

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

DESENVOLVIMENTO DE UM QUEIMADOR POROSO RADIANTE A GÁS NATURAL PARA BAIXAS TEMPERATURAS

Rafael C. Catapan, Fernando M. Pereira, Amir A. M. de Oliveira

Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário Trindade, Florianópolis-SC,
catapan@cet.ufsc.br, fernando@cet.ufsc.br, amirol@emc.ufsc.br

Resumo - Este trabalho trata da caracterização experimental de um queimador poroso radiante a gás natural operando com temperaturas superficiais entre 500°C e 900°C. Estes queimadores têm aplicação em diversos processos tais como secagem de papel e madeira, cura de plásticos e revestimentos, cocção de alimentos e aquecimento de ambientes. Foram testadas duas configurações de esponjas cerâmicas de carbeto de silício (SiC): a primeira com uma região de reflexão de radiação (RRR) acima da região de estabilização de chama e a segunda sem esta região. Ambas configurações foram capazes de queimar misturas de ar/metano com relação de equivalência abaixo de 0,35. Com a inserção da RRR foi possível manter a reação de combustão com potências em torno de 60 kW/m², enquanto que sem a RRR a mínima potência capaz de manter chama estável foi na ordem de 100 kW/m². A inserção da RRR e conseqüente diminuição da velocidade de chama do limite inferior de estabilidade proporcionou uma operação estável com temperaturas cerca de 150°C mais baixas do que a configuração sem a RRR. Os resultados indicam que a utilização de uma RRR em um queimador poroso aumenta a recirculação de calor dentro do mesmo. A eficiência de radiação variou nos dois casos entre 20% e 35%.

Palavras-Chave: queimador poroso; eficiência de radiação; aquecimento radiante

Abstract - This article describes the experimental characterization of a radiant porous burner for temperatures between 500°C and 900°C. These low temperature radiant burners can be used in many practical applications as drying of paper and wood, plastic coating, food cooking and ambient heating. Two different configurations of silicon carbide porous ceramic foams were tested: one with a radiant reflecting region (RRR) at the outlet and another without this region. Both configurations were able to sustain the reaction with equivalent ratio under 0,35. The configuration with a reflecting region was able to sustain flames with a minimum power of 60 kW/m² and the other configuration with 100 W/m². The configuration with the RRR reached minimum superficial temperatures about 100°C lower than the other one. These results show that the reflecting region increases the heat recirculation inside the porous burner. The radiant efficiency varied from 20% to 35% for both burners.

Keywords: porous burner; radiant efficiency, radiant heat transfer

1. Introdução

O aquecimento por radiação térmica, tem sido amplamente utilizado em processos industriais tais como secagem de papel, processamento do vidro, cura de revestimentos, em aquecimento de ambientes e preparação de alimentos. Diversas são as tecnologias aplicadas nestes processos. Pode-se citar a utilização de resistências de grafite aquecidas por efeito Joule e queimadores tubulares radiantes. Queimadores porosos estão aos poucos sendo inseridos neste mercado.

Queimadores porosos são construídos a partir de uma estrutura porosa metálica ou cerâmica onde a reação de combustão ocorre. A inserção desta estrutura de alta condutividade faz com que a mistura gás e ar seja pré-aquecida antes da zona de reação, promovendo um aumento na taxa de reação química, aumento da temperatura máxima na zona de reação, que pode chegar a valores acima da temperatura adiabática de chama e menor emissão de poluentes (Howell,

1996). Além disso, segundo Pereira (2002) a presença de uma matriz sólida a alta temperatura resulta em um grande potencial de troca de calor direcional com o ambiente externo por radiação a partir do meio sólido. Segundo Trimis e Durst (1996) a diminuição do tamanho dos poros tende a dificultar a propagação da chama através do meio poroso. Esta interface entre cerâmicas com diferentes tamanhos de poros é utilizada em queimadores porosos para formar uma barreira à passagem da frente de chama.

Pereira (2002) analisa as características térmicas da combustão da mistura de metano e ar em queimadores construídos a partir de placas cerâmicas de zirconita/alumina. A mínima relação de equivalência cuja chama permaneceu estável foi em torno de 0,40. A eficiência de radiação variou de 18% para velocidades de chama mais altas a 28% para velocidades mais baixas. A mínima potência obtida foi de 86,4 kW/m² e a máxima de 1263 kW/m², resultando uma razão entre potências máxima e mínima de 1:14. As temperaturas superficiais variaram de 600°C a 1200°C.

Hsu (1996) analisa várias combinações de camadas de cerâmicas porosas. Uma das configurações estudadas propõe a adição de uma camada de poros pequenos após a região de estabilização de chama (REC). Esta nova camada, chamada de região de reflexão da radiação (RRR), tem a finalidade de redirecionar o fluxo de calor radiante vindo da zona de reação com alta temperatura novamente para a REC. A adição de uma cerâmica com poros menores acima da REC cria uma segunda região de estabilidade de chama mantendo a reação de combustão contida na REC. Esta configuração apresenta o limite superior de estabilidade com valores mais altos de velocidades de chama do que uma configuração sem a RRR. Os resultados obtidos por Hsu (1996) mostram que para uma mesma razão de equivalência, a temperatura limite de degradação térmica da cerâmica foi registrada em uma velocidade aproximadamente 5 cm/s menor que as velocidades registradas na configuração sem a RRR. Isto demonstra que esta configuração teve uma maior temperatura de chama devido ao maior taxa de recirculação de calor ocasionada pela reflexão da radiação pela RRR para a REC.

Segundo Möbauer et al. (1999) os materiais mais importantes utilizados em queimadores porosos são esponjas cerâmicas de SiC, de ZrO₂, C/SiC, estruturas a base de fibras de Al₂O₃ e, para algumas aplicações, malhas metálicas de ferro-cromo-alumínio ou aços a base de níquel. Materiais a base de ZrO₂ e Al₂O₃ podem operar em temperaturas acima de 1650°C. Já os metais e SiC são restritos a temperaturas mais baixas – de 900 a 1300°C –, no entanto, apresentam ótima resistência mecânica, ótima resistência a choque térmico e alta condutividade térmica. Misturas destes materiais, tais como cordierita e mulita, são utilizados buscando combinar propriedades térmicas e mecânicas de uma forma mais conveniente.

Este trabalho descreve os experimentos e a análise dos resultados que visam a caracterização de um queimador poroso que opere com temperaturas superficiais entre 500°C e 900 °C. Inicialmente foi analisado um queimador com uma RRR de 40 ppi com o intuito de promover um maior aquecimento interno, possibilitando a queima de misturas mais pobres de combustível. Em seguida a RRR foi substituída por uma cerâmica de 10 ppi. As comparações entre os casos estudados são apresentadas na forma do diagrama de estabilidade, da temperatura superficial e da eficiência de radiação. As cerâmicas utilizadas são esponjas comerciais à base de carbetto de silício (SiC). O combustível utilizado foi o metano com 90% de pureza em combustão com ar.

2. Experimento e Metodologia de Trabalho

A bancada de teste de queimadores porosos é composta por sistemas de injeção de ar e metano, de medição de temperatura e de aquisição de dados. A figura 1 apresenta uma foto da bancada experimental.



Figura 1. Imagem da bancada experimental para queimadores porosos

Os fluxos de ar e metano são monitorados por medidores eletrônicos de vazão, fabricados pela empresa Omega, com faixa de operação de 0 a 500 e 0 a 50 litros por minuto (lpm) respectivamente (incerteza de medição de $\pm$

0,75 lpm para o ar e $\pm 0,05$ lpm para o metano). Os termopares utilizados no queimador são do tipo R (platina e platina + 13% ródio, faixa de medição de -50 a 1768°C, incerteza de medição de $\pm 4^\circ\text{C}$), isolados por tubos cerâmicos de alumina. A aquisição dos dados de temperatura é feita por meio do sistema de aquisição Agilent 34970 A. A temperatura superficial é medida através de uma câmera de termografia a infra-vermelho do fabricante Flir System modelo FLIR 500.

2.1. Configurações do Experimento

Duas configurações foram analisadas. A configuração 1 foi montada com a região de pré-aquecimento (RP) de 40 ppi e 20 mm de espessura, a REC de 10 ppi e 20 mm de espessura e a RRR com 40 ppi e 20 mm de espessura, conforme figura 2a. A configuração 2 foi montada com a RP de 40 ppi e 20 mm de espessura e a REC de 10 ppi e 40 mm de espessura, conforme figura 2b. Ambas esponjas tem 80% de porosidade volumétrica. O formato das esponjas é quadrado com 100 mm de lado, totalizando uma área superficial de 100 cm².

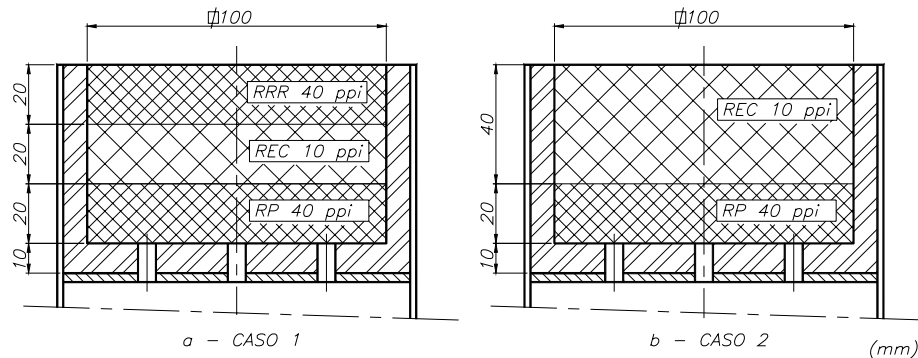


Figura 2. Configurações testadas

A chama, quando estabilizada dentro de um meio poroso, apresenta forma tridimensional. Quando se trabalha com pequenas espessuras de queimador, a tridimensionalidade de chama pode reduzir a faixa de estabilidade do mesmo. Isto porque a chama pode estar ao mesmo tempo, em regiões próximas ao limite de descolamento de chama e em regiões próximas o limite de retorno de chama.

Uma solução alternativa para resolver este problema é a adição de uma placa distribuidora isolante. Esta placa faz com que a injeção da mistura ar/metano ocorra em apenas alguns pontos do queimador e não mais em toda a sua superfície, conforme visualizado na figura 2. A cada injeção fica associada uma chama que pode ou não se conectar com as demais dependendo da distribuição de furos na placa isolante e do ponto de operação do queimador. A vantagem desta configuração é que a mistura ar/combustível tem que sofrer uma aceleração para passar pelos orifícios da placa isolante perfurada. Assim, ao entrar na cerâmica os gases não reagidos apresentam altas velocidades, o que dificulta o retorno de chama. Outra vantagem é a possibilidade de otimização da distribuição dos furos na placa isolante de forma a obter um perfil de temperatura homogêneo em todo o queimador, mesmo para elevadas relações área superficial/espessura.

2.2. Metodologia de Ensaio

A metodologia de ensaio utilizada neste trabalho é baseada na metodologia proposta por Hsu et al. (1993). Estes pesquisadores propuseram uma metodologia para a determinação dos limites de inflamabilidade de queimadores porosos. Consiste em escolher inicialmente uma relação de equivalência e uma vazão volumétrica de gases (Vg) que permitam que a chama se propague para dentro do meio poroso até a interface entre a RP e a REC, pré-aquecendo a fase sólida. Em seguida a relação de equivalência é ajustada no valor de teste e Vg é variado buscando-se encontrar os valores de Vg,min e Vg,max em que a frente de chama se estabiliza dentro da REC (limites de estabilidade de chama). Este procedimento é repetido para relações de equivalência mais baixas até que não seja mais possível estabilizar uma chama, independentemente da vazão. Este ponto é considerado como o limite inferior de inflamabilidade do combustível. A velocidade de chama é obtida dividindo-se o fluxo total de gases pela área da seção transversal do queimador. Considera-se uma chama estável aquela que por um período mínimo de dez minutos não sofrer variação maior que 10°C.

3. Resultados e Discussões

3.1. Diagrama de Estabilidade

A figura 3 apresenta o diagrama de estabilidade obtido para o caso 1 (linhas tracejadas) e para o caso 2 (linhas cheias). É possível observar que para cada relação de equivalência (Φ) existe uma faixa de velocidades de chama cuja chama é estável. As linhas inferiores representam o limite inferior de estabilidade. Para Φ menor que 0,55 estas linhas

representam o limite de extinção da chama. Para Φ maior que 0,55 o limite inferior é dado pelo retorno de chama. As linhas superiores representam o limite superior de estabilidade. Para Φ menor que 0,40 as linhas representam o limite de descolamento de chama. Os testes foram interrompidos quando as temperaturas internas ultrapassavam 1350°C, evitando a degradação térmica da cerâmica. Para Φ maior que 0,40 o limite superior de operação é dado pelo limite de degradação térmica.

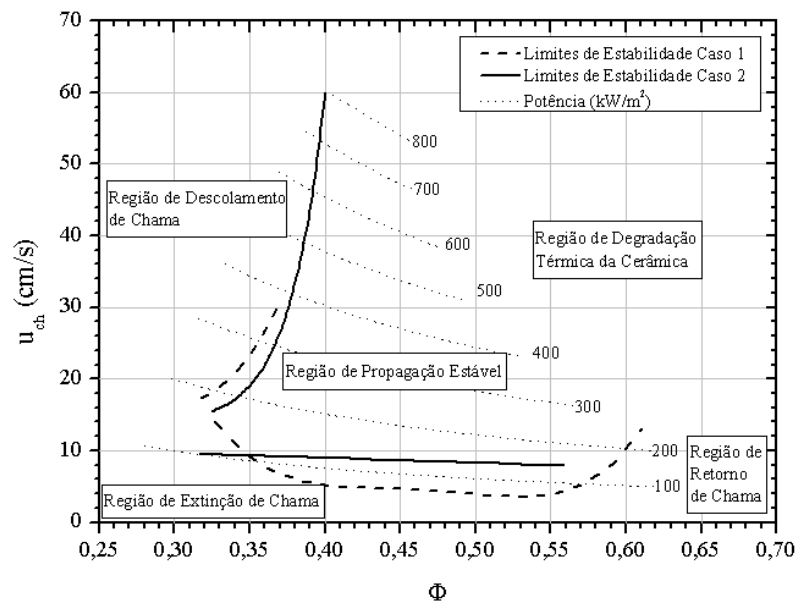


Figura 3. Limites de estabilidade de chama obtidos na combustão de metano e ar pré-misturados no caso 1 (linhas tracejadas) e no caso 2 (linhas cheias)

Os testes realizados apresentaram no limite inferior de estabilidade velocidades de chama constantes na ordem de 6 cm/s para o caso 1 e 10 cm/s para o caso 2, para Φ de 0,40 a 0,55. Esta faixa onde o limite inferior se mantém constante é possível devido à inserção da placa distribuidora abaixo da RP. Esta placa promove uma aceleração da mistura metano/ar, fazendo com que os gases entrem com velocidades maiores na zona de reação do que uma configuração sem placa distribuidora, minimizando o retorno de chama para a câmara que antecede a RP. A partir de $\Phi = 0,60$, o retorno de chama foi detectado para o caso 2 com 10 cm/s de velocidade de chama. No caso 1 obteve-se uma chama estável para $\Phi = 0,60$ e 10 cm/s de velocidade de chama. Testes realizados por Pereira (2002), apresentaram no limite inferior velocidades crescentes com a relação de equivalência. A extinção da chama também foi registrada para Φ em torno de 0,40.

Observa-se que a introdução da RRR promoveu a diminuição das velocidades no limite inferior de estabilidade. No caso 2, sem a RRR, as chamas extinguíam em velocidades abaixo de 10 cm/s, enquanto que no caso, com a RRR foi possível obter chamas estáveis com 6 cm/s de velocidade de chama. Este fenômeno pode ser atribuído a maior recirculação de calor que gera um aumento da temperatura interno do queimador, possibilitando que a reação de combustão ocorra com potências mais baixas.

No caso 1, o limite superior foi registrado com velocidades de chama ligeiramente maiores que no caso 2. Para $\Phi = 0,37$, o caso 1 apresentou velocidade de chama no limite superior de 30 cm/s, enquanto que o caso 2 apresentou velocidade de 26 m/s. Para $\Phi = 0,33$ o limite superior no caso 1 apresentou velocidade de 18 cm/s enquanto que no caso 2 o limite ocorreu com velocidade de 15 cm/s. Estes valores comprovam que a RRR presente no caso 1, promoveu o aumento do limite superior de estabilidade conforme era esperado. Para $\Phi = 0,40$ a temperatura limite de degradação térmica ocorreu com velocidades de 60 cm/s no caso 1. No caso 2 as temperaturas não excederam o limite de degradação.

A introdução da RRR não promoveu a queima de misturas mais pobres. O limite inferior de inflamabilidade foi de 0,33 para os dois casos. Pereira (2002) obteve, na queima de metano e ar em um queimador de zirconita/alumina, 0,40 como limite inferior de inflamabilidade. Esta diferença pode ser atribuída a maior condutividade térmica do carbetto de silício, em torno de 20 W/mK, em comparação a da zirconita alumina, em torno de 5 W/mK, que promove uma maior taxa de recirculação de calor dentro do queimador.

3.2. Temperaturas Superficiais

A figura 4 apresenta a faixa de temperaturas superficiais registradas em chamas estáveis no caso 1 (linhas tracejadas) e no caso 2 (linhas cheias). Para cada relação de equivalência existe uma faixa de temperaturas superficiais do queimador de acordo com a velocidade de chama. Os limites superior e inferior representam as temperaturas

superficiais registradas para os limites superior e inferior de estabilidade de chama, respectivamente. Um polinômio do segundo grau foi ajustado para cada limite.

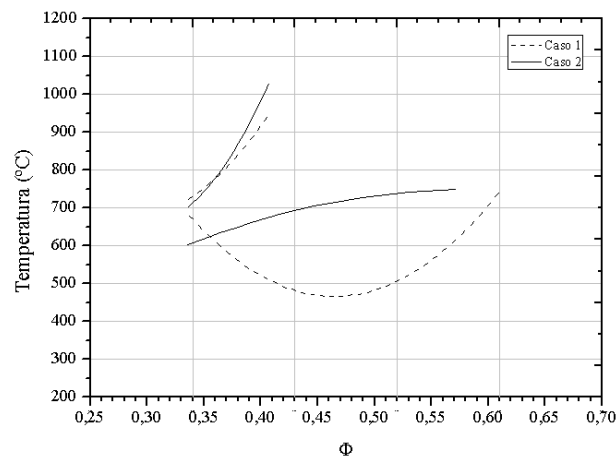


Figura 4. Temperaturas superficiais obtidas nos limites inferior e superior de estabilidade de chama no caso 1 (linhas tracejadas) e no caso 2 (linhas cheias)

No limite inferior, os valores da temperatura superficial apresentaram valores distintos nos casos 1 e 2. No caso 1, as temperaturas no limite inferior foram na ordem de 500°C para $\Phi = 0,37$ até 0,55. A temperatura mínima registrada foi de 452°C. No caso 2, as temperaturas no limite inferior variaram de 600° a 750°C, sendo a mínima de 576°C. Esta diferença ocorre devido ao limite inferior de estabilidade no caso 1 ser registrado em com potências mais baixas que no caso 2. Além disso a RRR de 40 ppi, presente no caso 1, reflete a radiação vinda da zona de reação novamente para a REC, aumentando o gradiente térmico ao longo do queimador.

O queimador quando operando no caso 1 apresenta uma faixa de temperaturas superficiais de operação mais ampla do que quando operando no caso 2.

3.3. Eficiência de Radiação

As figuras 5 e 6 apresentam a eficiência de radiação em função da velocidade chama obtida para cada caso. Esta eficiência é determinada através da energia emitida por radiação pelo queimador dividida pela energia total gerada pela reação de combustão. A energia radiante é calculada através da medição da temperatura superficial do queimador, assumindo que sua emissividade é igual um (Khanna, 1994). A eficiência de radiação varia entre 35% para baixas velocidades e 20% para mais altas velocidades. Este comportamento esta de acordo com trabalhos experimentais (Pereira e Oliveira, 2002 e Khanna, 1994)

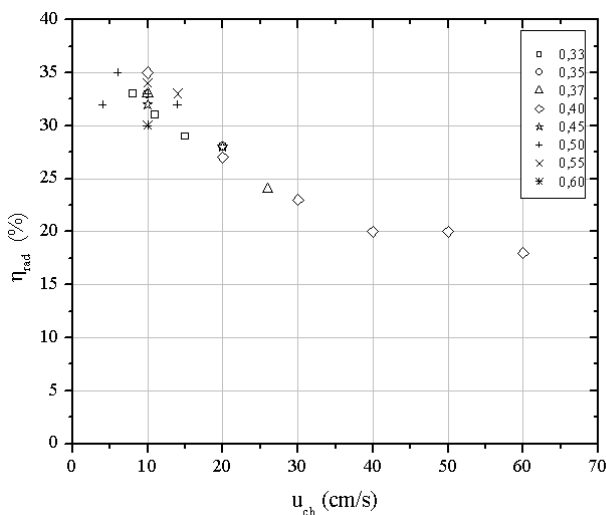


Figura 5. Eficiência de radiação em função da velocidade de chama para cada relação de equivalência obtida no caso 1

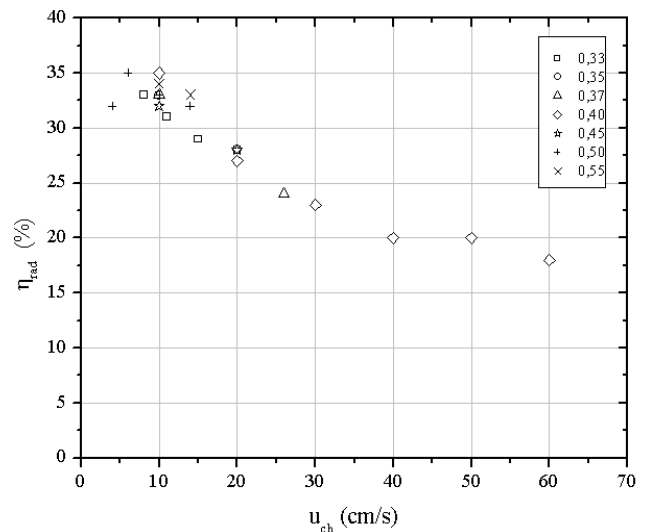


Figura 6. Eficiência de radiação em função da velocidade de chama para cada relação de equivalência obtida no caso 2

Observa-se, pelos dados experimentais, que a variação da eficiência de radiação com a velocidade de chama é maior que a variação com a relação de equivalência. Pode-se ajustar uma curva a estes dados de tal forma que a eficiência seja uma função da velocidade de chama. Com isto pode-se identificar no diagrama de estabilidade através das curvas de mesma potência e da velocidade de chama do ponto qual é o fluxo de radiação emitido pelo queimador.

4. Conclusões

Foram testadas duas configurações de um queimador poroso de placas cerâmicas de SiC. No primeiro caso uma cerâmica de poros pequenos (RRR) foi colocada acima da região de estabilização de chama. No segundo, a cerâmica de poros pequenos foi retirada e em seu lugar foi colocada uma cerâmica com poros grandes. O limite inferior de inflamabilidade foi de 0,33 nos dois casos.

Observa-se que a introdução da RRR promoveu a diminuição das velocidades no limite inferior de estabilidade. No caso 2, sem a RRR, as chamas extinguíam em velocidades abaixo de 10 cm/s, enquanto que no caso, com a RRR foi possível obter chamas estáveis com 6 cm/s de velocidade de chama. Este fenômeno pode ser atribuído a maior recirculação de calor que gera um aumento da temperatura interno do queimador, possibilitando que a reação de combustão ocorra com potências mais baixas.

A temperaturas superficiais no limite inferior foram na ordem de 500°C para $\Phi = 0,37$ até 0,55 no caso 1. A temperatura mínima registrada foi de 452°C. No caso 2, as temperaturas no limite inferior variaram de 600° a 750°C, sendo a mínima de 576°C. Observa-se que a inserção de uma RRR possibilita a operação estável do queimador com temperaturas superficiais mais baixas que um queimador sem a RRR.

A eficiência de radiação variou entre 35% para baixas velocidades e 20% para mais altas velocidades. Este comportamento esta de acordo com trabalhos experimentais (Pereira e Oliveira, 2002 e Khanna, 1994).

O diagrama de regime na forma de um diagrama de limites de estabilidade é uma excelente ferramenta de projeto de queimadores para as aplicações.

5. Agradecimentos

Este projeto pertence à carteira da Rede Gás Energia e conta com apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da ANP para o setor de Petróleo e Gás Natural – PRH-09/MECPETRO. Foi realizado no âmbito da linha de pesquisa em queimadores poroso do Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos da Universidade Federal de Santa Catarina – LabCET, UFSC.

6. Referências

- HOWELL, J. R., HALL, M. J., ELLZEY J. L. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media. *Prog. Energy Combustion Science*, v. 22, p. 121-145, 1996.
- HSU, P. F. Experimental study of the premixed combustion within the nonhomogeneous porous ceramic media. *National Heat Transfer Conference*, v.6, ASME 1996.
- HSU, P. F., EVANS, W. D., HOWELL, J. R. Experimental and numerical study of premixed combustion within nonhomogeneous porous ceramics. *Comb. Sci. and Tech.*, v. 90, p. 149-172, 1993.
- KHANNA, R.; GOEL, R.; ELLZEY, J. L. Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner. *Comb. Sci. and Tech.* 99:133-142, 1994.
- MÖßAUER S., PICKENÄCKER, O, PICKENÄCKER, K. 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. *Dissertação*. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- PEREIRA, F. M., OLIVEIRA, A A M. Medição das características térmicas da combustão pré-misturada de metano e ar em meios porosos de esponja cerâmica. *2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*, 2002.
- TRIMIS, D., DURST, F. Combustion in a porous medium – advances and applications. *Comb. Sci. and Tech.* v. 121, p.153-168, 1996.