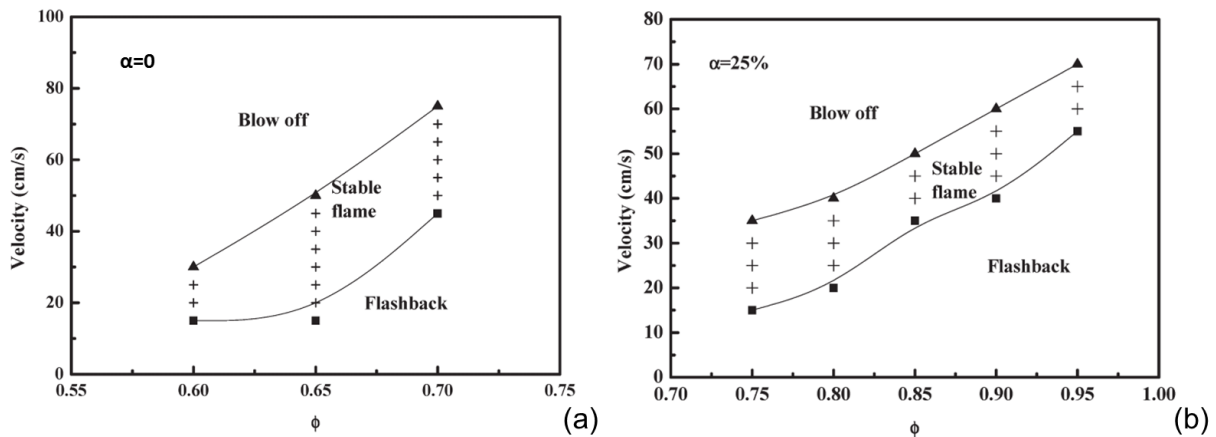


Figura 3.2 – Limites de estabilidade para o experimento com misturas de CH₄. Resultados para metano puro em (a); para diluição de 25% de CO₂ em (b). Adaptado de Gao et al., 2011.

Os gráficos presentes na Figura 3.2 apontam a primeira conclusão dos autores. É possível visualizar que as faixas de chama estável se reduziram com o aumento da diluição de CO₂, de modo que o queimador tenha que operar cada vez mais próximo da razão estequiométrica ($\phi = 1$). As relações entre potências específicas de chama máximas e mínimas para os casos dos gráficos da Figura 3.2, para metano puro e diluição de 25% de CO₂, foram de 5 e 6, respectivamente.

A Figura 3.3 apresenta os resultados de eficiência de radiação para todas as diluições testadas por Gao et al. (2011).

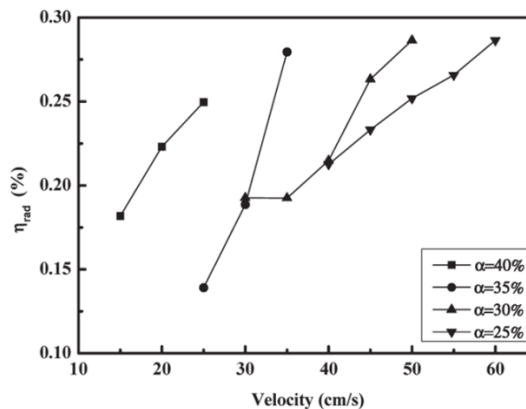


Figura 3.3 – Eficiência de radiação em função da velocidade para todas as diluições testadas. Adaptado de Gao et al., 2011.

O gráfico da Figura 3.3 dá suporte à segunda conclusão dos autores. Esse efeito, do aumento da eficiência de radiação com o aumento da velocidade, pode ser resultante de uma perda de calor excessiva para as paredes laterais do queimador em baixas vazões, devido à altura do queimador ter dimensão maior que cinco vezes o seu diâmetro, fazendo com que a superfície superior seja pouco aquecida nessas baixas vazões.

Keramiotos e Founti (2012) utilizaram um queimador construído em geometria retangular de 185 mm por 135 mm, e montado a partir do empilhamento de uma placa perfurada de Al₂O₃,

chama de *flametrapp*, de 20 mm de altura e uma camada de matriz porosa de SiSiC com 15 mm de altura e 10 ppi de densidade linear de poros. A Figura 3.4 mostra o referido queimador.

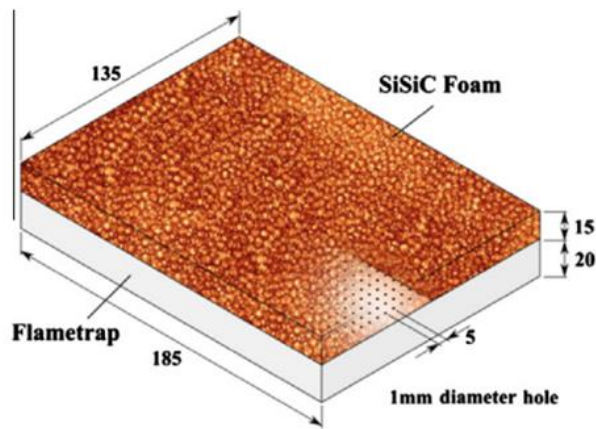


Figura 3.4 – Queimador desenvolvido para os testes. Adaptado de Keramiotos e Founti, 2012.

O mapeamento das temperaturas foi feito com termopares tipo S e uma câmera de infravermelho. Relataram que o queimador operou para potências específicas de chama de 200 a 1000 kW/m². Suas conclusões tiveram enfoque nas questões de emissões de poluentes, mapeando os limites de estabilidade de chama com o intuito de estabelecer alguma relação direta com as emissões de CO. Não fora avaliada a eficiência de radiação. A Figura 3.5 mostra um gráfico do mapeamento dos limites de estabilidade (através da potência de chama em função do coeficiente de excesso de ar - λ) com as emissões de CO (monóxido de carbono) em escala de cores.

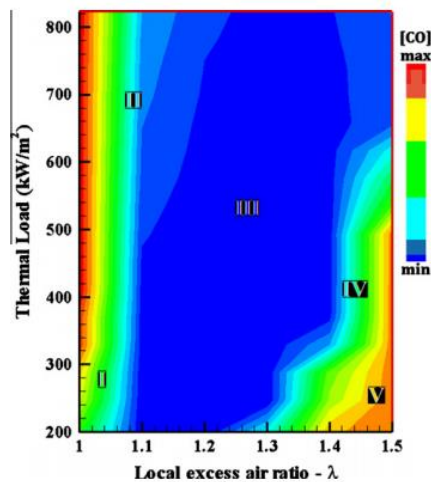


Figura 3.5 – Limites de estabilidade e respectiva quantidade emitida de CO. Em azul, regiões estáveis com baixa emissão de CO; em verde, regiões estáveis com maiores emissões do poluente; e em vermelho, regiões instáveis e com elevado teor de CO emitido. Adaptado de Keramiotos e Founti, 2012.

4. MÉTODO

4.1. Bancada de Testes

Detalhes do queimador (como desenho de montagem e padrão de furação da placa perfurada) podem ser vistos no Apêndice I. A Figura 4.1 mostra: (a) uma vista isométrica em seção do desenho de montagem do queimador; e (b) uma foto do queimador instrumentado com os termopares.

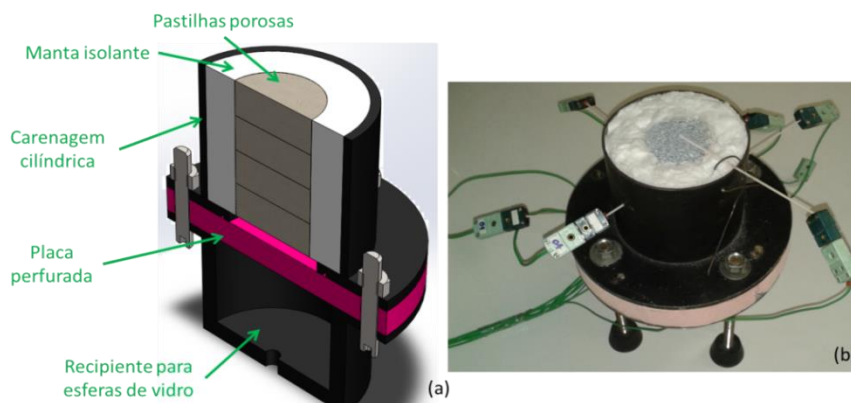


Figura 4.1 – (a) montagem do queimador desenvolvido para os experimentos; (b) foto do queimador instrumentado com os termopares.

O queimador desenvolvido para este trabalho é adaptado de um queimador já existente no laboratório. Foi substituído um empilhamento de quatro pastilhas porosas de alumina (Al_2O_3) por um empilhamento de quatro pastilhas porosas de carbeto de silício (SiC), todas de 50 mm de diâmetro, 22 mm de altura, porosidade de 85% e densidade linear de poros de 10 ppi. Essa substituição no material da matriz porosa foi feita com o objetivo de estabelecer uma comparação com os estudos da revisão bibliográfica. O queimador estudado por Gao et al. (2011) tem geometria semelhante à do queimador desenvolvido neste trabalho, porém sua matriz porosa é de Al_2O_3 . Já o queimador desenvolvido por Keramiotos e Founti (2012) tem matriz porosa de SiC , porém geometria retangular.

As pastilhas porosas são envolvidas concêntricamente por uma manta isolante a base de alumina. Uma caretagem cilíndrica metálica envolve essa manta. Abaixo desse empilhamento (a montante no escoamento) e concêntrico com a caretagem, é posicionada uma placa cilíndrica de Al_2O_3 . Essa placa possui furos de 2 mm – dimensão que satisfaz o diâmetro de *quenching*, segundo Turns (2010), para chamas de metano puro – onde escoam os reagentes antes de chegar à matriz porosa. Abaixo da placa cilíndrica, há um recipiente com esferas de vidro envolto também numa caretagem cilíndrica metálica. Essas esferas de vidro servem para apagar a chama em caso de retorno. Ao fundo desse recipiente, há uma conexão hidráulica para receber os reagentes separadamente. As duas caretagens são unidas por uma união parafusada passante pela placa cilíndrica. A Figura 4.2 mostra: (a) um desenho esquemático da bancada, indicando os principais componentes; (b) uma foto da bancada durante um experimento.

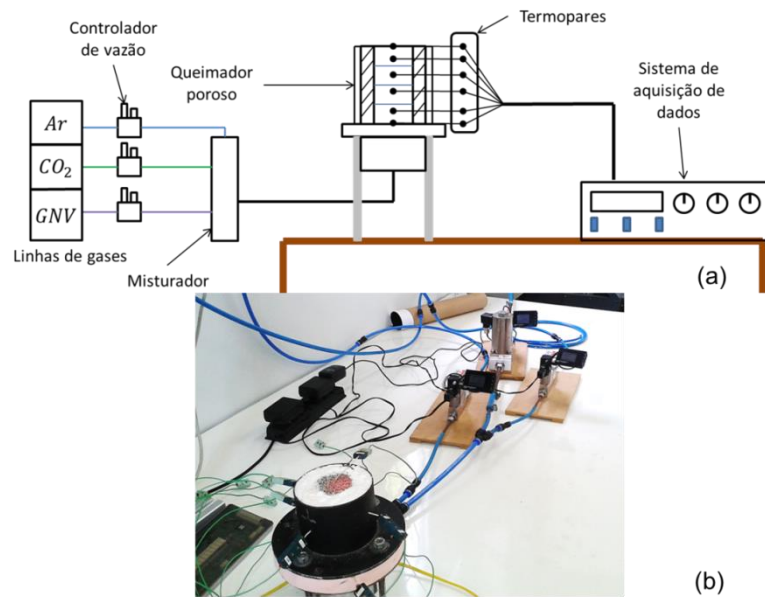


Figura 4.2 – (a) desenho esquemático da bancada de testes; (b) foto da bancada durante experimento.

A bancada tem suprimento contínuo de: ar comprimido, o qual é provido por um compressor alternativo; CO_2 (dióxido de carbono); e GN (gás natural veicular), que são ambos providos por vasos pressurizados. A bancada possui controladores de vazão independentes, ou seja, um controlador para cada um destes gases, o que possibilita queimar misturas em diferentes velocidades e razões de equivalência. A instrumentação da bancada consiste em um conjunto de seis termopares tipo R dispostos em cotas progressivas a partir da interface com a placa de alumina até a superfície em contato com o meio externo, o que possibilita verificar qual o perfil de temperaturas ao longo da matriz porosa, podendo também estimar a posição da frente de chama. Esses termopares estão ligados a um sistema de aquisição de dados, que é composto por um conversor de sinal analógico-digital (*data logger*) e um computador para aquisição e plotagem instantânea. A Tabela 4.1 descreve os componentes eletrônicos utilizados na bancada.

Tabela 4.1 – Componentes eletrônicos da bancada de testes de queimadores porosos.

Equipamento	Marca	Modelo
Controlador de vazão de Ar	Bronkhorst	F-112AC-M10-AAD-55-V (150 ls/min)
Controlador de vazão de GNV	Bronkhorst	F-201CV-10K-AAD-22-V (10 ls/min)
Controlador de vazão de CO_2	Bronkhorst	F-201CV-10K-AAD-22-V (15 ls/min)
Sistema de aquisição de dados	Agilent	34972A
Termopares	Omega	Tipo R (Pt / Pt-13%Rh) - 0,01in

4.2. Procedimento de Teste

O procedimento se inicia com a aquisição de dados de temperatura, em graus Celsius e a cada um segundo. Definem-se, então, as vazões de gases para que se tenha uma razão de equivalência de aproximadamente 0,9 e velocidade da mistura em cerca de 30 cm/s. A ignição é dada na superfície superior do queimador, com a instantânea formação da chama fora da matriz porosa. A chama é forçada a entrar através do posicionamento de uma manta isolante perfurada sobre a superfície do queimador, atuando como plano de estagnação. A chama,

então, começa a penetrar no meio poroso conforme se dá o aquecimento do mesmo. Quando a temperatura do último termopar (posicionado na interface entre a placa perfurada e a matriz porosa) se aproxima de 1000°C, as vazões são reajustadas nos controladores para a razão de equivalência e velocidade que se deseja testar, conforme a matriz de testes presente no Apêndice II.

O critério de estabilização adotado foi de que não haja variações de temperatura maiores do que de 20°C em todos os seis termopares instalados dentro de um intervalo de 20 minutos. Com esse critério atingido, faz-se uma média dos 20 últimos pontos estáveis registrados como resultado. Os experimentos foram feitos – para cada diluição de CO₂ – em duas razões de equivalências (0,5 e 0,6), mapeando os limites de estabilidade superior e inferior. O critério de estabilização adotado é diferente dos descritos em experimentos similares, como por exemplo: Gao et al. (2011), que adotou como critério de estabilização variações menores que 10K em 30min; Pereira et al. (2002), que adotou 20 minutos com variações de no máximo 5°C.

O critério para definição do limite de estabilidade superior, foi a chama se apresentar visivelmente fora da matriz porosa. Já para o limite de estabilidade de chama inferior, o critério baseou-se em evitar a degradação da placa perfurada, pela detecção de temperatura, sendo quando o termopar de segurança, posicionado na interface entre a placa perfurada e a matriz porosa, indicar uma leitura acima de 1100°C. Na ocorrência desse fenômeno, o teste é interrompido. Outro fenômeno que definiu o limite inferior de estabilidade – para baixas vazões e razões de equivalência – é o risco de retorno de chama, ou *flashback*, que foi definido quando as temperaturas na matriz estão abaixo dos 1000°C e, passados 40 min, continuam caindo.

Nos experimentos iniciais, os saltos dados após estabilização de chama foram de 1 cm/s, para conhecer melhor o funcionamento do queimador. Nos experimentos com diluição de CO₂ esses saltos foram maiores (2 a 3 cm/s).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Distribuição de Temperaturas

A Figura 5.1 mostra os gráficos de distribuição de temperaturas ao longo do comprimento específico para os experimentos com GN puro ($\alpha=0$) e a Figura 5.2 mostra os gráficos para a diluição de 20% de CO₂ em GN ($\alpha=0,2$).

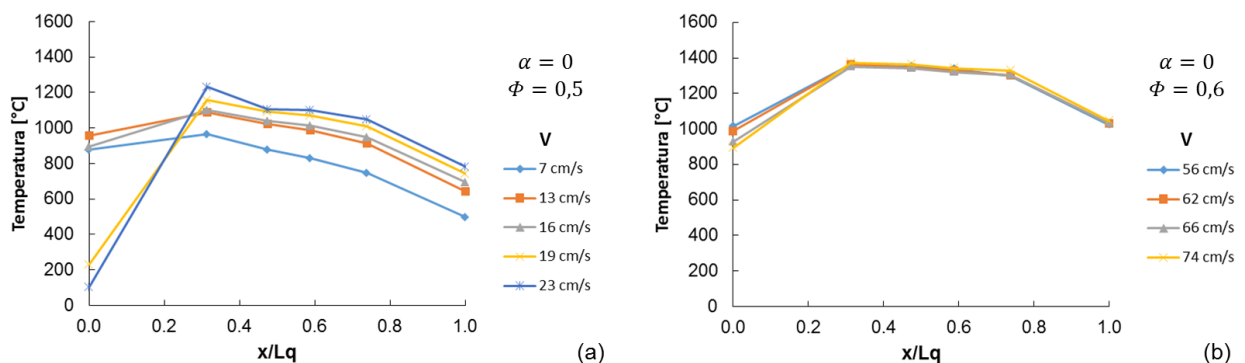


Figura 5.1 – Distribuição de temperaturas ao longo do comprimento específico para GN puro: (a) razão de equivalência de 0,5; (b) razão de equivalência de 0,6.

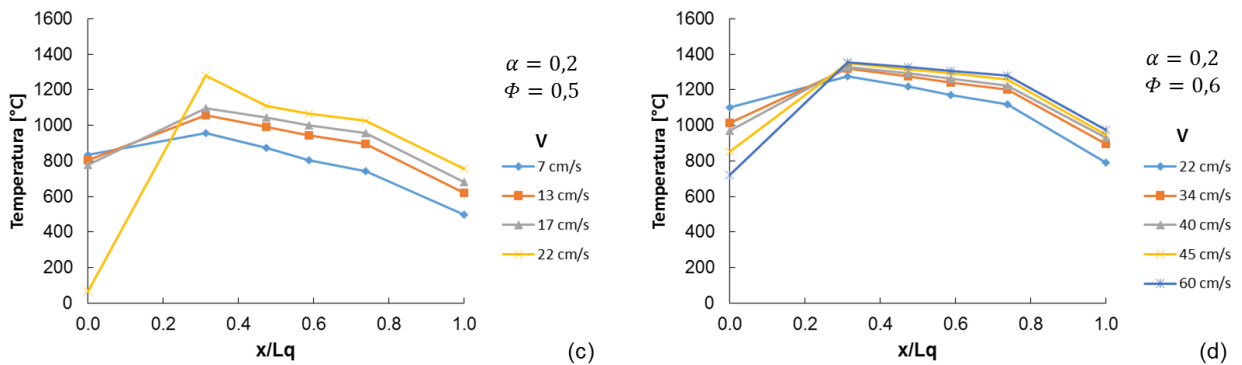


Figura 5.2 – Distribuição de temperaturas ao longo do comprimento específico para a diluição de 20% de CO_2 : (a) razão de equivalência de 0,5; e (b) razão de equivalência de 0,6.

Pelos gráficos das Figuras 5.1 e 5.2, nota-se que o pico de temperatura é sempre na região onde o comprimento específico é aproximadamente 0,3. Isso denota que a frente de chama se estabiliza nessa região e, portanto, o trecho inicial de aproximadamente 25 mm do comprimento do queimador funciona como região de pré-aquecimento dos reagentes. Pelos mesmos gráficos, pode-se notar uma queda de temperatura acentuada no trecho após o ponto onde o comprimento específico é 0,7, aproximadamente. Isso indica que há uma perda de calor acentuada nesse trecho. Além desses dois detalhes, é possível verificar que a diluição de 20% de CO_2 não reduz as temperaturas nos limites superiores de estabilidade de chama.

5.2. Limites de Estabilidade

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os diagramas de estabilidade para o GN puro e para a diluição de 20% de CO_2 , respectivamente. Os pontos azuis são pontos estáveis e os pontos triangulares cinzas são pontos instáveis.

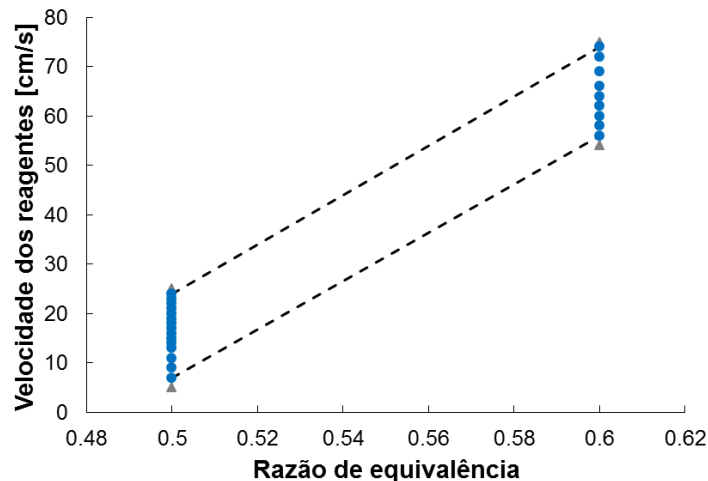


Figura 5.3 – Limites de estabilidade de chama para GN puro.

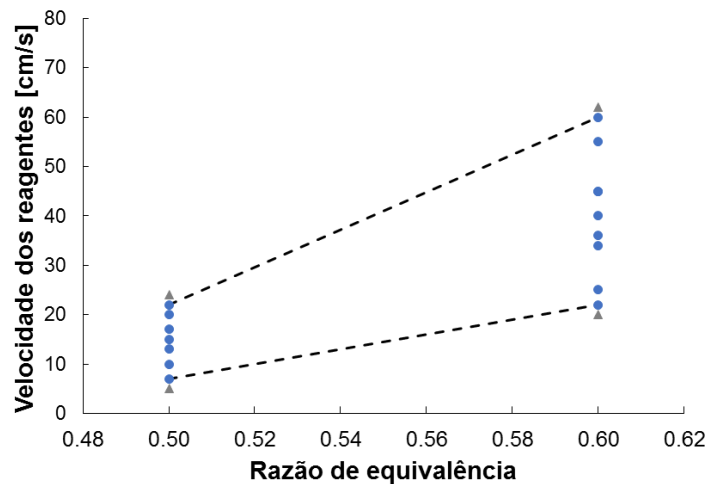


Figura 5.4 – Limites de estabilidade de chama para a diluição de 20% de CO₂.

Pelas Figuras 5.3 e 5.4 é possível verificar que, para os critérios admitidos, as faixas de estabilidade para a diluição de 20% são mais amplas. Isso se deu pelo fato de que o queimador trabalha com temperaturas muito altas com o GN puro – o que acabou deixando o limite inferior de estabilidade, para a razão de equivalência de 0,6, muito elevado, pois há uma velocidade de 56 cm/s a temperatura do termopar de segurança se aproxima dos 1100°C.

As potências específicas de chama que se conseguiu estabilizar nos experimentos desse trabalho foram de 122 a 1526 kW/m² para o GN puro e de 141 a 1334 kW/m² para a diluição de 20% de CO₂. A Tabela 5.1 compara os experimentos realizados nesse trabalho com os experimentos de Gao et al. (2011) e Keramiotos e Founti (2012).

Tabela 5.1 – Comparativo entre potências específicas de chama.

Experimento	Diluição CO ₂ [%]	\dot{S}_r " mínima [kW/m ²]	\dot{S}_r " máxima [kW/m ²]	Razão
Gao et al. (2011)	0	331	1752	5.3
Gao et al. (2011)	25	528	3129	5.9
Gao et al. (2011)	40	655	2029	3.1
Keramiotos e Founti (2012)	40	200	1000	5.0
Presente trabalho	0	122	1526	12.5
Presente trabalho	20	141	1334	9.5

Pela Tabela 5.1, verifica-se que o queimador desenvolvido nesse trabalho operou em potências específicas menores que os demais e, por consequência, tem a maior razão entre potências específicas máximas e mínimas.

5.3. Eficiência de Radiação

A Figura 5.5 mostra um gráfico da eficiência de radiação em função da potência de chama para os experimentos com GN puro ($\alpha=0$) e para a diluição de 20% de CO₂ ($\alpha=0,2$).

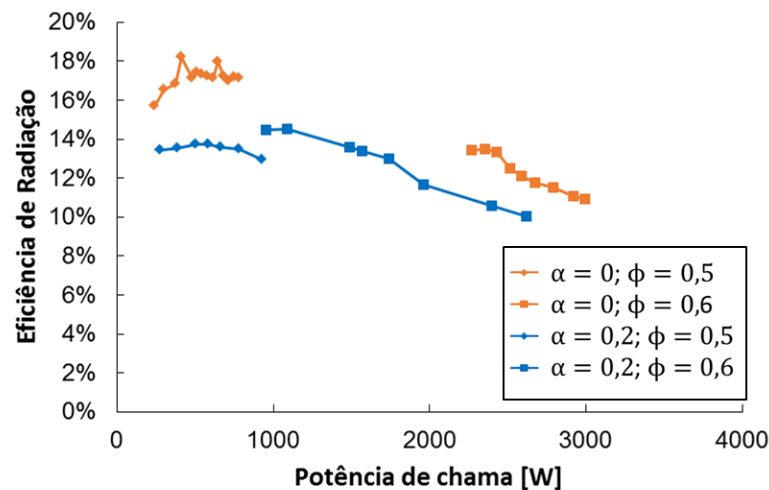


Figura 5.5 – Eficiência de radiação em função da potência de chama.

Pela análise da Figura 5.5, verifica-se que a eficiência de radiação decai com a diluição de CO_2 . Pode-se ver também que, nos experimentos com razão de equivalência de 0,6, a eficiência de radiação decai com o aumento da potência de chama. Isso ocorre porque, nessa razão de equivalência, o aumento na velocidade – e, por consequência, na potência de chama – não produz variação significativa nas temperaturas onde a chama se estabiliza, porém, o consumo de combustível aumenta.

Em contraste, para os experimentos com razão de equivalência de 0,5, a eficiência de radiação se mantém praticamente constante, apesar de algumas perturbações (no caso do GN puro). Acredita-se que esse fenômeno ocorre porque, em baixas velocidades, há uma perda excessiva de calor para as paredes laterais e superfície superior do queimador, o que resulta em temperaturas mais baixas, inclusive na superfície superior. Para velocidades maiores, a perda de calor é menor, o que causa um aumento nas temperaturas e consequente aumento no calor radiante emitido, porém, mais combustível é consumido, gerando um equilíbrio na Equação 2.4.

5.4. Incertezas

A máxima incerteza da velocidade e da razão de equivalência foi determinada pelo teorema de propagação de incerteza de Kline & McClintock. As variáveis primárias para cálculo delas foram o diâmetro do queimador e as vazões de ar, GN e CO_2 . A velocidade apresentou uma incerteza máxima (ΔV) de aproximadamente 10% e a razão de equivalência apresentou uma incerteza máxima ($\Delta \phi$) de aproximadamente 1%. As equações e dados utilizados na determinação dessas incertezas podem ser vistas no Apêndice III.

6. CONCLUSÕES

Verificou-se que a diluição de CO_2 no GN produziu uma redução na distribuição de temperaturas a baixas vazões. A eficiência de radiação também reduziu, por conta dessa redução na distribuição de temperaturas. Porém, a faixa de estabilidade aumentou com a diluição de CO_2 , devido às temperaturas nos experimentos com GN puro serem muito elevadas para os critérios de estabilização adotados. Se esse critério fosse menos conservador, por exemplo, podendo a leitura do termopar de segurança chegar à temperatura de 1300°C , a tendência seria essa faixa ampliar. Portanto, para próximos experimentos de combustão de biogás sintético com o queimador testado, sugere-se a mudança critério.

A forma da medição da temperatura da superfície superior – que está em contato com o meio externo – é um fator que pode ser melhorado. Como esse dado é utilizado para estimar a eficiência de radiação, o ideal seria medi-lo com um pirômetro ótico, o qual tem maior acurácia na medição de temperatura de corpos sólidos. Ao utilizar um termopar, como feito no presente trabalho, não há como garantir pleno contato com o sólido durante todo o experimento.

Os experimentos realizados indicaram que o queimador opera em velocidades e razões de equivalência mais baixas que os queimadores estudados na literatura. Porém, um fator que pode ter limitado sua operabilidade foi a sua geometria. O comprimento é cerca de duas vezes o diâmetro, de modo que, em baixas vazões, se tenha uma perda excessiva de calor para as paredes laterais, resultando em baixas temperaturas na superfície superior do queimador, o que pode reduzir a eficiência de radiação. Caso o queimador fosse construído com um empilhamento de apenas três pastilhas ao invés de quatro, provavelmente a eficiência de radiação em baixas vazões aumentaria. Portanto, é aconselhável dirigir um estudo sobre o projeto do queimador, caso haja interesse em melhorar seu desempenho em baixas vazões.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, gerando uma base de dados relevante para possíveis aplicações ou novos experimentos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Francisco Jr., R. W.; Costa, W.; Catapan, R. C.; Oliveira, A. A. M. **“Combustion of hydrogen rich gaseous fuels with low calorific value in a porous burner placed in a confined heated environment”**. Experimental Thermal and Fluid Science. 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. 2011.

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

Hardesty, D. R.; Weinberg, F. J. **“Burners producing large excess enthalpies”**. Combust. Sci. and Tech., v.8, p.201-214, 1974.

Möbauer S. et al. **“Application of the porous burner technology in energy and heat engineering”**. V International Conference on Technologies for a Clean Air Environment, Lisbon, 1999.

Pereira, F. M. **“Medição de características térmicas e estudo do mecanismo de estabilização de chama em queimadores porosos radiantes”**. 2002. Tese. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Coelho, P.; Costa, M. **“Combustão”**. 2ª Ed. Amadora, Portugal. 2012. 714p.

Turns, S. R. **“An Introduction to Combustion: Concepts and Applications”**. 2nd ed. McGraw Hill Book Co, Singapore. 2010. 287.

<https://www.fluidat.com/default.asp>

<http://www.bronkhorst.com/files/downloads/datasheets/el-flow/f-112ac.pdf>

<http://www.bronkhorst.com/files/downloads/datasheets/el-flow/f-201cv.pdf>

<http://www.foseco.com/br/end-markets/foundry/produtos-e-servicos/fundicao-de-nao-ferrosos/non-ferrous-foundry-detail/productsinfo/filtragem/filtros-sivex-sic-para-ligas-de-cobre/>

APÊNDICE I

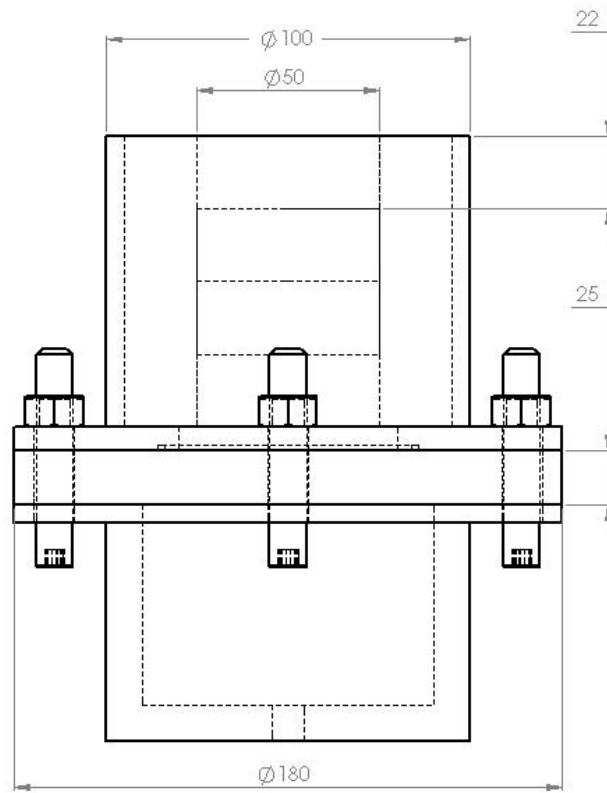


Figura I - A: Montagem do queimador poroso com as principais dimensões.

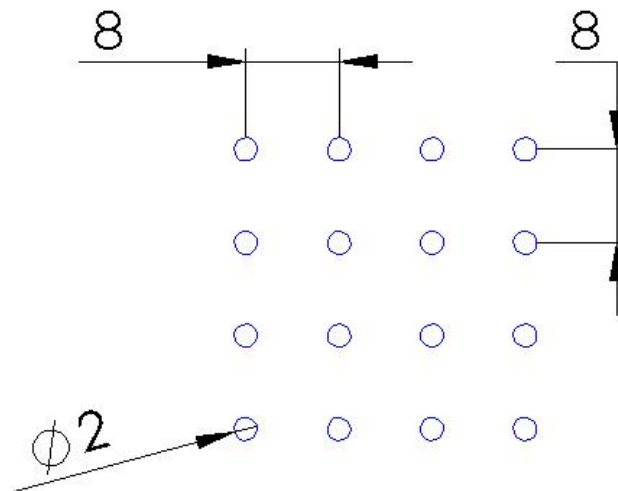


Figura I - B: Padrão de furação da placa perfurada.

APÊNDICE II

ϕ	V [cm/s]	Q_{Ar} [l/min]	Q_{Comb} [l/min]
0.50	5.00	5.62	0.29
0.50	7.00	7.86	0.40
0.50	9.00	10.11	0.51
0.50	11.00	12.36	0.63
0.50	13.00	13.48	0.69
0.50	14.00	15.70	0.80
0.50	15.00	16.90	0.86
0.50	16.00	18.00	0.91
0.50	17.00	19.10	0.97
0.50	18.00	20.20	1.03
0.50	19.00	21.30	1.08
0.50	20.00	22.50	1.14
0.50	21.00	23.60	1.20
0.50	22.00	24.70	1.26
0.50	23.00	25.80	1.31
0.50	24.00	27.00	1.37
0.60	54.00	60.09	3.67
0.60	56.00	62.32	3.80
0.60	58.00	64.55	3.94
0.60	60.00	66.70	4.07
0.60	62.00	69.00	4.21
0.60	64.00	71.22	4.34
0.60	66.00	73.45	4.48
0.60	69.00	76.79	4.68
0.60	72.00	80.13	4.89
0.60	74.00	82.05	5.02
0.60	75.00	83.46	5.09

Tabela II - A: Matriz de testes para GN puro. V é a velocidade da mistura, Q_{Ar} é a respectiva vazão de ar e Q_{Comb} é a respectiva vazão de combustível.

ϕ	V [cm/s]	Q_{Ar} [l/min]	Q_{Comb} [l/min]
0.50	5.00	5.50	0.35
0.50	7.00	7.70	0.50
0.50	10.00	11.20	0.70
0.50	13.00	14.40	0.91
0.50	15.00	16.65	1.06
0.50	17.00	18.90	1.20
0.50	20.00	22.20	1.41
0.50	22.00	24.40	1.68
0.50	24.00	26.70	1.68
0.60	18.00	19.80	1.43
0.60	20.00	22.00	1.58
0.60	22.00	24.20	1.73
0.60	25.00	27.40	1.97
0.60	34.00	37.30	2.69
0.60	36.00	39.50	2.84
0.60	40.00	43.90	3.15
0.60	45.00	49.40	3.55
0.60	45.00	49.40	3.55
0.60	55.00	60.40	4.34
0.60	60.00	65.90	4.74
0.60	62.00	70.25	5.05

Tabela II - B: Matriz de testes para diluição de 20% de CO₂.

APÊNDICE III

$$V = 4 \frac{(Q_{Ar} + Q_{GN} + Q_{CO_2})}{\pi D^2} \quad (III-A)$$

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial D} \Delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Q_{Ar}} \Delta Q_{Ar}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Q_{GN}} \Delta Q_{GN}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Q_{CO_2}} \Delta Q_{CO_2}\right)^2} \quad (III-B)$$

$$\phi = v_{Ar} \frac{Q_{Comb}}{Q_{Ar}} \quad (III-A)$$

$$\Delta \phi = \sqrt{\left(\frac{\partial \phi}{\partial Q_{Ar}} \Delta Q_{Ar}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial Q_{GN}} \Delta Q_{GN}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial Q_{CO_2}} \Delta Q_{CO_2}\right)^2} \quad (III-C)$$

Tabela III-A: Dados para estimativa de ΔV máxima.

V [m/s]	D [m]	ΔD [m]	Q_{Ar} [m ³ /s]	ΔQ_{Ar} [m ³ /s]	Q_{GN} [m ³ /s]	ΔQ_{GN} [m ³ /s]	Q_{CO_2} [m ³ /s]	ΔQ_{CO_2} [m ³ /s]	ΔV [m/s]	ΔV relativo
0.75	0.05	2.50E-03	1.39E-03	8.35E-06	8.48E-05	5.09E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.08	10%
0.62	0.05	2.50E-03	1.17E-03	7.03E-06	6.73E-05	4.04E-07	1.68E-05	1.01E-07	0.06	10%

Tabela III-B: Dados para estimativa de $\Delta \phi$ máxima.

ϕ	Q_{Ar} [m ³ /s]	ΔQ_{Ar} [m ³ /s]	Q_{GN} [m ³ /s]	ΔQ_{GN} [m ³ /s]	Q_{CO_2} [m ³ /s]	ΔQ_{CO_2} [m ³ /s]	$\Delta \phi$	$\Delta \phi$ relativo
0.6	1.39E-03	8.35E-06	8.48E-05	5.09E-07	0.00E+00	0.00E+00	5.30E-03	1%
0.6	1.17E-03	7.03E-06	6.73E-05	4.04E-07	1.68E-05	1.01E-07	5.07E-03	1%