

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

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE PRÉ-MISTURA EM MEIO POROSO

por

Venâncio Lázaro Batalhone Neto

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 2012

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE PRÉ-MISTURA EM MEIO POROSO

por

Venâncio Lázaro Batalhone Neto

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. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

Comissão de Avaliação:

Prof. Volnei Borges

Prof. Fernando Marcelo Pereira

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 15 de junho de 2012.

DEDICATÓRIA

Gostaria de dedicar este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aos meus pais, Vitor Claret Batalhone e Matilde Soares Batalhone. Pelo esforço e dedicação em minha educação moral e formal que me permitiram transgredir diversas fronteiras, muitas das quais invisíveis aos olhos mais desatentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), administrativos, terceirizados, técnicos e professores, por possibilitarem e contribuírem com minha formação.

Gostaria de agradecer à Professora Thamy Cristina Hayashi pela orientação neste Trabalho de Conclusão de Curso, dedicação e tempo empregados para que fosse possível sua conclusão.

Agradeço também aos familiares pelo apoio, principalmente às tias Sheila Soares Silva e Maria das Graças Soares e famílias.

Aos meus pais, aos quais dedico este TCC, um imenso obrigado e todo o reconhecimento pelo esforço que fizeram para que minha formação fosse possível. Além do apoio incondicional às minhas decisões e objetivos.

A meu irmão, Vitor Claret Batalhone Júnior, pela grande amizade e pelo constante aprendizado.

A meus amigos também pela amizade, em especial aos companheiros de percurso, Vinícius Ribeiro e Leonardo Valero, que tornaram esse longo caminho muito mais leve e divertido.

Gostaria também de agradecer minha esposa e companheira Sandra Tournier, a mais bela surpresa que a engenharia me proporcionou, tornando esse improvável encontro realidade.

BATALHONE NETO, V. L. **Simulação Numérica do Escoamento de Pré-Mistura em Meio Poroso**. 2012. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Queimadores cuja combustão é realizada em meios porosos apresentam vantagens, tais como dimensões mais compactas, maior eficiência térmica e alta razão de operação (razão entre máxima e a mínima potências entre as quais podem operar com estabilidade). Este trabalho busca estudar diferentes condições de entrada do fluido de trabalho no meio poroso e quais implicações das mudanças nas principais características de funcionamento do queimador. O fluido de trabalho será uma mistura de gás metano e ar. O queimador apresenta apenas uma camada de material poroso (Al_2O_3) e os parâmetros testados são a razão de equivalência e a velocidade de entrada da mistura. Para tanto, são realizadas simulações numéricas em um modelo de queimador nas condições descritas anteriormente. A metodologia numérica utilizada é a dos volumes finitos. As simulações numéricas são feitas em linguagem de programação FORTRAN. Observou-se que a adequação do modelo ao processo de combustão merece um esforço adicional, ficando como proposta para futuros trabalhos. Foram então analisados os escoamentos dentro do modelo proposto, obtendo-se resultados adequados aos encontrados na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: simulação numérica, meio poroso, queimador

BATALHONE NETO, V. L. **Numerical Simulation of Premixed Flow in Porous Media**. 2012. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

Porous media burners are characterized by advantages like compacity, higher thermal efficiency and high turndown ratio. This paper presents the study of different inlet conditions of mixture within the porous media and the implications in the main functional burner parameters. The fluid is a mixture of methane and air. This burner has only a porous media layer (Al_2O_3) and the inlet conditions are the equivalency ratio and the inlet mixture velocity. In these studies, numerical simulations are performed for a burner in the mentioned conditions. The numerical methodology used is the finite volume method. The numerical simulations are performed in FORTRAN programming language. It was concluded that combustion process model demands additional efforts and it least as a motivation for future papers. The flow in the model was analyzed with the obtained results corresponding with others studies.

KEYWORDS: numerical simulation, porous media, burner

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

A	Fator pré-exponencial de Arrhenius
	Área perpendicular a uma superfície
A_{fs}	Área específica da interface sólido-fluido
a_{sf}	Área da interface sólido-fluido por unidade de volume do material poroso
c	Traço de concentração
$c_{p,f}$	Calor específico do fluido
$c_{p,s}$	Calor específico do sólido
d_p	Diâmetro do poro
dA	Diferencial de área
E_a	Energia de ativação
D_{km}	Difusividade molecular da espécie química k na mistura
h	Coeficiente superficial de transferência de calor por convecção
h_k	Entalpia específica da espécie química k
h_v	Coeficiente volumétrico de transferência de calor por convecção
k_f	Condutividade térmica do fluido
k_s	Condutividade térmica do sólido
m	Parâmetro da taxa de reação
M_k	Peso molecular da espécie química k
n	Parâmetro da taxa de reação
\mathbf{n}	Vetor unitário normal à uma superfície
N_{sp}	Número de espécies químicas
p	Pressão
q_r	Fluxo de calor radiante
R	Constante universal dos gases
S_ϕ	Termo fonte para uma quantidade genérica
\bar{S}	Termo fonte linearizado
S_p	Componente do termo fonte nas equações de transporte discretizadas
S_U	Componente do termo fonte nas equações de transporte discretizadas
t	Tempo
T_f	Temperatura do fluido
T_s	Temperatura do sólido
u_D	Vetor velocidade de Darcy
u_{Di}	Componente do vetor velocidade de Darcy na direção i
u	Componente do vetor velocidade na direção x
v	Componente do vetor velocidade na direção y
\mathbf{v}	Vetor velocidade
\mathbf{v}_f	Vetor velocidade do fluido
V	Volume
$\dot{V}_{mín}$	Vazão volumétrica mínima
$\dot{V}_{máx}$	Vazão volumétrica máxima
x	Coordenada horizontal do sistema de coordenadas retangulares
y	Coordenada vertical do sistema de coordenadas retangulares
y_k	Fração mássica da espécie k na mistura

Alfabeto Grego

ω	Vetor velocidade da interface entre duas fases
$\dot{\omega}_k$	Taxa de produção mássica da espécie química k devido a reações químicas
Ψ	Quantidade genérica
Ψ_f	Quantidade genérica de fluido
∇	Operador divergente
Ω	Tensor genérico
β	Parâmetro da taxa de reação
Γ_ϕ	Coeficiente de Difusão para uma quantidade genérica
ε	Porosidade
λ	Razão de excesso de ar
μ_f	Viscosidade dinâmica do fluido
ρ_f	Densidade do fluido
ρ_s	Densidade do sólido
σ_Ψ	Termo fonte
ϕ	Razão de equivalência

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Aplicações	2
2.2. Princípios do Processo	4
2.3. Resultados da Literatura	4
3. OBJETIVOS	4
4. METODOLOGIA	4
4.1. Modelo Geométrico	4
4.2. Modelagem Físico-Matemática	5
4.3. Metodologia Numérica	9
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1 INTRODUÇÃO

Há milhares de anos o processo de combustão é usado pelo homem. Inicialmente, o domínio do fogo foi de grande serventia para proteção, cozinhar alimentos, prover iluminação e aquecimento. Já a partir do século XVIII, com a primeira onda da Revolução Industrial, a combustão tomou posição primordial nas cadeias de produção e de provento energético.

Mesmo se nas últimas décadas as fontes de energia alternativas vêm ganhando espaço, a produção energética a partir da queima de combustíveis ainda é de suma importância. Além disso, com as novas descobertas de reservas de combustíveis fósseis, as previsões de capacidade de abastecimento, até pouco tempo atrás alarmistas, prolongaram-se consideravelmente.

No Brasil, as recentes descobertas de reservas de petróleo do pré-sal feitas pela Petrobras implicam diretamente na intensificação do uso dos derivados de petróleo e do gás natural. Segundo informações do sítio da Petrobras, a meta de produção de óleo e líquido de gás natural, no Brasil e no exterior em 2011, era de aproximadamente 2,8 milhões boed (barris de óleo equivalente por dia). A perspectiva de produção para os próximos cinco anos está em torno de 4 milhões boed; e, para 2020, prevista em 6,4 milhões boed.

Além disso, projetos na área da utilização de biogás (combustível com origem na decomposição anaeróbia de resíduos orgânicos) oriundo de aterros sanitários ganham importância na busca de uma produção energética mais sustentável. Nosso país tem grande potencial de aproveitamento desses gases a partir do tratamento de esgoto, suinocultura e da deposição de resíduos sólidos [Bordin, 2011]. Como a geração de resíduos é própria da atividade humana, o uso do biogás para produção energética aparece como boa alternativa à simples queima ou liberação desses gases na atmosfera.

O grande inconveniente dos processos de combustão é a produção de contaminantes que são descartados na atmosfera. Verifica-se, desde o século XVIII, um aumento alarmante da concentração desses gases e particulados. Sabe-se que os produtos resultantes da queima de combustíveis fósseis apresentam impacto importante na qualidade do ar e nos seres que dele precisam. A combustão completa forma, por exemplo, o gás carbônico (CO_2) que é conhecido por seu efeito estufa e que, embora de suma importância, apresenta um crescimento vertiginoso. Outros produtos da combustão incompleta de hidrocarbonetos, como CO e os NO_x são tóxicos para o ser humano.

Levando-se em consideração que a matriz energética mundial continuará ainda por um longo período dependente da combustão, torna-se essencial a busca por processos com melhor rendimento, capacidade de queima de combustíveis com baixa inflamabilidade e de misturas pobres. Além do mais, as normas de controle das emissões de poluentes ficam cada vez mais restritas, exigindo-se soluções inovadoras. Neste contexto, a combustão em meios porosos apresenta-se como um processo eficiente de conversão de energia química do combustível em calor sensível dos gases ou intensos escoamentos de calor radiante [Hayashi, 2005].

Em comparação aos queimadores com chamas livres, os de meios porosos são caracterizados pela transferência de calor de regiões mais quentes a jusante da chama para regiões mais frias a montante, por processo local de recirculação de calor. Diferentemente de outros processos de recirculação, não há necessidade de dispositivos auxiliares [Pereira, 2009]. A utilização destes queimadores possibilita sistemas de menores dimensões, com razões de potências máxima e mínima elevadas, maiores eficiências, velocidades de chama elevadas (com conseqüente diminuição da produção dos NO_x), extensão dos limites de inflamabilidade e de estabilidade de chama [Malico, 2001]. Ainda segundo Pereira, 2009, com a recirculação de calor, alcança-se níveis de energia maiores e, portanto, temperaturas de queima maiores, diminuindo também a emissão de poluentes resultantes da queima incompleta (formados a uma temperatura menor).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aplicações

Se compararmos o estudo da combustão em meios porosos com os convencionais sistemas de chama livre, pode-se dizer que o primeiro é consideravelmente mais recente. De qualquer maneira, pesquisas para entender os fenômenos desencadeados em meios porosos têm recebido atenção e o número de publicações crescido nos últimos anos. Em seguida, alguns casos de aplicações da tecnologia encontrados na literatura são abordados.

Em Malico, 2001, discute-se a utilização da tecnologia em sistemas de aquecimento central. Em tais aplicações, o mais comum são sistemas de combustão com chama livre e, posteriormente, os produtos da reação passam por permutadores de calor transferindo calor para um segundo fluido de trabalho. Nestes equipamentos, a unidade de aquecimento apresenta dimensões consideráveis com reduzidos intervalos de potência disponível (razão entre a potência máxima e mínima não ultrapassando o valor de 3). Quanto às emissões de poluentes, com a tendência de que as normas e legislações sejam cada vez mais restritas, torna-se importante a adequação do sistema. Neste contexto, o uso de queimadores porosos aparece como uma interessante perspectiva para atender à demanda de sistemas de pequenas dimensões, com razões entre as potências máxima e mínima elevadas e com baixas emissões de poluentes (NO_x e CO). Eles apresentam também velocidades de chama elevadas, melhor estabilização da chama, limites de inflamabilidade alargados, além de altas eficiências.

Em Hayashi, 2005, estudou-se um queimador cuja utilização seria em sistemas para aquecedores domésticos, abastecidos a biocombustível. O mecanismo reúne as tecnologias de vaporização a chama fria e combustão em meios porosos. Além de um trocador de calor multi-jet de alta eficiência e sistemas de controle. Na Figura 2.1, pode-se ver o esquema de cada uma das técnicas propostas no projeto.



Figura 2.1 – Tecnologias propostas no sistema de aquecimento: à esquerda, vaporizador a chama fria; no centro, exemplo de um queimador poroso em operação; à direita, esquema de uma caldeira compacta com multi-jets [Hayashi, 2005].

Este sistema apresenta algumas vantagens. Primeiramente, por permitir a utilização de combustíveis líquidos, de transporte e estocagem mais fáceis em relação a gases. No vaporizador de chama fria, um fino spray de combustível líquido é convertido em uma mistura de combustível gasoso e ar com parte da energia necessária para o processo de vaporização sendo fornecida por uma oxidação parcial do combustível a baixa temperatura. A estabilização dessa chama fria no vaporizador é obtida pelo aquecimento inicial de uma mistura rica até a temperatura à qual o fenômeno de chama fria acontece. A câmara de combustão consiste em uma seção difusora e um queimador poroso de dupla camada. A primeira é uma espuma cerâmica de SiC com porosidade de 90% e 10 poros por polegada (ppi); ela é precedida por

uma placa perfurada de alumina (Al_2O_3), contendo furos de 1mm de diâmetro, dispostos de tal maneira que esta placa tenha uma porosidade equivalente de 4%. Esta última tem a função de distribuir uniformemente a mistura para a camada de S_iC , que é chamada de camada de suporte da chama pois a expectativa é de que a frente de chama estabilize dentro desta camada para toda a faixa de operação. Além do mais, a placa perfurada deve bloquear a transferência de calor da camada posterior para a mistura ar-combustível na seção difusora da câmara de combustão, prevenindo assim a ocorrência de retorno de chama. Entretanto, a modelagem desta placa perfurada como um material poroso equivalente, com porosidade muito baixa provou-se inadequada. O que motivou as simulações numéricas em três dimensões de diferentes aspectos do escoamento e da transferência de calor dentro de matrizes porosas em Hayashi, 2005.

Outra área de interesse em meios porosos é a recuperação de óleos pesados pela técnica da combustão in-situ (In Situ Combustion – ISC). Com a alta dos preços do petróleo, houve um renovado interesse no desenvolvimento dessa técnica. A ISC promove a injeção de oxigênio puro ou ar, ou ar enriquecido com oxigênio ou ainda nitrogênio para tornar possível a combustão do óleo e outras reações consecutivas dentro do próprio reservatório, levando à liberação de calor. O calor é conduzido até a frente da zona de combustão, reduzindo a viscosidade do óleo, produzindo a destilação in-situ de componentes leves do óleo. A água presente no reservatório evapora com as altas temperaturas, além da formação de vapor a partir dos produtos da combustão. O calor liberado na condensação deste vapor aumenta a temperatura no reservatório e contribui para a evaporação dos componentes leves do óleo. Dióxido de carbono gerado pela combustão também pode contribuir aumentando a pressão e diluindo-se no óleo, reduzindo sua viscosidade, intensificando o escoamento [Chapiro, 2009].

Para um melhor entendimento da técnica, torna-se essencial o estudo das reações e processos. Em Chapiro, 2009, investigou-se a combustão dentro de meios porosos na zona de combustão e no coque. Na Figura 2.2, pode-se ver um esquema das zonas de interesse, sendo a região a montante, o poço de injeção, e a região a jusante indo até o poço de produção.

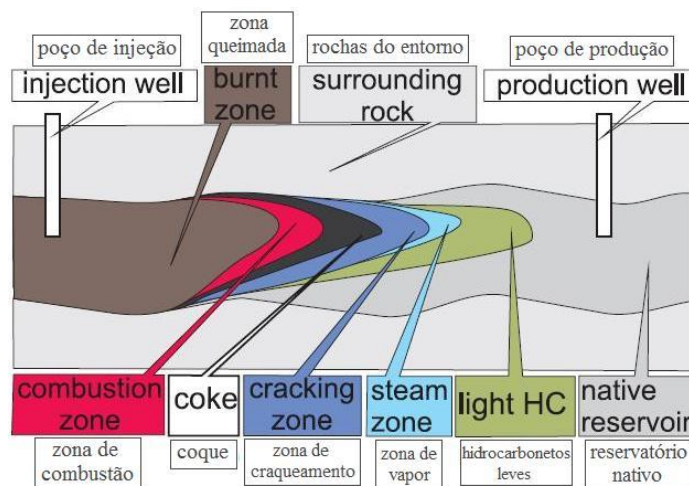


Figura 2.2 – Esquema das zonas do reservatório explorado [Chapiro, 2009].

Barcellos et al., 2007, propõem um novo conceito de caldeira não-convencional com queimador poroso. A extração de energia do processo de combustão tem sido a tônica dos projetos de caldeiras e, em particular, as caldeiras constituídas de queimadores porosos têm se mostrado muito eficientes quanto à transferência de calor, devido à matriz porosa. Este equipamento apresenta combustão estável, inclusive para misturas muito pobres, operando em faixas muito abaixo dos limites de inflamabilidade. Além de trabalhar com elevado nível de eficiência, boa extração de energia e baixas emissões de poluentes. Os estudos quanto à eficiência térmica, à estabilidade de combustão e às emissões foram realizados com a caldeira operando com gás natural em misturas muito pobres de ar-combustível. A matriz porosa é

capaz de reter o calor produzido pela reação e transferi-lo para o trocador de calor, melhorando de modo indireto, a eficiência da extração de calor da zona de combustão.

2.2 Princípios do Processo

Segundo Malico, 2001, a combustão em meios porosos prevê a estabilização da chama no interior da matriz porosa. Na entrada do equipamento, a fase sólida encontra-se a uma temperatura superior à dos reagentes gasosos já que é aquecida por radiação emitida pela matriz porosa para montante e por condução através do meio poroso. Conseqüentemente, após entrarem na matriz porosa a mistura ar combustível é aquecida por convecção à medida que atravessa os interstícios do meio poroso. O inverso ocorre na zona de combustão, onde a energia do combustível é transformada em energia térmica. Nessa região a temperatura da fase gasosa é superior à da fase sólida, que é aquecida por convecção. Assim, transfere para os reagentes uma fração da energia química libertada pelo combustível. Ainda segundo Malico, 2001, devido a este mecanismo de recirculação de energia dos produtos de combustão para os reagentes, eleva-se o nível energético desses últimos, tornando possível queimar combustíveis de menor poder calorífico, com limites de inflamabilidade maiores. Obtém-se também velocidades de chama superiores, o que significa menor tempo de residência dos produtos dentro do queimador, reduzindo as emissões dos NOx. Outra vantagem relacionada com as emissões de poluentes é que as temperaturas na zona de combustão são relativamente altas e o processo mais eficiente o que conduz a baixos índices de emissão de CO, provenientes da queima incompleta.

2.3 Resultados da Literatura

Em Barcellos et al., 2007, mostrou-se que a razão de equivalência e a velocidade de escoamento dos gases exibem uma forte influência sobre os perfis de temperatura, de eficiência e de emissões. Além disso, viu-se que a presença de trocadores de calor nas laterais do queimador confina as zonas de reação na seção central dos queimadores, permitindo combustão estável para uma faixa de razão de equivalência extensa. A extração de calor não permitiu a expansão da distribuição de temperatura em sentido às zonas laterais. Estes trocadores funcionam em alto regime de temperatura e a extração de energia do segundo trocador de calor não é suficiente para apagar o queimador. Registrou-se perfil de temperatura em formato trapezoidal, com um mínimo na região central do reator. A eficiência aumenta conforme a razão de equivalência aumenta, principalmente em baixas velocidades dos gases, considerando a faixa estudada experimentalmente.

3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a simulação numérica de um queimador poroso para estudo da estrutura e estabilização da chama em seu interior. O equipamento tem formato prismático, com uma camada porosa de alumina (Al_2O_3) e entrada da mistura por cavidade retangular na parte inferior. O modelo considera a simetria do sistema, a fim de reduzir o esforço computacional. Após as considerações acerca da modelagem, busca-se a simulação do escoamento da mistura dentro do queimador, assim como a descrição do processo de combustão, através dos resultados referentes à estrutura e estabilização da chama.

4 METODOLOGIA

4.1 Modelo Geométrico

O modelo geométrico adotado é bidimensional e em coordenadas retangulares. Em seguida, suas dimensões são apresentadas (Figura 4.1). Por consequência da simetria do sistema, definimos também as dimensões D' e d' , que são respectivamente: $D' = D/2$; e $d' = d/2$. Como proposto anteriormente, aproveita-se de sua condição de simetria para reduzir os esforços computacionais necessários. Tem-se então:

- ✓ Largura: $D = 0,07\text{m}$; $D' = 0,035\text{m}$;
- ✓ Altura: $L = 0,08\text{m}$;
- ✓ Profundidade da entrada da mistura: $b = 0,025\text{m}$;
- ✓ Largura da entrada da mistura: $d = 0,016\text{m}$; $d' = 0,008\text{m}$.

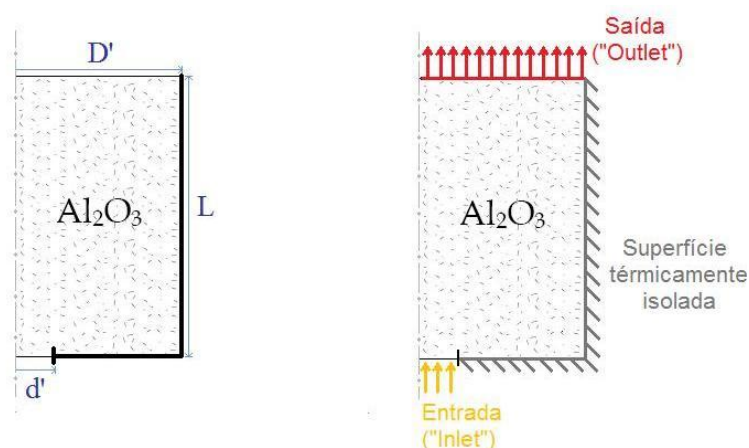


Figura 4.1 - Modelo do queimador poroso estudado, considerando plano de simetria.

Lembrando que a profundidade no modelo físico-matemático e numérico é unitária, pois se trata de um modelo bidimensional, ou seja, considera-se que os fenômenos não sofrem variações ao longo desta dimensão. As laterais do queimador são isoladas termicamente (superfícies adiabáticas) e impermeáveis. A porosidade da camada de alumina é de $\epsilon = 80\%$, com 10ppi. O processo de combustão é descrito por um mecanismo global de um passo, com combustível sendo gás metano (CH_4). As simulações realizadas são em regime permanente, ou seja, sem variações temporais. O regime de turbulência no escoamento não é considerado no modelo, cujas velocidades de entrada da mistura são para números de Reynolds dentro da faixa de regime laminar. Além disso, os fluxos radiantes não são considerados, pois este trabalho concentra-se no estudo preliminar da estrutura e estabilização da chama no interior do meio poroso. As simulações seriam realizadas para duas razões de equivalência (ϕ), para as quais seria considerada uma faixa de vazão volumétrica da mistura. No entanto, a adequação do código para o processo de combustão apresentou pontos críticos que merecem ser tratados com maior detalhamento em um trabalho futuro. Os resultados para o escoamento em meios porosos que são apresentados neste trabalho foram obtidos com as variáveis de entrada apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Razões de equivalência com as respectivas faixas de vazão volumétrica.

$\dot{V}_{\text{mín}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$\dot{V}_{\text{méd}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$\dot{V}_{\text{máx}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$v_{\text{mín}}^{\text{inlet}} [\text{m/s}]$	$v_{\text{méd}}^{\text{inlet}} [\text{m/s}]$	$v_{\text{máx}}^{\text{inlet}} [\text{m/s}]$
$1,6 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,8	1,0	1,2

4.2 Modelagem Físico-Matemática

Tratando-se do estudo de um meio poroso, a complexidade geométrica gera dificuldades para soluções gerais de campos escalares, velocidade e temperatura, mesmo que

as equações diferenciais de transporte continuam válidas em toda matriz porosa. Como se pode ver em Hayashi, 2005, modelos do escoamento, transferência de calor e de massa têm sido baseados na substituição das equações microscópicas pelas equações macroscópicas correspondentes, resultado da média das primeiras sobre um elemento volumétrico pequeno, mas representativo do meio poroso saturado com fluido. Essa metodologia é utilizada neste trabalho e apresentada resumidamente na sequência. Para uma descrição mais detalhada, pode-se recorrer a Hayashi, 2005.

4.2.1 Método das Médias Volumétricas

O procedimento de média volumétrica das equações de balanço tem como objetivo a obtenção do conjunto de equações macroscópicas governantes que representam os processos ocorrendo dentro do meio poroso. Para isso, define-se um volume elementar representativo do meio poroso saturado, com duas fases: uma sólida, a matriz porosa, e uma fluida. Como se pode ver na Figura 4.2. Como este volume deve ser representativo, seu comprimento característico deve ser grande o suficiente para que uma pequena variação no volume médio em torno de qualquer posição no domínio considerado não implique na mudança do valor médio de qualquer quantidade associada a essa posição.

O resultado do procedimento apresentado [Hayashi, 2005] conduz à equação diferencial macroscópica de transporte de uma quantidade Ψ_f genérica, Equação 4.1.

$$\frac{\partial \langle \Psi_f \rangle}{\partial t} - \frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \Psi_f \omega \cdot \mathbf{n} \, dA + \nabla \cdot \langle \mathbf{v}_f \Psi_f \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \Psi_f \mathbf{v}_f \cdot \mathbf{n} \, dA = \nabla \cdot \langle \mathbf{\Omega} \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_{fs}} \mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{n} \, dA + \langle \sigma_\Psi \rangle \quad (4.1)$$

onde o operador “ $\langle \rangle$ ” representa a média da respectiva variável considerada associada com alguma ponto no domínio do fluxo, que não é necessariamente em uma das fases.

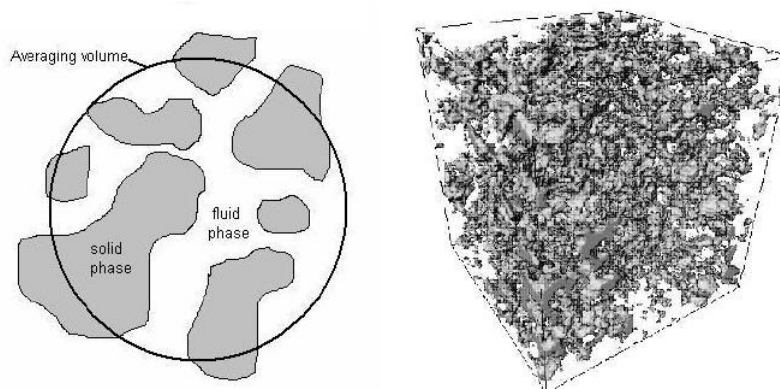


Figura 4.2 – À esquerda, volume elementar representativo para um meio poroso, com as fases sólida e líquida [Hayashi, 2005]. À direita, matriz porosa tridimensional [Nicolas, 2003].

Como dito anteriormente, o processo de média volumétrica é em seguida aplicado nas equações governantes. Este procedimento é detalhado em Hayashi, 2005, e em seguida tem-se o conjunto de equações resultantes da aplicação da média volumétrica. No item 4.1.7, uma abordagem sucinta das considerações para acoplamento do conjunto de equações é abordada.

4.2.2 Equação da Continuidade

$$\frac{\partial (\varepsilon \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f \mathbf{v}) = 0 \quad (4.2)$$

4.2.3 Balanço da Quantidade de Movimento

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial(v)}{\partial t} + \varepsilon \rho_f v \cdot \nabla v = -\varepsilon \nabla p + \varepsilon \mu_f \nabla \cdot (\nabla v) - (\nabla p)_p \quad (4.3)$$

4.2.4 Balanço Energético para a Fase Gasosa

$$\varepsilon \rho_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \varepsilon \rho_f c_{p,f} v \cdot \nabla T_f = \varepsilon \nabla \cdot (k_f \cdot \nabla T_f) + h_v (T_s - T_f) - \varepsilon \sum_{k=1}^{N_{sp}} \dot{\omega}_k M_k h_k \quad (4.4)$$

4.2.5 Balanço Energético para a fase Sólida

$$(1 - \varepsilon) \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \varepsilon) \nabla \cdot (k_s \cdot \nabla T_s) - h_v (T_s - T_f) - (\nabla \cdot q_r)_p \quad (4.5)$$

4.2.6 Transporte de Espécies Químicas

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial y_k}{\partial t} + \varepsilon \rho_f v \cdot \nabla y_k = \varepsilon \rho_f \nabla \cdot (D_{km} \cdot \nabla y_k) + \varepsilon \dot{\omega}_k M_k \quad k = 1, \dots, N_{sp} - 1 \quad (4.6)$$

4.2.7 Modelos de Acoplamento

Como esta metodologia leva a parâmetros não especificados que precisariam ser determinados experimentalmente ou modelados, uma descrição dos submodelos necessários para completar o modelo é apresentada em seguida, incluindo também as relações constitutivas termodinâmicas e químicas.

4.2.7.1 Perda de Carga

A perda de carga em um escoamento ocorrendo em meios porosos tem origem na fricção causada pelo atrito. Em baixas velocidades, esta variação é dada pela Lei de Darcy:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu_f}{K} u_D \quad (4.7)$$

Em Hayashi, 2005, mostrou-se que para velocidades mais elevadas, efeitos inerciais tornam-se importantes e aumentam essas perdas. Um modelo é então proposto por Kaviany, 1995, como uma adaptação da equação de Ergun [Macdonald et al., 1979] para sistemas com mais de uma dimensão ("i" dimensões), resultando em

$$\frac{dp}{dx_i} = -\frac{\mu_f}{K} u_{D_i} - \frac{c(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f}{d_p} |u_{D_i}| u_{D_i} \quad (4.8)$$

onde u_{D_i} é a velocidade de filtração e K é a permeabilidade do meio poroso, definida pela equação de Karman-Cozeny

$$K = \frac{\varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2} d_p^2 \quad (4.9)$$

4.2.7.2 Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor

Este termo considera a troca de calor convectivo na interface fluido-sólido e é importante para o acoplamento das equações resultantes do balanço energético das fases gasosa e sólida. Normalmente, ele é definido através de um coeficiente de transferência de calor volumétrico e se relaciona ao coeficiente superficial h pela relação

$$h_v = h a_{sf} \quad (4.10)$$

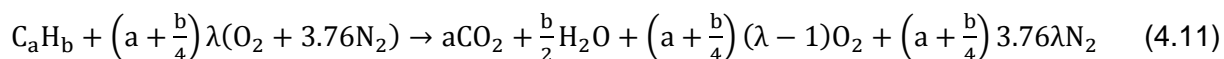
onde a_{sf} é a área da interface sólido-fluido por unidade de volume do material poroso [Hayashi, 2005]. Há dificuldades de se determinar este coeficiente, principalmente no que diz respeito à determinação das áreas envolvidas no fenômeno; esta dificuldade surge da geometria complexa do meio poroso e da distribuição dos poros dentro do mesmo.

Neste trabalho, adotou-se uma média de dois valores propostos na literatura para o coeficiente volumétrico. O primeiro encontrado em Hsu et al., 1993, (1.10^7 W/m³K); e o segundo definido em Lammers et al., 2003 (8.10^7 W/m³K).

4.2.7.3 Combustão

A combustão ocorre dentro dos poros da material cerâmico. Neste modelo matemático adotado, o processo é representado pelos termos fonte no balanço energético da fase fluida e nos balanços mássicos das espécies que estão reagindo. Em Hayashi, 2005, constata-se duas formas possíveis de considerar o processo de combustão: modelo global de um passo (“one-step”); e de múltiplos passos (“multi-step”). Este último, embora descreva mais detalhadamente as reações químicas ocorrendo no processo, traz algumas dificuldades em sua implementação. Primeiramente, por simplesmente aumentar o esforço numérico necessário. Além disso, ele torna o conjunto de equações diferenciais governantes rígido, pois existe uma diferença grande nas escalas de tempo entre os passos elementares e outras variações temporais do sistema.

Como neste presente trabalho não são analisadas as emissões resultantes da combustão, foi considerado o mecanismo global de um passo para a mistura ar-combustível, lembrando que este último é gás metano (CH₄). Tem-se então



onde λ é a razão de excesso de ar. A taxa de conversão do combustível, que depende da temperatura e da disponibilidade dos reagentes, é representada pela relação [Hayashi, 2005]

$$\dot{\omega}_{fuel}M_{fuel} = AT^\beta e^{-\frac{E_a}{RT}} \rho^{m+n} (y_{fuel})^m (y_{O_2})^n \quad (4.12)$$

onde A é o fator pré-exponencial de Arrhenius, E_a é a energia de ativação, R é a constante universal dos gases e β , m e n são parâmetros constantes.

Os valores usados neste trabalho para estes parâmetros são definidos na Tabela 4.2. Uma discussão mais detalhada sobre sua obtenção pode ser consultada em Hayashi, 2005.

Tabela 4.2 – Parâmetros da relação de conversão para modelo de um passo [Hayashi, 2005].

	$A \left[\left(\frac{m^3}{kg} \right)^{m+n-1} s^{-1} \right]$	$\frac{E_a}{R}$ [K]	β	m	n
CH ₄	$1,0 \times 10^{10}$	16839	0	1,0	1,0

4.2.7.4 Propriedades Termofísicas e de Transporte

Os processos de transferência de calor, massa e quantidade de movimento são acoplados pelas propriedades termofísicas e de transporte do gás, funções da temperatura e composição da mistura. Para isso, usa-se o pacote Chemkin para análise da cinética química e do pacote Tranfit para as propriedades de transporte [Hayashi, 2005].

4.2.7.5 Condições de Contorno

Como dito anteriormente, as paredes laterais do queimador são isoladas (adiabáticas) e impermeáveis. Por serem paredes sólidas, a velocidade da fase fluida nestas fronteiras é nula.

Na região de entrada do equipamento, há a imposição do campo de velocidades, que dá origem ao escoamento dentro do domínio. Na região de saída, é definido gradiente nulo da pressão, com pressão a jusante da saída à pressão atmosférica.

4.3 Metodologia Numérica

O modelo físico-matemático descrito neste capítulo foi resolvido numericamente, a partir de técnicas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), e de um código pré-existente conhecido em outros trabalhos [Hayashi, 2005]. O modelo numérico é baseado nos métodos de volumes finitos e diferenças finitas, além do algoritmo SIMPLE. Como a combustão foi tratada com um modelo global de um passo, o mesmo procedimento iterativo é aplicado de forma segredada para a obtenção do campo solução de cada variável dependente. Para a implementação do código numérico em linguagem FORTRAN, as equações que descrevem os fenômenos envolvidos foram tratadas pelo método dos volumes finitos e as condições de contorno e iniciais devidamente consideradas. A descrição mais detalhada do modelo pode ser vista em Hayashi, 2005.

Considerando que as equações diferenciais que governam os fenômenos descritos podem ser escritas no modelo genérico:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{v}) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla\phi) + S_\phi \quad (4.13)$$

onde ϕ é quantidade transportada, S_ϕ é o termo fonte e Γ_ϕ é o coeficiente de difusão de ϕ . Essa equação é então integrada em um volume de controle bidimensional, usando o teorema da divergência de Gauss e posteriormente integrada em relação a um intervalo de tempo Δt [Hayashi, 2005]. Na Figura 4.3 tem-se o esquema do elemento bidimensional em coordenadas retangulares considerado neste trabalho.

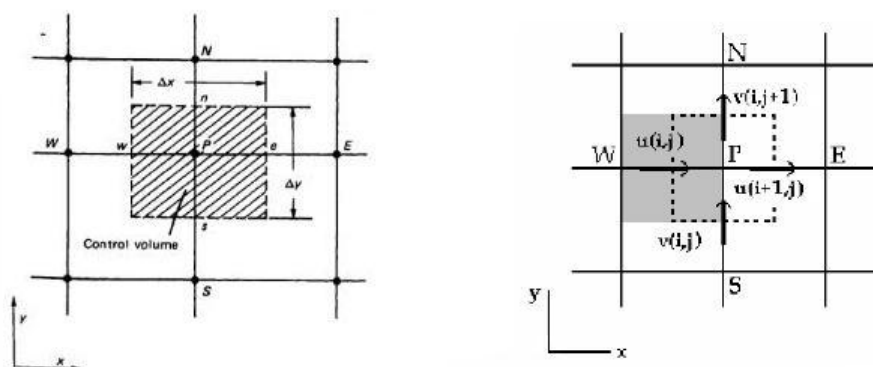


Figura 4.3 - À esquerda, elemento bidimensional em coordenadas retangulares utilizado no modelo [Patankar, 1980]. À direita, representação do vetor velocidade no elemento defasado [Hayashi, 2005].

Levando em consideração o volume de controle em coordenadas retangulares descrito na Figura 4.3, procede-se com a discretização da equação de transporte integrada, o que resulta em

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w + (\rho v A \phi)_n - (\rho v A \phi)_s = \left(\Gamma_\phi A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma_\phi A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w + \left(\Gamma_\phi A \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left(\Gamma_\phi A \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s + \bar{S}_\phi \Delta V \quad (4.14)$$

onde A é área da seção transversal de cada face do volume de controle, ΔV é o volume e \bar{S}_ϕ é o valor médio do termo fonte para o respectivo volume de controle. Como se trata de um modelo bidimensional tem-se: $\Delta V = \Delta x \Delta y$; e as respectivas áreas, $A_e, A_w = \Delta y$; e $A_n, A_s = \Delta x$.

Para tratar da substituição do gradiente da variável ϕ nos termos difusivos e convectivos, adotou-se um esquema diferencial híbrido, combinando os esquemas das diferenças centrais com o Upwind. Após a discretização, as equações diferenciais de transporte são tratadas para obter-se um conjunto de equações algébricas definidas em cada ponto da malha. Fazem-se necessárias modificações quando houver elementos em contato com as condições de fronteira e para regimes transientes. Finalmente, para garantir que o campo de pressão respeite a equação da continuidade, acopla-se os componentes de pressão e de velocidade, através do uso de elementos defasados (Figura 4.3, à direita) e pela aplicação do algoritmo SIMPLE [Hayashi, 2005]. O termo fonte é integrado e expresso como uma função linear da variável ϕ_p do tipo

$$\bar{S} \Delta V = S_U + S_p \phi_p \quad (4.15)$$

Chega-se finalmente ao conjunto de equações algébricas, definidas em cada ponto do domínio, com a_1 representando os coeficientes dos pontos vizinhos ao ponto "P"

$$a_p \phi_p = \sum a_1 \phi_1 + S_U \quad (4.16)$$

com o somatório definido nos pontos em torno do central "P" e com coeficiente central definido como

$$a_p = \sum a_1 + \Delta F - S_p \quad (4.17)$$

onde ΔF é o fluxo convectivo líquido; vale ressaltar que os coeficientes dos pontos com condições de fronteira devem ser modificados. Lembrando que esta simulação é em regime permanente e, portanto, não é necessário considerações sobre termos temporais.

O tratamento numérico apresentado nesta seção é amplamente usado em simulações numéricas com volumes finitos. Portanto, a definição exaustiva dos coeficientes da malha e daqueles provenientes da aplicação dos esquemas acima descritos, diferenças centrais e Upwind, pode ser verificada na referência utilizada neste trabalho, a saber, Patankar, 1980.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a definição da modelagem geométrica, físico-matemática e da modelagem numérica, implementou-se o modelo em linguagem de programação FORTRAN. A seguir, tem-se a impressão dos resultados obtidos, segundo as condições definidas no Capítulo 4. Como explicado anteriormente, a adequação do código utilizado para simulação do processo de combustão demonstrou dificuldades que merecem tratamento especial e que ficam como motivações para futuros trabalhos. A discussão dos resultados é então focada no escoamento da mistura ar-combustível dentro do meio poroso, com análise da distribuição das pressões e do campo de velocidades resultante. A validação deste modelo para simulação de escoamento bidimensional em meio poroso serve com ponto de partida para a implementação do modelo de combustão descrito neste trabalho.

Em relação à pressão dentro do queimador, pode-se ver na Figura 5.1 e Figura 5.2 sua distribuição. Percebe-se o aumento das perdas de carga devido ao aumento das velocidades de escoamento dentro do meio poroso, dadas pela Lei de Darcy. A convergência dos resíduos no cálculo das pressões mostrou-se um ponto crítico nas simulações. As condições de fronteira na saída no domínio, que determinam gradientes nulos nestes pontos, demonstraram ser aqueles que mais dificultam a convergência das variáveis. Num modelo com uma altura maior, as distribuições mostradas nas Figuras 5.1 e 5.2 conseguiriam desenvolver a distribuição mais esperada, com zonas de mesmo valor mais planas. No entanto, ao encontrar a fronteira na coordenada $y = 0,08\text{m}$, limita-se o desenvolvimento desta distribuição.

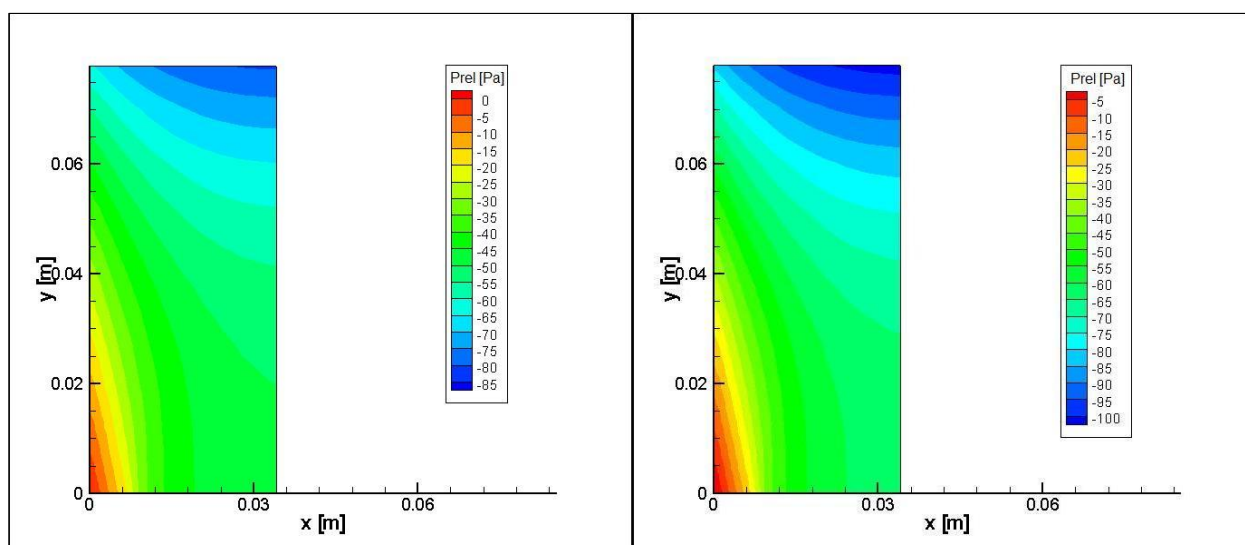


Figura 5.1 – Distribuição de pressões dentro do queimador; à esquerda, com $v_{min}^{inlet} = 0,8$ m/s; e, à direita, com $v_{med}^{inlet} = 1,0$ m/s.

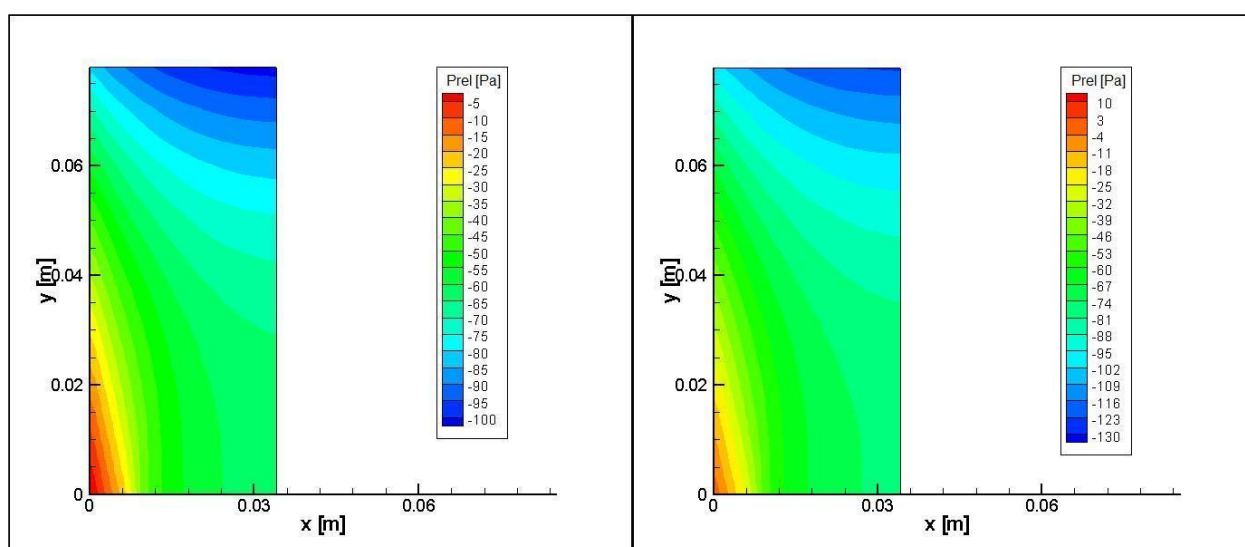


Figura 5.2 – Distribuição de pressões dentro do queimador; à esquerda, com $v_{med}^{inlet} = 1,0$ m/s; e, à direita, com $v_{max}^{inlet} = 1,2$ m/s.

Nas Figuras 5.3 a 5.5, tem-se o campo de vetores velocidade dentro do queimador. Nas imagens à esquerda é apresentado todo o domínio do campo e, nas imagens à direita, tem-se o detalhe da região de entrada. Observa-se que o escoamento dentro do meio poroso corresponde aos resultados encontrados na literatura e às expectativas do modelo. Foram testados dois modos para a imposição da condição inicial dos vetores velocidades na entrada no domínio. Primeiramente, atribui-se as velocidades iniciais constantes nos primeiros elementos da entrada. Num segundo momento, foi também simulado um perfil de velocidades parabólico nesta mesma entrada, variando com a coordenada horizontal. O objetivo desta segunda configuração foi de simular um perfil de escoamento já desenvolvido na entrada do queimador, resultante de uma região anterior; por exemplo, um tubo conduzindo a mistura à entrada do equipamento.

No entanto, verifica-se que para as duas condições, o escoamento comporta-se de maneira semelhante após sua convergência. Isso se dá pelo fato de que o meio poroso

homogeneiza o escoamento em uma espessura equivalente a poucos poros. Assim sendo, as imagens apresentadas neste trabalho (Figuras 5.3 a 5.5) são apenas aquelas obtidas com a imposição de um perfil parabólico.

Verifica-se que o escoamento deixa a região de entrada e tende a ocupar o meio poroso, levando ao aumento da componente horizontal da velocidade logo após a entrada da mistura. Esta componente atinge seus picos na saída do queimador. Já na região central, existe predominância da componente vertical da velocidade, com esperava-se.

Pode-se observar ainda que com o aumento das vazões e, por conseguinte, das componentes de velocidade verticais (v) na entrada, os escoamentos têm velocidades cada vez maiores, o que era de se esperar.

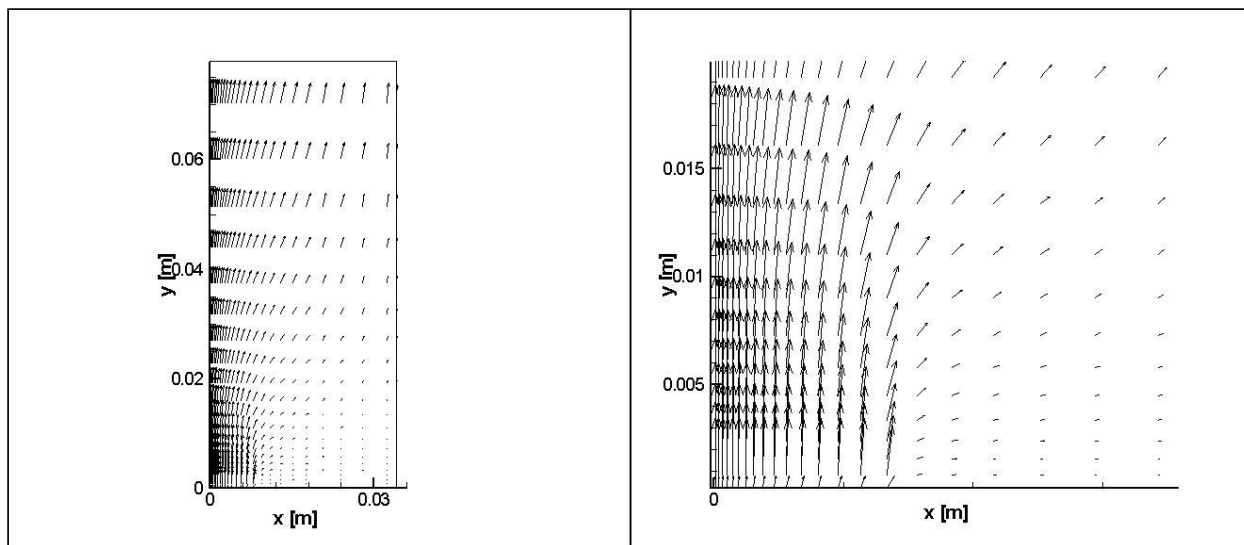


Figura 5.3 – Campo de velocidades dentro do queimador, com $v_{min}^{inlet} = 0,8$ m/s; à esquerda é apresentado todo o domínio; enquanto que, à direita, tem-se o detalhe da região de entrada.

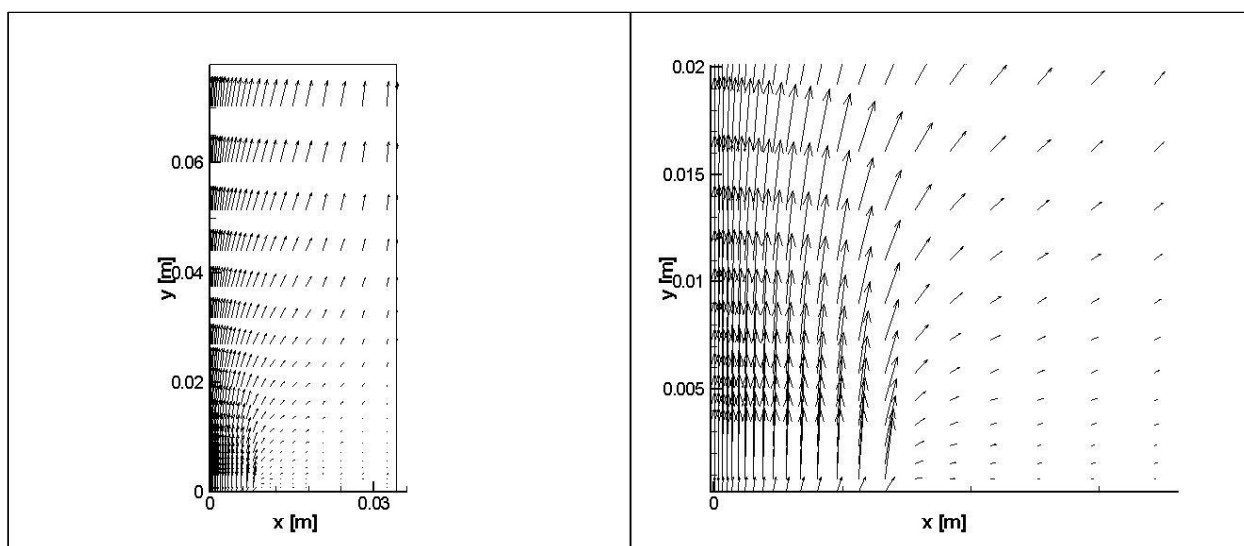


Figura 5.4 – Campo de velocidades dentro do queimador, com $v_{med}^{inlet} = 1,0$ m/s; à esquerda é apresentado todo o domínio; enquanto que, à direita, tem-se o detalhe da região de entrada.

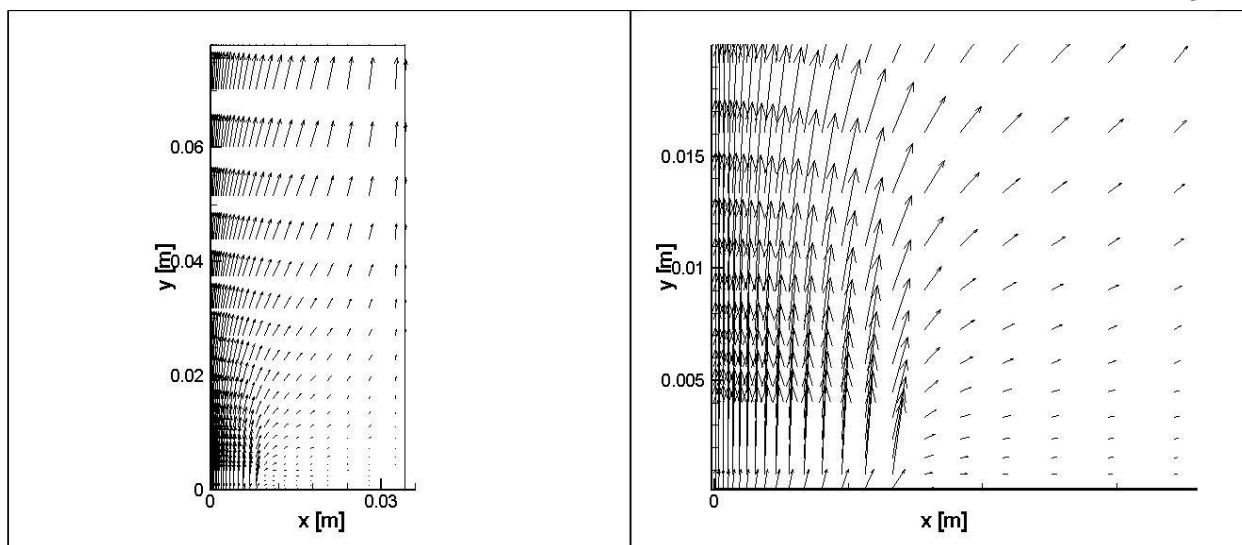


Figura 5.5 – Campo de velocidades dentro do queimador, com $v_{\text{máx}}^{\text{inlet}} = 1,2 \text{ m/s}$; à esquerda é apresentado todo o domínio; enquanto que, à direita, tem-se o detalhe da região de entrada.

Na Figuras 5.3 a 5.5, observa-se que o escoamento apresenta regiões com velocidades muito baixas e pressões relativas também menores. Pode-se visualizar esta situação nos cantos à extrema direita e mais próximos da base, ainda nas figuras mencionadas. Na ausência de um meio poroso dentro do queimador, devido às condições comentadas, poder-se-ia prever a formação de vórtices nesse local. No entanto, na presença do meio poroso, o escoamento é conduzido nesta região com baixas velocidades, mas na direção e sentido do escoamento. Na Figura 5.6, foram traçadas linhas de corrente na área em questão; pode-se confirmar o comportamento descrito anteriormente, com as linhas ocupando essas áreas de baixas velocidades e com sentido e direção do escoamento. Este comportamento apresentado em materiais porosos pode ser explicado pela maior perda de carga resultante da introdução desse material. Esse comportamento observado é equivalente, por exemplo, a um fluido muito viscoso em meios sem a presença do material poroso.

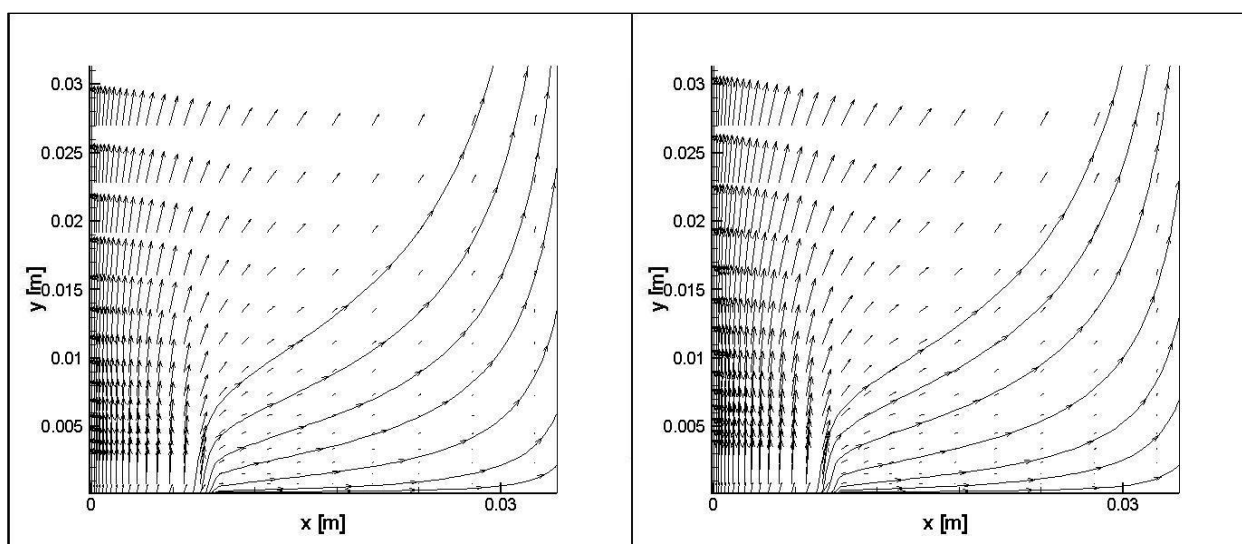


Figura 5.6 – Linhas de corrente em destaque no campo de velocidades; à esquerda, com $v_{\text{mín}}^{\text{inlet}} = 0,8 \text{ m/s}$; à direita, com $v_{\text{méd}}^{\text{inlet}} = 1,0 \text{ m/s}$.

Para se investigar o comportamento do fluxo na saída do queimador, traçaram-se também linhas de corrente nesta região, conforme pode ser visto na Figura 5.7 (para $v_{\text{mín}}^{\text{inlet}} = 0,8\text{m/s}$). Embora tenha-se escolhido esta velocidade para visualização neste trabalho, o comportamento se reproduz para as outras simuladas também. Pode-se então observar que as linhas têm a direção e sentido do fluxo saindo do equipamento, o que condiz com o esperado neste caso.

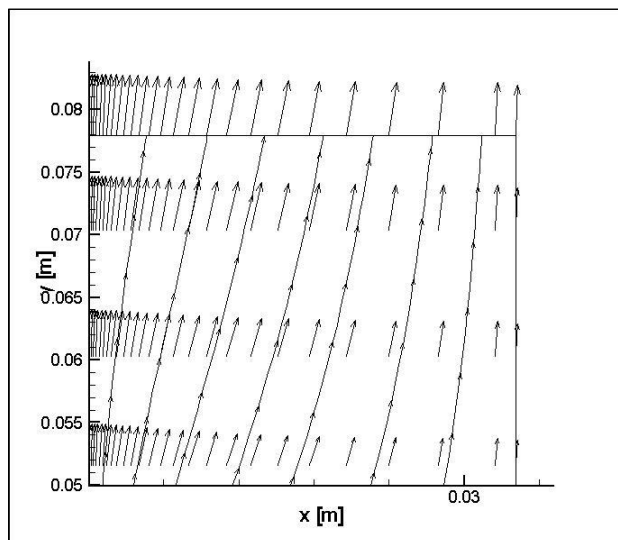


Figura 5.7 - Linhas de corrente em destaque na saída do domínio, com $v_{\text{mín}}^{\text{inlet}} = 0,8\text{ m/s}$.

6 CONCLUSÕES

A modelagem numérica desempenha um importante papel no desenvolvimento de queimadores porosos, permitindo a verificação de novas propostas ou da introdução de modificações em configurações existentes antes da implementação de um modelo real. Por outro lado, a modelagem numérica confronta-se com um conhecimento limitado dos fundamentos dos processos térmicos e dos escoamentos no interior de meios porosos e de como estes processos influenciam a combustão. Por isso, o tratamento numérico dos escoamentos, da transferência de calor e da combustão no interior de meios porosos é de suma importância para o desenvolvimento desta tecnologia.

Neste trabalho, estabeleceu-se os modelos geométricos, físico-matemático e numérico, o que permitiu a implementação de um código para a simulação do escoamento dentro do meio poroso do queimador proposto. Em relação ao processo de combustão, a implementação computacional mostrou-se um objeto de estudo a ser considerado em trabalhos futuros. Por isso, os resultados apresentados foram os obtidos na simulação do escoamento dentro do meio poroso, sem combustão ocorrendo. Pontos relativos ao escoamento foram discutidos, como a ausência de vórtices, mesmo em regiões de baixas velocidades e pressões. Além da influência do meio poroso homogeneizando o fluxo na entrada do queimador, quando simulado um perfil de velocidades parabólico. Comportamentos que foram explicados pelo equacionamento do modelo para perda de carga, baseado na Lei de Darcy.

Seria de grande interessante como continuação deste trabalho a modificação das dimensões do queimador, acrescentando um componente conduzindo a mistura para dentro queimador. Esta configuração foi tratada neste trabalho com a introdução de um perfil parabólico na entrada do domínio. No entanto, o desenvolvimento do escoamento neste componente poderia trazer informações mais ricas sobre a condição de entrada do fluxo. Além disso, a consideração de regimes turbulentos, de trocas radiantes e de processos de

combustão com mais passos (“multi-step”) poderia trazer maiores informações para o desenvolvimento de queimadores em meios porosos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARCELLOS, W.M.; SOUZA, L.C.O.; FILHO, J.J.H.; BANANEIRA, E.L.Q.; BESERRA, I.H.V. **“Combustão do Gás Natural em Protótipo de Caldeira Não-Convencional de Queimador Poroso”**. Publicado no 4º PDPETRO, Campinas, SP. 2007.

BORDIN, F. S. **“Desenvolvimento de combustível modelo para estudo da combustão de biogás produzido na degradação anaeróbia de resíduos sólidos urbanos”**. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ano de obtenção 2011.

CHAPIRO, G. **“Gas-Solid Combustion in Insulated Porous Media”**. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Matemática pelo Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada. Ano de obtenção 2009.

HAYASHI, T. C. **“Multidimensional modelling and calculation of combustion in porous media”**. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico. Ano de obtenção 2005.

HSU, P.-F., EVANS, W.D. E HOWELL, J.R **“Experimental and numerical study of premixed combustion with nonhomogeneous porous ceramics”**, Combustion Science and Technology, 90, pg. 149-172, 1993.

KAVIANY, M. **“Principles of heat transfer in porous media”**. 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1995.

LAMMERS, F.A. E DE GOEY, L.P.H. **“A numerical study on flash back of laminar premixed flames in ceramic-foam surface burners”**, Combustion and Flame, 133, pg. 47-61, 2003.

MACDONALD, I.F.; EL-SAYED, M.S.; MOW, K. E DULLIEN, F.A.L. **“Flow through porous media – The Ergun equation revisited”**. Industrial Engineering Chemistry Fundamentals, 18, pg.199-208, 1979.

MALICO, I. **“Modelação e cálculo de sistemas de combustão com pré-mistura no interior de meios porosos”**. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de Evora. Ano de obtenção 2001.

NICOLAS, M. **“Ecoulements dans les milieux poreux”**, <http://iusti.polytech.univ-mrs.fr/>. Acessado em 25/04/2012.

PATANKAR, S. V. **“Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”**, McGraw Hill, New York, 1980.

PEREIRA, F. M. **“Analysis of the premixed flame structure within porous inert media and development of a level set model for numerical simulations”**. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Ano de obtenção 2009.

Sítio da companhia Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras, **“Plano de Negócios 2011 – 2015”**, <http://www.petrobras.com.br>. Acessado em 08/06/2012.