

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

JADERSON NUNES PRETTI

**ESTUDO DE BENCHMARKING DO CFD GRATUITO OPENFOAM:
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM NÃO-
EQUILÍBRIO TÉRMICO LOCAL E TRANSIENTE NUMA FRENTE DE
COMBUSTÃO SMOULDERING**

**VITÓRIA
2015**

JADERSON NUNES PRETTI

**ESTUDO DE BENCHMARKING DO CFD GRATUITO OPENFOAM:
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM NÃO-
EQUILÍBRIO TÉRMICO LOCAL E TRANSIENTE NUMA FRENTE DE
COMBUSTÃO SMOULDERING**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins.

VITÓRIA

2015

JADERSON NUNES PRETTI

**ESTUDO DE BENCHMARKING DO CFD GRATUITO OPENFOAM:
MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM NÃO-
EQUILÍBRIO TÉRMICO LOCAL E TRANSIENTE NUMA FRENTE DE
COMBUSTÃO SMOULDERING**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovado em ____ de _____ de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Márcio Ferreira Martins, Ph.D.
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Fernando César Meira Menandro, Ph.D.
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador interno

Dr. Antônio Geraldo de Paula Oliveira, Ph.D.
Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Examinador externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por mais esta realização e conquista em minha vida.

Aos meus familiares que tanto amo por todo apoio e por toda confiança depositada em mim.

Agradeço ao meu Professor orientador Márcio Ferreira Martins por ter sido mais que um professor, um grande amigo que acreditou no desafio e me ajudou a concretizar.

Agradeço aos meus docentes pelo conhecimento que me foi passado, fortalecendo minha habilidade de raciocinar sobre um problema e com isso desenvolver soluções.

Agradeço, em especial, aos irmãos Artur Maioli e Caio Maioli por toda ajuda e apoio prestados.

Agradeço à minha namorada Juliana pelo incentivo e paciência nos momentos de ausência.

Para concluir, presto meu agradecimento à CAPES, pelo auxílio financeiro ajudando assim no desenvolvimento deste trabalho.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

Com o constante aumento da demanda energética é necessário o estudo de fontes alternativas de energia bem como técnicas para sua conversão em trabalho útil em diferentes escalas de consumo. Outro fator importante é que a humanidade está produzindo cada vez mais resíduos sólidos, e neste, existe um potencial energético que não pode ser negligenciado. Neste contexto, a combustão se mostra uma boa alternativa para o reaproveitamento energético desses resíduos, no entanto, é indispensável um entendimento do processo, bem como das variáveis de operação. Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma modelagem para as equações de energia que governam a transferência de calor em um meio poroso reativo das fases sólida e gasosa e, ao mesmo tempo, simular o processo de combustão *smouldering* em meio poroso utilizando um *software* de simulação gratuito, o OpenFOAM, principal ferramenta utilizada neste trabalho. É apresentado para o leitor uma concisa descrição do pacote de simulação utilizado juntamente com suas principais características. Os resultados simulados são comparados com resultados experimentais obtidos pela célula de combustão instrumentada desenvolvida no Laboratório de Combustíveis e Combustão da Universidade Federal do Espírito Santo para estudos da combustão em meio poroso. Por último, apresenta-se a influência de parâmetros físicos, como espessura da frente, fração volumétrica de sólido e velocidade de resfriamento, na evolução da temperatura simulada no interior do leito.

Palavras chave: fontes alternativas de energia, combustão *smouldering* e OpenFOAM

ABSTRACT

With constant increase of energy demand it is necessary to study alternative energy sources as well as techniques to convert it into useful work on different consume scales. Another important factor is that humanity is producing more and more waste, and there is a potential energy associated to it that can not be neglected. In this scenario, combustion appears as a good alternative for energy recycling of waste, however, a detailed understanding of the process and the operating variables is indispensable.

This paper presents a model for the energy equations governing heat transfer in a reactive porous media of solid and gaseous phases and at the same time, simulate the process of smouldering combustion in porous media using a free simulation software, OpenFOAM, main tool used in this work.

A concise description of the simulation package used is presented to the reader as well as its main characteristics. The simulated results are compared with experimental results obtained from a combustion cell developed in Fuel and Combustion Laboratory of the Federal University of Espírito Santo.

Finally, it is shown the influence of physical parameters such as thickness of the front, volume fraction of solid and cooling rate in simulated temperature evolution within the bed.

Keywords: *alternative energy sources, smouldering combustion and OpenFOAM.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquemático do modelo de combustão <i>smouldering</i> unidimensional utilizado por TORERO [1992].....	20
Figura 2: Estruturas de propagação de uma frente de combustão; (a) $\Delta < 1$, (b) $\Delta > 1$ e (c) $\Delta = 1$	25
Figura 3: Ilustração da microestrutura do leito, e mecanismos inclusos na formulação microscópica do problema.	30
Figura 4 - Croqui do combustor utilizado por Shin e Choi	31
Figura 5 – Curvas de evolução de temperatura obtidas por Shin e Choi: (a) real e (b) simulado	32
Figura 6 - Célula de combustão LCC	33
Figura 7: Croqui Célula de Combustão	36
Figura 8: Interpretação física dos Grupos Adimensionais	42
Figura 9 – Alguns <i>solvers</i> implementados no OpenFOAM 1.2.....	48
Figura 10: Estrutura de um caso no OpenFOAM	51
Figura 11: Solução <i>my_icoFoam</i>	64
Figura 12: Distribuição de temperatura em uma placa, sem geração (esquerda) e com geração (direita).	65
Figura 13: Campo de velocidade (esquerda), campo de pressão (centro) e distribuição de temperatura (direita).....	66
Figura 14: Simulação da combustão do metano com ar	67
Figura 15: Sintaxe de equações no OpenFOAM.....	75
Figura 16: (a) Malha 1 e (b) malha 3	77
Figura 17: Efeito do número de nós na simulação de evolução da temperatura da fase sólida das fezes, termopar T12.	80
Figura 18: (a) vista isométrica e (b) frontal do meio contido no interior da célula de combustão, respectivamente.....	81
Figura 19: Croqui Célula de Combustão	82
Figura 20: Representação geométrica da célula de combustão e disposição física dos termopares	83
Figura 21: Representação das condições iniciais e de contorno do problema	84
Figura 22: Evolução de temperatura ao longo do tempo - (a) Carvão e (b) Fezes	85

Figura 23 - Evolução de temperatura: (a) real e (b) simulada	87
Figura 24: Comparação entre a evolução de temperatura real e simulada, termopar T3 e T4.....	88
Figura 25 - Espessuras simuladas	92
Figura 26 - Efeito da espessura da frente de chama.....	92
Figura 27 - Evolução de temperatura: (a) real e (b) simulada	93
Figura 28 - Simulação da temperatura das fezes no interior do leito	94
Figura 29 - Efeito da fração volumétrica de sólido	95
Figura 30 - Efeito da velocidade de resfriamento	96
Figura 31 – Evolução da temperatura das fezes: (a) fase gasosa e (b) fase sólida.....	104
Figura 36 - Evolução de temperatura das fezes para diferentes espessuras da frente: (a) fase gasosa e (b) fase sólida	105
Figura 37- Evolução de temperatura das fezes para diferentes porosidades do leito: (a) fase gasosa e (b) fase sólida.....	106
Figura 32 - Evolução de temperatura para a fase sólida do carvão: (a) $V_{gás}=0,04m/s$ e (b) $V_{gás}=0,004m/s$	107
Figura 33- Evolução de temperatura para a fase gasosa do carvão: (a) $V_{gás}=0,04m/s$ e (b) $V_{gás}=0,004m/s$	107
Figura 34- Evolução de temperatura para a fase sólida das fezes: (a) $V_{gás}=0,04m/s$ e (b) $V_{gás}=0,004m/s$	108
Figura 35- Evolução de temperatura para a fase gasosa das fezes: (a) $V_{gás}=0,04m/s$ e (b) $V_{gás}=0,004m/s$	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de parâmetros de simulação	70
Tabela 2 - Esquemas de discretização.....	71
Tabela 3 - Número de nós das malhas utilizadas.....	77
Tabela 4 - Número de nós das malhas utilizadas e desvios percentuais máximos de temperatura.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

NOMENCLATURA

t	Tempo, s
x	Posição no eixo x, m
Q,q	Taxa de geração de calor, $J.s^{-1}.m^{-3}$
T	Temperatura, K
v	Velocidade, $m.s^{-1}$
Cp	Capacidade calorífica, $J.kg^{-1}.k^{-1}$
h	Coefficiente de transferência térmica convectiva, $J.s^{-1}.m^{-2}.k^{-1}$
Γ	Coefficiente de troca, $J.s^{-1}.m^{-3}.K^{-1}$
ρ	Densidade, $kg.m^{-3}$
λ, K	Condutividade térmica, $J.s^{-1}.m^{-3}.K^{-1}$
ε	Fração volumétrica
R	Constante universal dos gases perfeitos, $J.K^{-1}.mol^{-1}$
S	Termo de geração de calor, W/m^3
U,u	Velocidade, m/s
U_s	Velocidade de propagação da frente, m/s
α	Difusividade térmica, m^2/s
v	Coefficiente estequiométrico
[]	Concentração
ϕ	Fração de vazios
L	Comprimento, m
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$
Y	Fração mássica

Índices subscritos

g	gás
s	sólido
f	fluido
fs	final do sólido
amb	ambiente
A	ar
gp	gaseous products (produtos gasosos)
F	Foam
rad	radiação
o	oxigênio
CH	char (carvão)
eff	efetivo
in	entrada
out	saída
ad	adiabático(a)

Índices sobrescritos

.	por unidade de tempo
"	por unidade de área
'''	por unidade de volume

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1 ESTADO DA ARTE DA COMBUSTÃO EM MEIO POROSO REATIVO	19
1.1 MODELOS TEÓRICOS OU ANALÍTICOS	19
1.2 MODELOS NUMÉRICOS	26
1.3 MODELOS EXPERIMENTAIS	30
2 DETERMINAÇÃO E INTERPRETAÇÃO FÍSICA DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS QUE REGEM A TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA FASE SÓLIDA DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÃO INSTRUMENTADA	35
2.1 ANÁLISE DIMENSIONAL	35
2.2 METODOLOGIA	36
2.2.1 Apresentação do Problema	36
2.2.2 Modelo Discreto por Diferenças Finitas	38
2.2.3 Teorema Pi de Buckingham	39
2.2.4 Determinação dos grupos adimensionais para a equação de energia da fase sólida	40
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DESTE ARTIGO	41
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DESTE ARTIGO	44
3 A FERRAMENTA OPENFOAM	46
3.1 RAZÕES PARA ESCOLHA DO OPENFOAM COMO PACOTE DE SIMULAÇÃO	47
3.2 ESTRUTURA DE UM CASO	51
3.3 PRÉ-PROCESSAMENTO	52
3.3.1 Geração e importação de malhas	52
3.4 COMO ALTERAR UM SOLVER	54
3.5 EXEMPLOS PRÉVIOS	64

3.5.1	Difusão do Calor em uma placa quadrada	64
3.5.2	Fluidodinâmica com transferência de calor	66
3.5.3	Combustão do metano com ar.....	67
4	MODELAGEM NUMÉRICA TRANSIENTE EM NÃO EQUILÍBRIO TÉRMICO LOCAL DA COMBUSTÃO SMOULDERING	69
4.1	EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	71
4.2	CRIAÇÃO DO <i>SOLVER</i>	73
4.3	ESTUDO DA MALHA	76
4.3.1	Teste de Malhas.....	78
4.4	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	81
4.5	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	85
4.5.1	Características da matéria-prima simulada	85
4.5.2	Comparação entre a evolução de temperatura real e simulada.....	86
5	INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FÍSICOS NA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO LEITO.....	91
5.1	EFEITO DA ESPESSURA DA FRENTE DE CHAMA.....	91
5.2	EFEITO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDO NO LEITO.....	95
5.3	EFEITO DA VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO	96
6	CONCLUSÃO.....	99
	PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DAS FEZES PARA TESTE DE MALHA.....	103
	APÊNDICE B – GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DAS FEZES PARA DIFERENTES ESPESSURAS DA FRENTE DE CHAMA	105
	APÊNDICE C – GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DAS FEZES PARA DIFERENTES FRAÇÕES VOLUMÉTRICAS DE SÓLIDO NO LEITO.....	106

**APÊNDICE D – GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DO
CARVÃO PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE RESFRIAMENTO.....107**

**APÊNDICE E – GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DAS
FEZES PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE RESFRIAMENTO108**

INTRODUÇÃO

Estudo de *benchmarking* traduz-se num processo através do qual se observa, aprende e melhora, podendo ser aplicado a diversas áreas de pesquisa. O objetivo principal de se fazer um estudo de *benchmarking* é implementar mudanças que levem a melhorias significativas em um determinado produto, processo ou prática de gestão de uma entidade e, conseqüentemente, nos seus resultados. Além disso, tem como finalidade manter um processo de melhoria contínua. As seguintes fases devem ser consideradas para se realizar um estudo de *benchmarking*:

Planejar → Coletar → Analisar → Adaptar → Melhorar

O presente trabalho é motivado por um estudo *benchmarking* do CFD gratuito de simulação, OpenFOAM, visando a aplicação deste *software* a um modelo físico que considerando algumas hipóteses e simplificações, simule a transferência de calor numa frente de combustão *smouldering*. Portanto, pode-se notar então, que neste trabalho existe uma ponderação onde almeja-se estudar a aplicação de um *software* gratuito de simulação em problemas relacionados à combustão *smouldering*, e ao mesmo tempo, apresentar um modelo físico para a representação da combustão em meio poroso reativo considerando algumas simplificações. Desde já, esclare-se que na modelagem a ser apresentada a energia liberada pelo processo de combustão é substituída por um termo fonte de geração de calor. Este termo fonte está associado a um número onde são consireradas propriedades termofísicas do combustível em estudo, como massa específica e poder calorífico.

Monhol, Pretti e Matins (2013) conceberam e calibraram uma célula de combustão versátil, minuciosamente instrumentada, capaz de fornecer dados para estudos do processo de combustão de diferentes resíduos sólidos sob diferentes configurações de reator (co-corrente ou contracorrente). Vários tipos de combustíveis e resíduos estão sendo estudados por alunos de mestrado e graduação onde pode-se caracterizar para estes combustíveis aspectos físicos tais como temperatura do leito e evolução de pressão do leito; parâmetros da frente de combustão, como por exemplo, formato e velocidade da frente de combustão; e análises de gás.

Entretanto, para complementar e validar os resultados obtidos experimentalmente faz-se necessário aplicar modelos numéricos para as equações de governo para transporte, energia e espécie. Sabe-se que estas equações de governo geralmente não fazem parte de pacotes CFD comerciais como Ansys, CFX, FLUENT, entre outros, além disso, os preços dos pacotes comerciais somam uma quantia enorme ao usuário final, em média US\$25.000 para uma única licença em período de um ano, fato que limita seu uso, (SILVA, 2007, apud MAIOLI A. G. e MAIOLI C. G., 2013).

Diante do contexto descrito acima, o ponto de partida deste trabalho é estudar um *software* gratuito, e de código aberto para a aplicação de modelos numéricos para a célula de combustão.

Dentre os objetivos primários deste trabalho podem-se destacar os seguintes:

- Propor um modelo simplificado para o processo de combustão utilizando as equações de energia onde a combustão é substituída por um termo fonte de geração de calor.
- Estudar a influência de parâmetros físicos na simulação da combustão em meio poroso.

Dentre os objetivos secundários deste trabalho podem-se destacar os seguintes:

- Desenvolver e implementar no OpenFOAM um *solver* para a modelagem numérica do processo de combustão *smouldering* em meio poroso, e resolver numericamente as equações de governo para a transferência de calor no interior do leito para as fases sólida e gasosa.
- Deixar um legado no que diz respeito aos processos de alteração e criação de *solvers* no OpenFOAM para auxiliar alunos que utilizarão esta ferramenta em trabalhos de pesquisa.
- Apresentar propostas de estudos futuros.

O presente trabalho é dividido em seis capítulos.

- O primeiro capítulo apresenta uma revisão da literatura de como alguns autores abordam a combustão em meio poroso tanto no âmbito analítico quanto numérico e experimental.
- O segundo capítulo é baseado em um artigo publicado pelos autores Jaderson N. Pretti e Márcio F. Martins nos anais do CONEM 2014, realizado em Uberlândia – MG de 10 a 15 de agosto do mesmo ano.
- O terceiro capítulo se dedica a apresentar a principal ferramenta utilizada neste trabalho, o OpenFOAM, destacando suas principais vantagens e desvantagens. Também é apresentada a metodologia utilizada para gerar e importar malhas a partir de outros *softwares* como SALOME, por exemplo, e por último descreve-se um passo a passo de como alterar um *solver* existente no pacote do OpenFOAM mostrando alguns exemplos prévios.
- O quarto capítulo se dedica a apresentar a modelagem numérica em não equilíbrio térmico local, transiente, para ambas as fases presentes no meio poroso, sólida e gasosa. São apresentadas as hipóteses utilizadas no desenvolvimento deste modelo e as condições de contorno e iniciais adotadas. Também é apresentada a validação dos ensaios realizados na célula de combustão pela comparação de resultados obtidos experimentalmente com resultados simulados numericamente no OpenFOAM.
- O quinto capítulo apresenta a influência de parâmetros físicos, como por exemplo, espessura da frente de chama, porosidade do leito e velocidade de resfriamento, na evolução de temperatura no interior do leito.
- No último capítulo é apresentada uma conclusão para o presente trabalho, e também, sugere-se propostas para estudos futuros.

Capítulo 1:

Estado da Arte da Combustão em Meio Poroso Reativo

“Obs: este capítulo dedica-se a apresentar alguns dos principais trabalhos dedicados à simulação de combustão tanto no âmbito teórico ou analítico, quanto numérico. Apresenta-se também, trabalhos experimentais dedicados aos estudos da combustão em meio poroso.”

1 ESTADO DA ARTE DA COMBUSTÃO EM MEIO POROSO REATIVO

A combustão é uma das mais antigas tecnologias da humanidade e vem sendo usada por mais de um milhão de anos para diferentes propósitos. Neste contexto, numerosos trabalhos dedicam-se aos estudos da combustão em meio poroso, onde a combustão é estudada por dispositivos ou aparatos experimentais, ou através de modelos que são desenvolvidos por pesquisadores.

Diversas são as maneiras para a modelagem da combustão em meio poroso, haja vista a grande diversidade de configurações e condições adotadas na construção de um modelo. Estes modelos dedicados aos estudos da combustão subdividem-se em dois grupos, os modelos teóricos ou analíticos, onde a velocidade da frente de combustão, por exemplo, pode ser determinada analiticamente, e os modelos numéricos nos quais necessita-se de recursos computacionais para resolver as equações diferenciais da modelagem adotada.

1.1 MODELOS TEÓRICOS OU ANALÍTICOS

Embora os modelos analíticos para estudos da combustão tenham sido desenvolvidos há um certo tempo, muitos autores até hoje fazem uso destes modelos em pesquisas e trabalhos recentes deste gênero [(YANG; THOVERT; DEBENEST, 2015); (DEBENEST; MOURZENKO; THOVERT, 2005a) e (DEBENEST; MOURZENKO; THOVERT, 2005b)].

No âmbito dos modelos teóricos ou analíticos, (TORERO, 1992) utilizou uma modelagem da combustão *smouldering*, desenvolvida por (DOSANJH et al. 1992 apud Torero 1992), para correlacionar parâmetros da frente de combustão. Para facilitar a compreensão e a discussão da correlação, uma breve descrição do modelo é dada aqui.

O modelo considera a configuração contra-corrente, a Figura 1 a seguir apresenta um esquemático desta modelagem. Uma vez que a combustão *smouldering* é

geralmente limitada pela quantidade de oxigênio, o calor liberado pela reação de combustão pode ser expresso em termos do fluxo de massa de oxidante na zona de reação. Este calor é transportado por condução e radiação a montante da zona de reação, e sustenta a propagação da frente de combustão *smouldering*. Deve-se notar que os combustíveis de interesse neste tipo de combustão são muito porosos e, por conseguinte, a condução é um modo relativamente pobre de transferência de calor. Assim, a transferência de calor por radiação torna-se um importante mecanismo no transporte de energia.

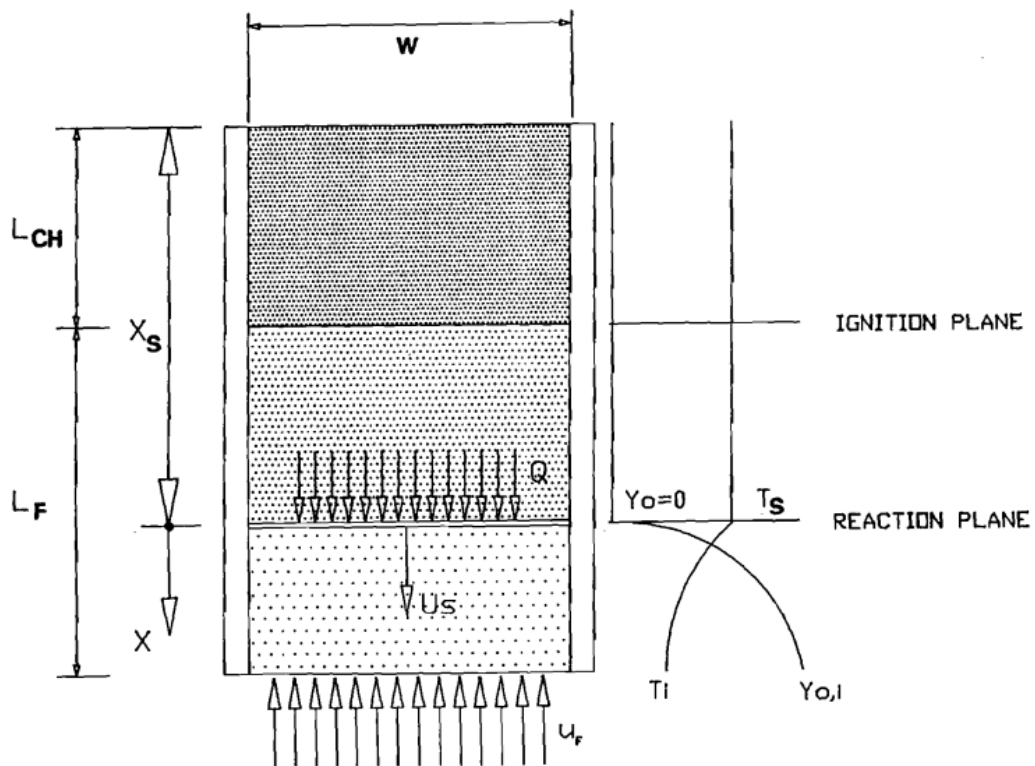
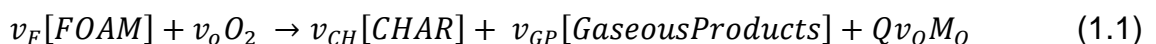


Figura 1: Esquemático do modelo de combustão *smouldering* unidimensional utilizado por TORERO [1992]

Fonte: TORERO [1992]

O modelo considera a reação de combustão em passo único da seguinte maneira:



O modelo é considerado unidimensional e em regime permanente. Assume-se que o gás e o sólido estão em equilíbrio térmico local, e a fase sólida é considerada contínua com uma fração volumétrica de vazios constante. Transporte de energia

devido a gradientes de concentração, energia dissipada por viscosidade, o trabalho realizado pelas forças de corpo, e a energia cinética da fase gasosa são ignorados. Além disso, uma vez que a velocidade da frente de combustão *smouldering* é muito menor do que as velocidades dos fluxos, estas velocidades podem ser tomadas em quantidades conhecidas em cada localização da amostra, X_s .

Com as considerações acima, e desprezando as perdas de calor para o ambiente, a forma unidimensional da equação da conservação de energia torna-se:

$$(\dot{m}''_F c_{p_F} + \dot{m}''_{AIR} c_{p_A}) \frac{dT}{dx} = (\lambda_{eff} + \lambda_{rad}) \frac{d^2T}{dx^2} + Q \frac{d\dot{m}''_O}{dx} \quad (1.2)$$

Onde os fluxos de massa de combustível e oxigênio que entram na zona de reação são dados por:

$$\dot{m}''_F = (1 - \phi) \rho_F U_s \quad (1.3a)$$

$$\dot{m}''_A = \rho_A u_g \quad (1.3b)$$

$$\dot{m}''_O = Y_O \dot{m}''_A - \phi \rho_A D \frac{\partial Y_O}{\partial x} \quad (1.3c)$$

A radiação é incorporada na análise, usando uma aproximação com a difusão:

$$\lambda_{eff} = \phi \lambda_A + (1 - \phi) \lambda_F \quad (1.4)$$

A condutividade térmica equivalente é dada por:

$$\lambda_{rad} = \frac{16\sigma d_p T^3}{3} \quad (1.5)$$

As condições de contorno para a equação acima são:

Em $x = x_s$:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (1.6a)$$

$$T = T_s \quad (1.6b)$$

$$\dot{m}''_O = 0 \quad (1.6c)$$

Em $x \rightarrow \infty$:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (1.7a)$$

$$T = T_i \quad (1.7b)$$

$$\dot{m}''_O = \dot{m}''_{O,i} \quad (1.7c)$$

Integrando com relação a x de X_s ao infinito, a seguinte expressão é obtida para a velocidade de propagação *smouldering*:

$$U_s = \frac{\rho_A [QY_{O,i} - Cp_A(T_s - T_i)]}{\rho_F Cp_F(1 - \phi)(T_s - T_i)} u_g \quad (1.8)$$

Ainda no âmbito dos modelos teóricos ou analíticos, [(SCHULT et al. 1995), (ALDUSHIN, RUMANOV and MATKOWSKY 1999), (DEBENEST 2003); apud (MARTINS, 2008)] estudaram um outro modelo para estimar a velocidade de propagação de uma frente, e a máxima temperatura de uma frente de combustão. O modelo é unidimensional e considera uma única temperatura. A solução analítica é baseada em uma série de hipóteses propostas por (SCHULT et al., 1995, apud MARTINS, 2008).

A concentração de oxigênio é caracterizada por valores a montante e a jusante da frente de combustão, $[O_2]_{in}$ e $[O_2]_{out}$, e o mesmo é válido para a concentração de carbono fixo $[C]_{in}$ e $[C]_{out}$. Considerando a hipótese de regime estacionário pode-se dizer que as diferenças entre as concentrações de oxigênio $[O_2]_{in}$ e $[O_2]_{out}$, e carbono

fixo $[C]_{in}$ e $[C]_{out}$ são constantes, e ligadas à sua estequiometria. Este relacionamento pode ser escrito da seguinte forma:

$$\varepsilon \cdot v^* ([O_2]_{in} - [O_2]_{out}) = (1 - \varepsilon) \cdot U_f ([C]_{in} - [C]_{out}) \quad (1.9)$$

Onde v^* é a velocidade intersticial do gás, e U_f é a velocidade da frente de combustão dada por:

$$U_f = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \frac{[O_2]_{in} - [O_2]_{out}}{[C]_{in} - [C]_{out}} v^* \quad (1.10)$$

Considerando as hipóteses supracitadas a equação de energia é dada por:

$$\begin{aligned} \varepsilon \rho_g c p_g + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s c p_s \frac{\partial T}{\partial t} + \{ \varepsilon \rho_g c p_g v^* - [\varepsilon \rho_g c p_g + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s c p_s] U_f \} \frac{\partial T}{\partial x} \\ - \lambda^* \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \delta_{XF} H_S \end{aligned} \quad (1.11)$$

Onde, λ^* é o coeficiente efetivo de condução, H_S é uma fonte de calor localizada na frente de combustão e a função Delta de Dirac δ_{XF} .

Associando a fonte de calor com a velocidade da frente, tem-se:

$$H_S = (1 - \varepsilon) \cdot ([C]_{in} - [C]_{out}) \cdot U_f \cdot \Delta h_C = \varepsilon \cdot ([O_2]_{in} - [O_2]_{out}) \cdot v^* \cdot \Delta h_C \quad (1.12)$$

Onde Δh_C é a entalpia de reação para $C + O_2 \rightarrow CO_2$.

A temperatura adiabática pode ser obtida pela relação entre a produção de calor, pela reação de oxidação, e a capacidade volumétrica global de calor:

$$T_{ad} = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot ([C]_{in} - [C]_{out}) \cdot \Delta h_C}{\varepsilon \rho_g c p_g + (1 - \varepsilon) \rho_s c p_s} \quad (1.13)$$

Introduzindo a variável \hat{D} :

$$\hat{D} = \frac{\lambda^*}{\varepsilon\rho_g C p_g + (1 - \varepsilon)\rho_s C p_s} \quad (1.14)$$

O balanço de energia pode ser escrito como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\varepsilon\rho_g C p_g v^*}{\varepsilon\rho_g C p_g + (1 - \varepsilon)\rho_s C p_s} - U_f \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - \hat{D} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \delta_{XF} \cdot U_f \cdot T_{ad} \quad (1.15)$$

A solução em regime permanente da equação acima é dita ser constante por partes, onde a constante é uma função exponencial dada por:

$$\left| \frac{x}{\Lambda} \right| \quad (1.16)$$

Onde:

$$\Lambda = \frac{\hat{D}}{U_f |1 - \Delta|} \quad (1.17)$$

E:

$$\Delta = \frac{\varepsilon\rho_g C p_g v^*}{\varepsilon\rho_g C p_g + (1 - \varepsilon)\rho_s C p_s U_f} = \frac{(1 - \varepsilon)\rho_g C p_g}{\varepsilon\rho_g C p_g + (1 - \varepsilon)\rho_s C p_s} \cdot \frac{([C]_{in} - [C]_{out})}{([O_2]_{in} - [O_2]_{out})} \quad (1.18)$$

É importante notar que o valor de Δ não é uma função da taxa de geração de energia, mas somente das capacidades caloríficas do sólido e do gás, e suas concentrações.

Foram identificados três tipos de estruturas para a propagação da frente de uma combustão em trabalhos anteriores (RABINOVICH; GUREVICH, 1984), [(ALDUSHIN, 1990), (ALDUSHIN, 1993) and (SCHULT, et al. 1995), apud (MARTINS, 2008)]. (ALDUSHIN; RUMANOV; MATKOWSKY, 1999) apresentaram um esquemático para ilustrar as três estruturas de combustão, Figura 2.

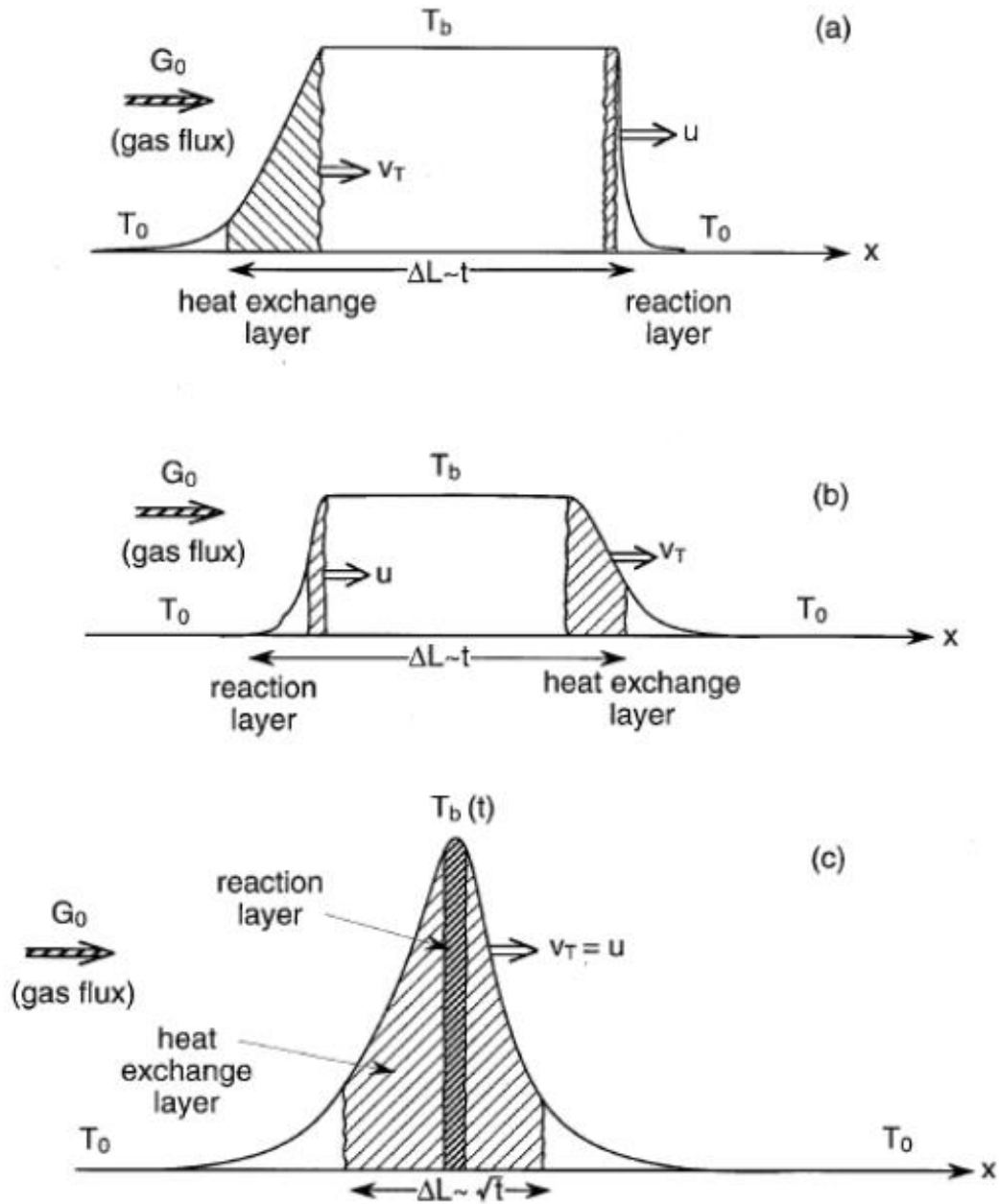


Figura 2: Estruturas de propagação de uma frente de combustão; (a) $\Delta < 1$, (b) $\Delta > 1$ e (c) $\Delta = 1$

Fonte: Martins [2008]

Na primeira estrutura, se $\Delta < 1$, a zona de combustão precede a zona de transferência de calor, o sólido transfere calor para o gás de entrada (fresco e frio), para levá-lo em equilíbrio térmico com o sólido. Uma vez que os processos em duas zonas são diferentes, cada um progride com sua própria velocidade. Neste tipo de estrutura, a zona de reação progride mais rápido, e portanto, à frente da zona de transferência de calor.

Na segunda estrutura, se $\Delta > 1$, a zona de transferência de calor precede a zona de reação. Observações experimentais de ambos os casos apresentaram o efeito superadiabático. O caso $\Delta = 1$ separa as duas estruturas anteriores e corresponde a uma temperatura de combustão T_b infinita, ou seja, não são mais possíveis soluções para descrever a propagação da frente de combustão. No entanto, esta situação corresponde às condições onde o efeito superadiabático se manifesta mais fortemente.

Uma vez apresentados alguns dos principais modelos analíticos da combustão, são apresentados agora alguns modelos numéricos dedicados aos estudos da combustão. Estes modelos são divididos em modelos numéricos de macroescala, ou escala de Darcy, e modelos em microescala.

1.2 MODELOS NUMÉRICOS

Modelos numéricos em macroescala [(OHLEMILLER, 1985), (KIEHNE, WILSON and MATTHEWS, 1990), (MOALLEMI, ZHANG AND KUMAR, 1993), (FATEHI and KAVIANY, 1994), (AKKUTLU and YORTSOS, 2003), (OLIVEIRA and KAVIANY, 2001), (BIYIKOGLU and SIVRIOGLU, 2004), (YANG, SHARIFI and SWITENBANK, 2004), (ZHOU, et al., 2005), (RYU, et al., 2006), (REIN, et al. 2006), apud (MARTINS, 2008)] permitem simulações numéricas na escala de Darcy, ou seja, uma descrição de um meio contínuo com propriedades efetivas (condutividade térmica, capacidade calorífica, etc) e variáveis médias (temperatura, concentração, etc). Os vários parâmetros efetivos envolvidos, quando aplicáveis, não estão na sua forma trivial, e sua validação é uma questão aberta em muitos casos.

A abordagem clássica é o princípio da temperatura média volumétrica local, descrita por [(WHITAKER, 1977) and (KAVIANY, 1995), apud (MARTINS, 2008)]. Considerando o caso de meio poroso isotrópico, onde efeitos de radiação, dissipação viscosa e o trabalho realizado por mudanças no campo de pressão são negligenciados, as equações de conservação de energia para as fases sólida (s) e fluida (f) são dadas por:

$$(\rho C p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (K_s \nabla T_s) + h_c (T_s - T_f) + \ddot{q}_s \quad (1.19a)$$

$$(\rho C p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho C p)_f \vec{V} \cdot \nabla T_f = \nabla \cdot (K_f \nabla T_f) + h_c (T_f - T_s) + \ddot{q}_f \quad (1.19b)$$

Cp é o calor específico; K é a condutividade térmica; q e o termo de taxa de geração de calor por unidade de volume.

Com base na média de volume local, [(WHITAKER, 1977) and (KAVIANY, 1995), apud (MARTINS, 2008)], as equações de conservação de energia podem ser escritas como:

$$(1 - \varepsilon)(\rho C p)_s \frac{\partial \langle T_s \rangle}{\partial t} = (1 - \varepsilon) \nabla \cdot (K_s \nabla \langle T_s \rangle) + (1 - \varepsilon) [h_c (\langle T_s \rangle - \langle T_f \rangle) + \ddot{q}_s] \quad (1.20a)$$

$$\varepsilon(\rho C p)_f \frac{\partial \langle T_f \rangle}{\partial t} + \varepsilon(\rho C p)_f \vec{V} \cdot \nabla \langle T_f \rangle = \varepsilon \nabla \cdot (K_f \nabla \langle T_f \rangle) + \varepsilon [h_c (\langle T_f \rangle - \langle T_s \rangle) + \langle \ddot{q}_f \rangle] \quad (1.20b)$$

Onde ε é a porosidade e $\langle T_{s,f} \rangle$ representa a temperatura média de volume local para o sólido e o fluido, respectivamente.

Assumindo que há um perfeito contato entre as fases sólida e fluida, pode-se utilizar a hipótese de equilíbrio térmico local entre as fases, logo:

$$\langle T_f \rangle = \langle T_s \rangle = \langle T \rangle \quad (1.21)$$

Somando as equações de conservação de energia e supondo equilíbrio térmico local:

$$(\rho C p)_{eff} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \varepsilon(\rho C p)_f \vec{V} \cdot \nabla \langle T \rangle = \nabla \cdot (K_{eff} \nabla \langle T \rangle) + \langle \ddot{q}_{eff} \rangle \quad (1.22)$$

Onde:

$$(\rho C p)_{eff} = (1 - \varepsilon)(\rho C p)_s + \varepsilon(\rho C p)_f \quad (1.23a)$$

$$K_{eff} = (1 - \varepsilon)K_S + \varepsilon K_f \quad (1.23b)$$

$$\langle \ddot{q}_{eff} \rangle = (1 - \varepsilon)\langle \ddot{q}_S \rangle + \varphi \langle \ddot{q}_f \rangle \quad (1.23c)$$

são, respectivamente, a capacidade térmica global (efetiva) por unidade de volume, a condutividade térmica global (efetiva) e geração de calor global por unidade de volume do meio.

Para simplificar a análise outras hipóteses foram propostas por (SCHULT, et al. 1995, apud MARTINS, 2008):

- a) Transferência de calor por radiação é modelada por uma aproximação de difusão;
- b) A fase sólida está estacionária e não deformável;
- c) A Lei de Fick descreve a difusão de oxidante através do gás com a quantidade D_{pg} constante;
- d) A resistência ao fluxo através do meio poroso é pequena o suficiente de modo que a pressão é considerada constante;
- e) A amostra é suficientemente longa de modo que os efeitos finais são negligenciados e não influenciam o transporte de calor e oxidante;
- f) A energia de ativação da reação envolvida durante a combustão é grande;

Sob certas circunstâncias, a suposição de temperatura média local parece ser demasiadamente restritiva e pode não ser mais válida. Isto leva aos modelos macroscópicos referidos como não-equilíbrio [(QUINTARD e WHITAKER, 1993) e (BATSALE, GOBBE e QUINTARD, 1996) apud (MARTINS, 2008)]. É possível desenvolver equações de transporte separadas para cada fase que descreve uma equação do sistema unidimensional incluindo:

- duas equações para energia (uma para o sólido e outra para o gás);
- uma equação para a taxa de conversão de combustível;
- duas equações de conservação de massa (oxidante e combustível);
- uma equação que governa o fluxo de gás;
- algumas outras equações termodinâmicas.

No Capítulo 2 desta dissertação é apresentado um modelo matemático desenvolvido pela equipe do Instituto de Mecânica dos Fluidos de Toulouse (IMFT) [(LAPENE; MARTINS, et al. 2007), (LAPENE; DEBENEST, et al. 2008) apud (MARTINS, 2008)] que considera transporte térmico em não-equilíbrio local. Esta modelagem foi implementada no OpenFOAM para estudo da combustão *smouldering* em meio poroso.

Conhecendo previamente alguns dos modelos numéricos em macroescala que foram apresentados, pode-se notar que estes não são suficientes para responder a algumas perguntas, portanto, examinando os detalhes dos processos algumas ferramentas de simulação numérica com base numa escala microscópica foram desenvolvidas por [(LU and YORTSOS, 2005, apud MARTINS, 2008), (OLIVEIRA and KAVIANY, 2001, apud MARTINS, 2008), (DEBENEST; MOURZENKO; THOVERT, 2005a)]. Aqui, as equações locais são resolvidas em uma imagem detalhada discretizada da microestrutura e tornam possível a investigação de situações que não podem ser adequadamente descritas por modelos de macroescala.

O esquema na Figura 3 é um zoom em uma microestrutura e resume o diferentes mecanismos considerados por (DEBENEST; MOURZENKO; THOVERT, 2005a).

O percurso de fluxo de gás entre os grãos do leito carrega todas as espécies químicas e o calor. Parte do calor é também conduzido pela fase sólida. A combustão é supostamente ser uma reação heterogênea sobre a superfície dos grãos e a reação de pirólise não acontece nesta zona de reação. O carbono fixo contido nos grãos é supostamente direcionado para fora, a montante da frente de reação, e a concentração de oxigênio a jusante da frente.

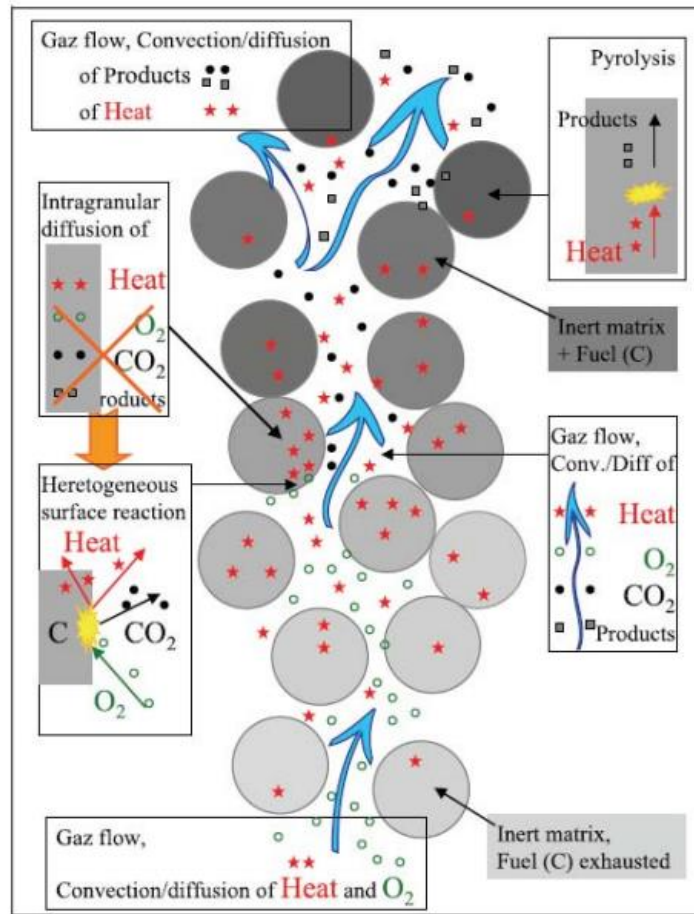


Figura 3: Ilustração da microestrutura do leito, e mecanismos inclusos na formulação microscópica do problema.

Fonte: Debenest (2003)

1.3 MODELOS EXPERIMENTAIS

Embora existam os modelos teóricos e numéricos, existem também os modelos experimentais desenvolvidos ao longo dos anos onde a combustão também é muitas vezes estudada e investigada por meio de dispositivos ou aparatos experimentais. Os modelos experimentais servem de base para a construção de muitos modelos teóricos, pois a ferramenta numérica, na maioria das vezes, busca uma aproximação com resultados oriundos de ensaios experimentais.

(OHLEMILLER; ROGERS, 1981) estudou processos como ignição e propagação de uma frente de combustão *smouldering* em dispositivos experimentais.

(SHIN; CHOI, 2000) estudaram a combustão de resíduos sólidos municipais utilizando um combustor, Figura 4.

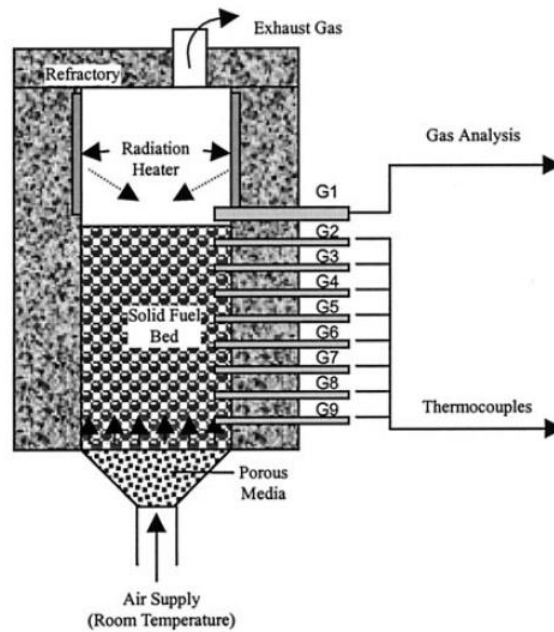


Figura 4 - Croqui do combustor utilizado por Shin e Choi

Fonte: Shin e Choi (2000)

Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com um modelo numérico utilizado pelos autores para prever a evolução de temperatura no interior do leito, Figura 5.

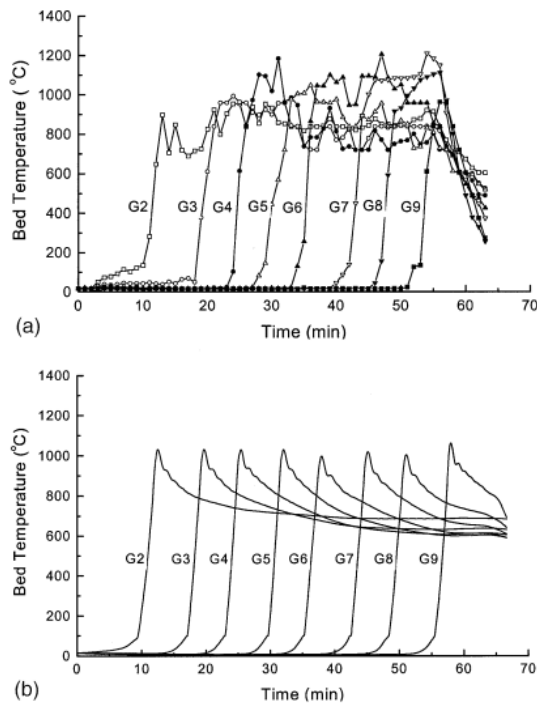


Figura 5 – Curvas de evolução de temperatura obtidas por Shin e Choi: (a) real e (b) simulado

Fonte: Shin e Choi (2000)

Monhol, Pretti e Martins (2013) também desenvolveram uma célula de combustão instrumentada para estudar a combustão de resíduos sólidos, utilizada também nesse estudo, Figura 6, capaz de fornecer dados para estudos do processo de combustão de diferentes resíduos sólidos sob diferentes configurações de reator (co-corrente ou contracorrente).



Figura 6 - Célula de combustão LCC

Fonte: Monhol, Pretti e Martins [2013]

Os experimentos realizados em laboratórios são utilizados para mensurar e estudar parâmetros físicos, como por exemplo, velocidade de propagação de uma frente de combustão, espessura da frente e geometria de propagação da frente. É possível também fazer análises dos gases emitidos durante o processo de combustão, determinar a estrutura química da frente de combustão e propor balanços de massa e energia.

Normalmente os autores realizam experimentos *benchmarking*, pois os dados obtidos são coletados de ensaios controlados, e podem ser fidedignos o suficiente para testes e validação de modelos numéricos.

Capítulo 2:

Determinação e interpretação física dos grupos adimensionais que regem a taxa de transferência de calor da fase sólida de uma célula de combustão instrumentada

“Obs: Este capítulo é baseado em um artigo publicado pelos autores Jaderson N. Pretti e Márcio F. Martins nos anais do CONEM 2014, realizado em Uberlândia – MG de 10 a 15 de agosto do mesmo ano.”

2 DETERMINAÇÃO E INTERPRETAÇÃO FÍSICA DOS GRUPOS ADIMENSIONAIS QUE REGEM A TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA FASE SÓLIDA DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÃO INSTRUMENTADA

Um modelo matemático completo para combustão em meio poroso foi desenvolvido pela equipe do Instituto de Mecânica dos Fluidos de Toulouse (IMFT) [(LAPENE; MARTINS, et al. 2007), (LAPENE; DEBENEST, et al. 2008) apud (MARTINS, 2008)]. Resumidamente, para descrever as equações da transferência de calor no meio poroso reativo, uma descrição homogênea foi utilizada. Transporte térmico em não equilíbrio foi considerado pelo modelo, e tratou-se como um modelo de “duas temperaturas”: uma para a fase gasosa e outra para a fase sólida. As reações químicas consideradas são a oxidação do carbono fixo e a reação de descarbonização. (PRETTI; MARTINS, 2014) realizaram uma análise dimensional da equação de energia para a fase sólida pela determinação e interpretação física dos grupos adimensionais que regem a taxa de transferência de calor da fase sólida de uma célula de combustão instrumentada, desenvolvida no Laboratório de Combustíveis e Combustão da Universidade Federal do Espírito Santo, para estudos da combustão em meio poroso.

2.1 ANÁLISE DIMENSIONAL

Esta técnica permite adquirir conhecimentos de um fenômeno antes que sejam feitas extensas análises teóricas ou experimentais, permite também extrair tendências de um modelamento matemático que de outra forma ficariam desorganizadas e incoerentes.

A Figura 7 abaixo apresenta um croqui da célula de combustão desenvolvida no Laboratório de Combustíveis e Combustão da UFES.”

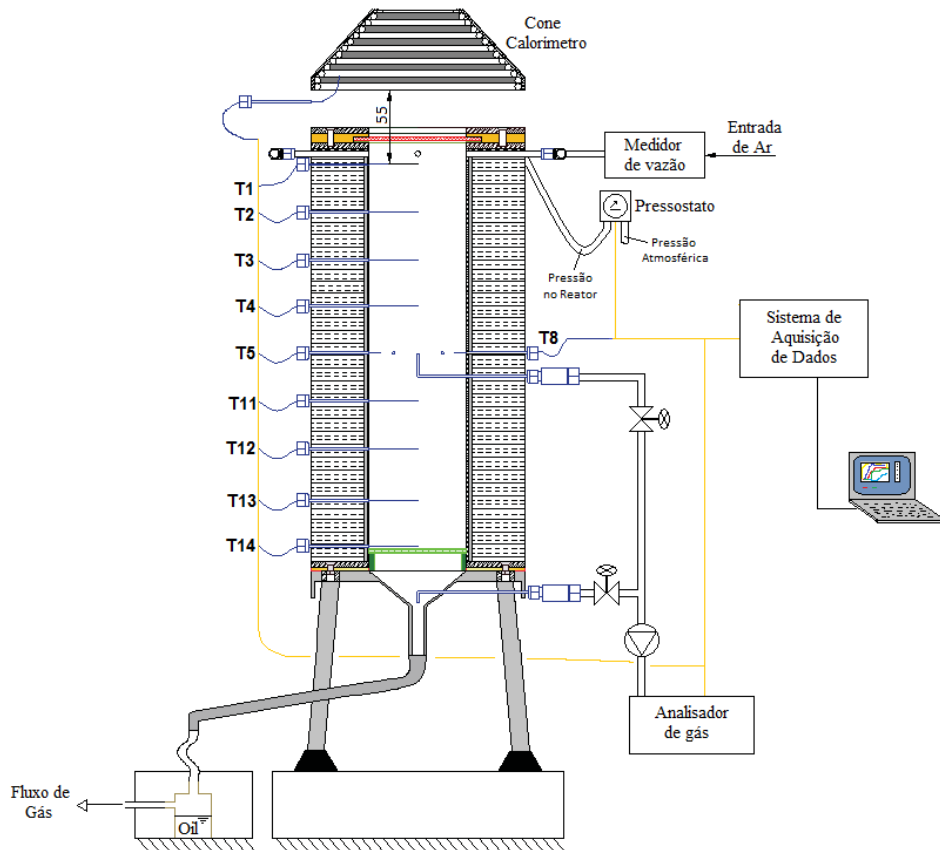


Figura 7: Croqui Célula de Combustão

Fonte: Martins (2008) (adaptado)

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 Apresentação do Problema

Como já descrito, um modelo matemático completo foi desenvolvido pela equipe do Instituto de Mecânica dos Fluidos de Toulouse (IMFT) [(LAPENE; MARTINS, et al. 2007), (LAPENE; DEBENEST, et al. 2008) apud (MARTINS, 2008)]. Resumidamente, para descrever as equações da transferência de calor no meio poroso reativo, uma descrição homogênea foi utilizada. Transporte térmico em não equilíbrio foi considerado pelo modelo, e tratou-se como um modelo de “duas temperaturas”: uma para a fase gasosa e outra para a fase sólida.

Três hipóteses são consideradas no presente modelo:

O problema é unidimensional:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \quad (2.1)$$

A porosidade do meio permanece constante no tempo e no espaço:

$$\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

Lei de gás perfeito:

$$P = \rho_g r T, \quad \text{onde } r = \frac{R}{M_g} \quad (2.3)$$

Usando estas hipóteses e referindo-se ao modelo de não equilíbrio, pode ser escrito um sistema simplificado de equações de conservação de energia.

Balanço de energia da fase gasosa:

$$\varepsilon_g \cdot (\rho c_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + (\rho c_p)_g \cdot v_g \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \Gamma_{s,g} \cdot (T_s - T_g) + Q_g + h(T_{amb} - T_g) \quad (2.4a)$$

Balanço de energia da fase sólida:

$$\varepsilon_s \cdot (\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \Gamma_{g,s} \cdot (T_g - T_s) + Q_g + h(T_{amb} - T_s) \quad (2.4b)$$

Pode-se notar que o modelo de equações diferenciais parciais acima requer um método numérico para sua solução, uma vez que não é possível encontrar solução analítica para o problema. No presente trabalho utilizou-se o modelo discreto por diferenças finitas conforme apresentado no tópico seguinte para estimar a temperatura do sólido.

2.2.2 Modelo Discreto por Diferenças Finitas

Retomando a equação do balanço de energia para a fase sólida, tem-se:

$$\varepsilon_s \cdot (\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \Gamma_{g,s} \cdot (T_g - T_s) + Q_g + h(T_{amb} - T_s) \quad (2.4b)$$

É razoável adotar a hipótese de condutividade térmica do sólido constante, logo:

$$\frac{\varepsilon_s \cdot (\rho c_p)_s}{\lambda_s} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\Gamma_{g,s} \cdot T_s - \Gamma_{g,s} \cdot T_g + Q_g + h \cdot T_{amb} - h \cdot T_s}{\lambda_s} \quad (2.5a)$$

$$\frac{\varepsilon_s \cdot (\rho c_p)_s}{\lambda_s} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{(\Gamma_{g,s} - h)}{\lambda_s} \cdot T_s + \frac{-\Gamma_{g,s} \cdot T_g + Q_g + h \cdot T_{amb}}{\lambda_s} \quad (2.5b)$$

Para simplificação considera-se as seguintes constantes:

$$A = \frac{\varepsilon_s \cdot (\rho c_p)_s}{\lambda_s} \quad (2.6a)$$

$$B = \frac{(\Gamma_{g,s} - h)}{\lambda_s} \quad (2.6b)$$

$$C = \frac{-\Gamma_{g,s} \cdot T_g + Q_g + h \cdot T_{amb}}{\lambda_s} \quad (2.6c)$$

Utilizando o método das diferenças finitas nas derivadas parciais, tem-se:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} \quad (2.7a)$$

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1}^{k+1} - 2 \cdot T_i^{k+1} + T_{i+1}^{k+1}}{\Delta x^2} \quad (2.7b)$$

Aplicando as Eqs. (1.29) e (1.30) em (1.28b), tem-se:

$$A \cdot \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} = \frac{T_{i-1}^{k+1} - 2 \cdot T_i^{k+1} + T_{i+1}^{k+1}}{\Delta x^2} + B \cdot T_i^{k+1} + C \quad (2.8a)$$

$$T_i^{k+1} - T_i^k = \frac{\Delta t}{A} \cdot \left(\frac{T_{i-1}^{k+1} - 2 \cdot T_i^{k+1} + T_{i+1}^{k+1}}{\Delta x^2} \right) + T_i^{k+1} \cdot \left(\frac{B \cdot \Delta t}{A} \right) + \frac{C \cdot \Delta t}{A} \quad (2.8b)$$

$$T_i^k + \frac{C \cdot \Delta t}{A} = T_{i-1}^{k+1} \cdot \left(\frac{-\Delta t}{A \cdot \Delta x^2} \right) + T_i^{k+1} \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta t}{A \cdot \Delta x^2} + 1 - \frac{B \cdot \Delta t}{A} \right) + T_{i+1}^{k+1} \cdot \left(\frac{-\Delta t}{A \cdot \Delta x^2} \right) \quad (2.8c)$$

De posse das equações apresentadas e do modelo discreto aplicou-se o Teorema Pi de Buckingham para determinar os grupos adimensionais que regem a equação de energia para a fase sólida.

Uma breve apresentação do Teorema Pi de Buckingham é dada a seguir.

2.2.3 Teorema Pi de Buckingham

De acordo com (FOX; PRITCHARD e MC DONALD, 2008) o Teorema Pi de Buckingham declara que podemos transformar uma relação entre n parâmetros da forma:

$$g(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (2.9)$$

em uma relação correspondente entre n-m parâmetros adimensionais π na forma:

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (2.10a)$$

Ou

$$\pi_1 = G_1(\pi_2, \dots, \pi_{n-m}) \quad (2.10b)$$

em que m é normalmente o número mínimo de dimensões independentes requerido para definir as dimensões de todos os parâmetros q_1, q_2, \dots, q_n .

O teorema não prediz a forma funcional de G ou de G_1 . A relação funcional entre os parâmetros π deve ser determinada experimentalmente.

Os n-m parâmetros π adimensionais obtidos a partir do procedimento são independentes. Um parâmetro π não é independente se pode ser formado a partir de qualquer combinação de outros parâmetros π .

Os seis passos listados a seguir delineiam um procedimento recomendado para determinar os parâmetros π , ou grupos adimensionais.

Passo 1: Liste todos os parâmetros dimensionais envolvidos.

Passo 2: Selecione um conjunto de dimensões fundamentais primárias.

Passo 3: Liste todos os parâmetros em termos das dimensões primárias.

Passo 4: Selecione da lista um conjunto de m parâmetros dimensionais que inclua todas as dimensões primárias.

Passo 5: Forme equações dimensionais, combinando os parâmetros selecionados no Passo 4 com cada um dos outros parâmetros remanescentes, um de cada vez, a fim de formar grupos dimensionais. Resolva as equações dimensionais para obter os n-m grupos adimensionais.

Passo 6: Certifique de cada grupo obtido é adimensional.

2.2.4 Determinação dos grupos adimensionais para a equação de energia da fase sólida

Balço de energia – Fase sólida

Os parâmetros dimensionais da equação do balanço de energia para a fase sólida podem ser extraídos da Eq. (2.4b):

$$T_s - T_g ; (\rho c_p)_s ; x ; L ; \lambda_s ; \Gamma_{g,s} ; Q_g ; h ; T_{amb} - T_g ; t$$

n = 10 parâmetros dimensionais;

m = 4 parâmetros repetentes (J , m , s , K);

n-m = 6 grupos adimensionais.

Selecionando da lista os parâmetros $T_{\text{amb}} - T_g$, L , λ_s e $(\rho c_p)_s$ como parâmetros dimensionais que incluem todas as dimensões primárias (passo 4) e formando equações dimensionais conforme passo 5 determinam-se os 6 grupos adimensionais para a Eq. (2.4b). Note que para expressar os grupos adimensionais utilizou-se a temperatura final do sólido. Os grupos adimensionais obtidos são:

$$\pi_1 = \frac{T_s - T_g}{T_{fs} - T_g} \quad (2.11a)$$

$$\pi_2 = \frac{x}{L} \quad (2.11b)$$

$$\pi_3 = \frac{Q_g \cdot L^2}{\lambda_s (T_{fs} - T_g)} \quad (2.11c)$$

$$\pi_4 = \frac{L^2 \cdot \Gamma_{g,s}}{\lambda_s} \quad (2.11d)$$

$$\pi_5 = \frac{h \cdot L}{\lambda_s} \quad (2.11e)$$

$$\pi_6 = \frac{\lambda_s \cdot t}{L^2 \cdot (\rho c_p)_s} \quad (2.11f)$$

Pode-se expressar ainda um grupo adimensional como uma função dos demais grupos remanescentes, ou ainda:

$$\theta = \frac{T_s - T_g}{T_{fs} - T_g} = f \left(\frac{x}{L}, \frac{Q_g \cdot L^2}{\lambda_s (T_{fs} - T_g)}, \frac{L^2 \cdot \Gamma_{g,s}}{\lambda_s}, \frac{h \cdot L}{\lambda_s}, \frac{\lambda_s \cdot t}{L^2 \cdot (\rho c_p)_s} \right) \quad (2.12)$$

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES DESTE ARTIGO

Para fazer uma interpretação física dos grupos adimensionais envolvidos no problema é necessário conhecer a relação funcional entre os mesmos. Entretanto, realizar esta tarefa experimentalmente pode vir a ser algo um tanto quanto impraticável, haja vista a densidade de parâmetros envolvidos no problema. Logo, optou-se por resolver a equação diferencial para o balanço de energia da fase sólida numericamente fazendo uso do método das diferenças finitas conforme explicitado anteriormente.

Para plotar os gráficos relacionando a temperatura adimensional em relação aos demais grupos adimensionais variou-se somente um parâmetro de um dado grupo, enquanto os demais parâmetros permaneciam constantes. Os gráficos obtidos estão apresentados na Figura 8 a seguir.

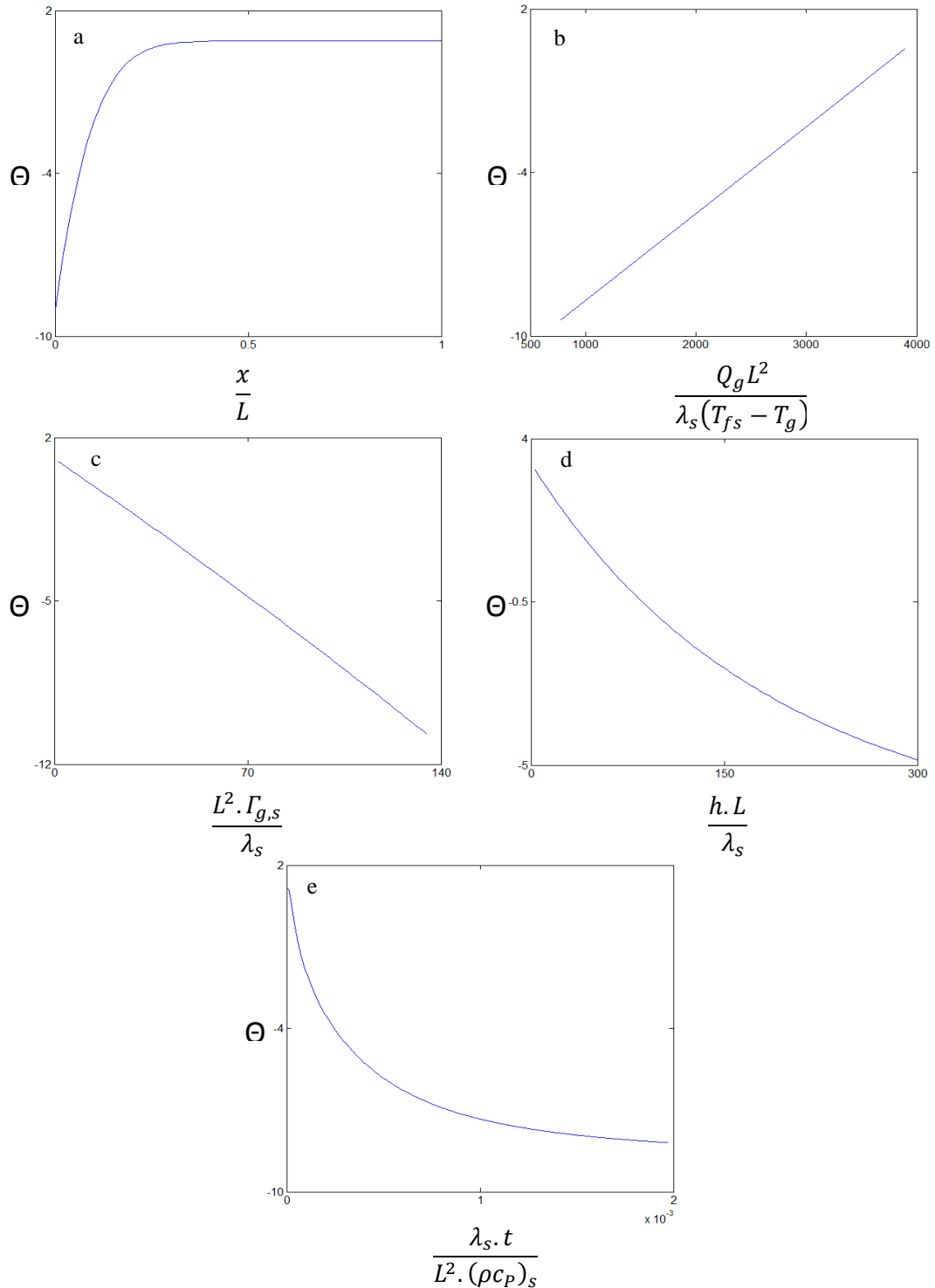


Figura 8: Interpretação física dos Grupos Adimensionais

Fonte: Autor

Conforme pode-se observar nos gráficos *a, b, c, d* e *e* ilustrados na Figura 8 a relação funcional da temperatura adimensional com os demais grupos adimensionais apresenta comportamentos distintos. No gráfico *a* pode-se notar que a temperatura do sólido permanece constante ao longo de quase a totalidade do leito, entretanto a condição de contorno em $x=0$ impõe uma dada temperatura fixa, enquanto que em $x=L$ a condição de contorno é idealizada como sendo uma superfície adiabática.

Para obtenção do gráfico *b* variou-se a taxa de geração de calor no interior do leito, em uma posição qualquer, e plotou-se a correspondente temperatura adimensional. Percebe-se que a relação entre estes grupos adimensionais é aproximadamente linear.

Da mesma forma, no gráfico *c* variou-se o coeficiente de troca (gás-sólido) e obteve-se também uma relação aproximadamente linear entre os grupos adimensionais envolvidos. No gráfico *d* variou-se positivamente o coeficiente de troca térmica convectiva e notou-se um decaimento da temperatura adimensional, como esperado. Por último, no gráfico *e*, variou-se positivamente a condutividade térmica do sólido e notou-se um rápido decaimento da temperatura adimensional, uma vez que aumentou-se a dissipação de calor no interior do leito.

Em suma, percebe-se que a análise prévia da relação entre os grupos adimensionais envolvidos em um dado problema como este é de grande valia, uma vez que pode-se obter predições da influência de cada grupo P_i na temperatura adimensional.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DESTE ARTIGO

Através deste artigo pode-se notar que o uso do método da análise dimensional permite adquirir conhecimento de um dado fenômeno antes que sejam feitas extensas análises teóricas ou experimentais, permitindo extrair tendências de dados que de outra forma ficariam desorganizados e incoerentes.

No problema em questão pode-se extrair o comportamento da temperatura adimensional em relação aos demais grupos que regem a taxa de transferência de calor da fase sólida para um meio poroso reativo. Caso esta técnica não fosse utilizada seria necessária a realização de vários experimentos sob diferentes condições para se chegar a estas conclusões.

Capítulo 3:

A Ferramenta OpenFOAM



“Obs: Este capítulo dedica-se a explicar a principal ferramenta utilizada neste trabalho, o OpenFOAM. Destaca-se neste capítulo algumas características do OpenFOAM, como a estrutura de um case de simulação, o procedimento para alterar um solver, e mostra-se alguns exemplos prévios de simulação para o leitor.”

3 A FERRAMENTA OPENFOAM

Maioli A. G. e Maioli C. G. (2013) apresentam uma concisa descrição do pacote de simulação utilizado neste trabalho, o OpenFOAM.

OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation) é um pacote de simulação gratuito e de código aberto, criado para resolver problemas da mecânica dos meios contínuos, principalmente para a dinâmica dos fluidos computacional. A tecnologia central do OpenFOAM é um flexível conjunto de eficientes módulos escritos em C++, que são usados para criar aplicativos executáveis. Estes podem ser: *solvers*, projetados para resolver problemas específicos de engenharia; utilitários, para realizar tarefas de pré e pós-processamento, que abrangem desde a manipulação dos dados à visualização, construção e processamento de malhas; e bibliotecas de expansão usadas pelos *solvers* e utilitários, como uma biblioteca de modelos físicos.

O desenvolvimento do OpenFOAM teve início em 1993, com Henry Weller e Hrvoje Jasak, alunos de doutorado da Imperial College, em Londres. O interesse deles era criar um código geral, de qualidade, confiável e eficiente, que pudesse ser utilizado no futuro por outras pessoas. Ambos haviam trabalhado com códigos de CFD escritos em Fortran, mas sentiram que essa linguagem não era mais apropriada para o tipo de trabalho que queriam fazer, podendo torná-lo algo que ninguém mais utilizaria, assim fazendo sua atenção se voltar para uma linguagem mais nova, o C++. Tudo isso levou os dois a unirem esforços para desenvolver o código do FOAM (Field Operation And Manipulation).

Por alguns anos, o FOAM foi desenvolvido em uma linha comercial pela empresa Nabla Ltd, com a ideia de fornecer ao usuário final uma ferramenta para simulações CFD de processos fisicamente complexos e oferecendo serviços de consultoria sobre o uso do *software* e implementação de novos *solvers* com modelagem complexa. Contudo, os desenvolvedores chegaram à conclusão de que a abordagem comercial não era a ideal. Assim, em 12 de dezembro de 2004, o código do FOAM se tornou de domínio público sob a GPL (General Public License) e o programa passou a ser chamado de OpenFOAM (referente ao código ser aberto).

Segundo os desenvolvedores, esta nova fase de desenvolvimento do código começa com o fim de sua abordagem comercial, reconhecendo que o OpenFOAM é essencialmente uma ferramenta de pesquisa e que o futuro do código só pode ser garantido através de colaborações e interações com o meio acadêmico (SILVA, 2007, apud MAIOLI A. G.; MAIOLI C. G., 2013).

A partir dessa data, o OpenFOAM foi distribuído e desenvolvido pela empresa OpenCFD Ltd. Em 15 de agosto de 2011, a OpenCFD foi comprada pela Silicon Graphics International (SGI). Então, em 12 de setembro de 2012, o grupo ESI adquiriu a OpenCFD Ltd da SGI, e atualmente distribui o OpenFOAM pela OpenFOAM Foundation.

3.1 RAZÕES PARA ESCOLHA DO OPENFOAM COMO PACOTE DE SIMULAÇÃO

O fato de o OpenFOAM ser um pacote computacional de código aberto permite que o usuário tenha acesso a todo o seu código, não apresentando “caixas pretas” como os *softwares* comerciais. Assim, o usuário pode desenvolver novos *solvers* e utilitários, como também implementar novas bibliotecas, como condições de contorno e funções de parede. Isso torna possível que o OpenFOAM seja adaptado para as necessidades específicas de determinados casos, tornando-o uma ferramenta de simulação para praticamente qualquer tipo de problema de engenharia. Atualmente, o pacote padrão do OpenFOAM já vem com uma vasta quantidade de *solvers* e utilitários, que abrangem a maioria dos problemas clássicos, como escoamento de fluidos, transferência de calor, fluidos multifásicos, combustão, análise de tensões mecânicas e até eletromagnetismo, Figura 9, porém a adaptação é possível para problemas inovadores.

laplacianFoam	equação de Laplace
potentialFoam	escoamento potencial que pode ser usado para gerar campos iniciais para códigos que usam Navier-Stokes
scalarTransportFoam	equação de transporte para um escalar passivo
Escoamento incompressível	
boundaryFoam	escoamento turbulento 1D, tipicamente para gerar condições para camada limite em uma entrada de outra simulação
icoFoam	escoamento Newtoniano laminar incompressível transiente
icoFoamAutoMotion	escoamento Newtoniano laminar incompressível transiente com malha móvel
nonNewtonianIcoFoam	escoamento laminar incompressível transiente de fluidos não Newtonianos
simpleFoam	escoamento turbulento incompressível estacionário (RANS) de fluidos não Newtonianos
turbFoam	escoamento turbulento incompressível transiente usando RANS
Escoamento compressível	
rhoPsonicFoam	escoamento compressível baseado na pressão usando variáveis com peso na densidade
rhoSonicFoam	escoamento compressível baseado na densidade
sonicFoam	escoamento laminar transiente trans-sônico/supersônico de um gás compressível
sonicFoamAutoMotion	escoamento laminar transiente trans-sônico/supersônico de um gás compressível com malha móvel
sonicLiquidFoam	escoamento laminar transiente trans-sônico/supersônico de um líquido compressível
sonicTurbFoam	escoamento turbulento transiente trans-sônico/supersônico de um gás compressível
Direct Numerical Simulation (DNS) e Large Eddy Simulation (LES)	
channelOodles	LES incompressível para escoamento em um canal
dnsFoam	DNS para caixas de turbulência isotrópica
oodles	LES incompressível
Escoamento multifásico	
bubbleFoam	sistema com 2 fases fluidas incompressíveis, com uma fase dispersa
interFoam	2 fluidos incompressíveis, com acompanhamento da interface e opção para malha móvel
lesInterFoam	2 fluidos incompressíveis com captura da interface, usando um modelo LES incompressível selecionável em tempo de execução
rasInterFoam	2 fluidos incompressíveis com captura da interface, usando um modelo RANS incompressível selecionável em tempo de execução
settlingFoam	2 fluidos incompressíveis para simular o assentamento da fase dispersa
twoPhaseEulerFoam	2 fluidos incompressíveis Euler-Euler, com uma fase dispersa
Combustão	
coldEngineFoam	escoamento sem reação no interior de máquina de combustão
dieselEngineFoam	escoamento spray de diesel com combustão
XiFoam	combustão compressível com pré-mistura ou pré-mistura parcial com modelagem de turbulência
Xoodles	combustão compressível com pré-mistura ou pré-mistura parcial com modelagem de turbulência LES

Figura 9 – Alguns solvers implementados no OpenFOAM 1.2

Fonte: OpenFOAM UserGuide (adaptado)

O OpenFOAM é distribuído gratuitamente sob a licença GNU General Public License, podendo ser executado em distribuições Linux (Debian, Ubuntu, CentOS, Fedora, etc.) tanto em versões de 32 bits como de 64 bits. Sendo assim, requer que o usuário tenha conhecimentos básicos de Linux, o que pode aumentar a dificuldade para iniciantes.

Um grande diferencial do OpenFOAM comparado a outros *softwares* gratuitos é que ele fornece ferramentas de pré e pós-processamento dos dados. Apesar de já existirem vários programas específicos para geração de malha e visualização de dados, o usuário deve despende um grande esforço para interligar estes com o código CFD, o que é muito facilitado com o uso do OpenFOAM.

Outro ponto importante é a enorme capacidade para processamento em paralelo, visto que a licença não é limitada a certa quantidade de aplicativos ou núcleos.

Sendo assim, pode-se aproveitar toda a capacidade de grandes *clusters* sem que usuários tenham que dividir o número de licenças, como em *softwares* comerciais.

Silva (2007), apud Maioli A. G. e Maioli C. G. (2013) listou uma série de vantagens na utilização do OpenFOAM:

- ✓ Código aberto e escrito em C++. A grande maioria dos manuais dos pacotes CFD comerciais contém dados incompletos sobre a modelagem e implementação numérica. Ao analisar o código, o usuário é capaz de obter todas estas informações. E mais, ele pode alterar o código existente (ou criar um novo) para atender às necessidades do problema.
- ✓ Ferramentas gratuitas de geração de malha e visualização de dados incorporados ao pacote.
- ✓ Generalidade da malha (estruturada ou não-estruturada), inclusive com a possibilidade de importar malhas de outros programas (gratuitos e comerciais).
- ✓ Participação dos desenvolvedores do OpenFOAM em uma lista de discussão em inglês sobre o pacote, respondendo perguntas sobre o uso e

implementação, além de darem dicas; e também de fóruns especializados em CFD.

- ✓ Ampla faixa de aplicação na engenharia, incluindo escoamentos turbulentos, com troca de calor, multifásico, etc.
- ✓ Multi-plataforma (Linux, Solaris, MacOS, Linux 64 bits, etc). Já existe uma versão adaptada para Windows.
- ✓ Possibilidade de executar simulações de grande porte em um *cluster* de computadores. Implementações cada vez mais eficientes de paralelismo estão sendo incorporadas ao OpenFOAM.
- ✓ Ferramentas de exportação de resultados para visualização em outros programas gráficos, o que facilita a obtenção dos resultados utilizando o *software* que mais agrada ou se encaixe nas necessidades do usuário.
- ✓ Desenvolvimento tende a ser realizado pelo meio acadêmico. A tecnologia mais avançada em termos de modelagem CFD, técnicas numéricas (geração de malha, métodos de discretização, solução de sistemas lineares, etc) e computação científica (visualização e paralelismo) provêm do meio acadêmico.

Entretanto, pode-se notar três grandes desvantagens na utilização do OpenFOAM.

São elas:

- × Ausência de uma interface gráfica integrada.
- × O OpenFOAM não possui um editor CAD para construção de geometrias e geração de malhas.
- × Guia do Programador não fornece detalhes suficientes, tornando a curva de aprendizagem muito gradual.

3.2 ESTRUTURA DE UM CASO

Cada caso a ser simulado no OpenFOAM segue uma estrutura de diretórios que contém os arquivos que configuram o mesmo. Estes arquivos possuem as informações necessárias para simular o caso, como a descrição da geometria, detalhes da malha e condições de contorno, parâmetros sobre os métodos numéricos, assim como as propriedades físicas do problema. A estrutura de diretórios pode ser vista na Figura 10:

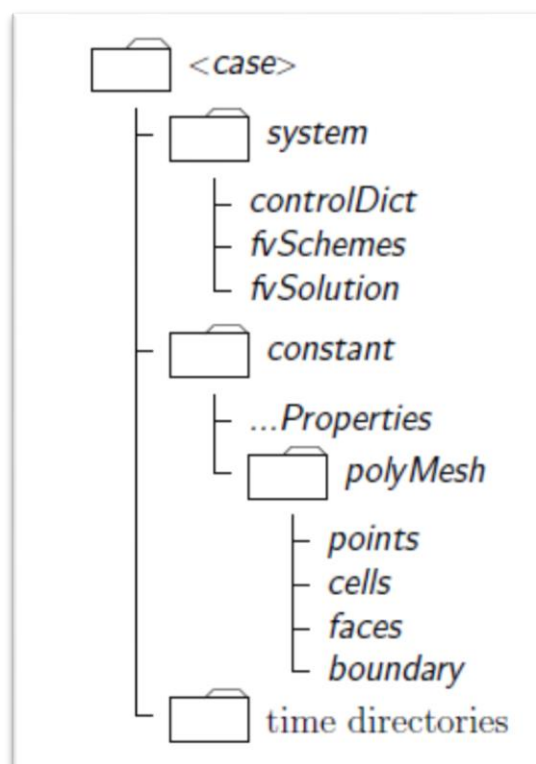


Figura 10: Estrutura de um caso no OpenFOAM

Fonte: OpenFOAM UserGuide

O diretório raiz de um caso irá conter os subdiretórios *system*, *constant* e os diretórios de tempo:

- *Constant*: deve conter os arquivos de propriedades físicas pertinentes ao caso, por exemplo, *transportProperties*, *turbulenceProperties*, etc. A descrição completa da geometria e da malha deve ser incluída no subdiretório *polyMesh*.

- *System*: contém os arquivos que estão associados com o procedimento de solução do caso. Aqui devem estar contidos pelo menos três arquivos: *controlDict*, onde se define os parâmetros de controle da simulação, como os tempos de início e término da simulação, intervalo de tempo e controle de escrita de dados; *fvSchemes*, onde se seleciona os procedimentos de discretização usados na solução do problema; e *fvSolution*, que seleciona os métodos para resolver o sistema de equações lineares e suas tolerâncias, assim como outros parâmetros de controle do algoritmo de solução.
- *Time directories*: contém os arquivos individuais de dados para os campos das variáveis tratadas no caso. Estes dados podem ser os valores iniciais e as condições de contorno que o usuário deve especificar para definir o problema (diretório "0"), ou os resultados da simulação, escritos em arquivo pelo OpenFOAM. O nome de cada diretório de tempo refere-se ao instante simulado em que os dados foram escritos.

3.3 PRÉ-PROCESSAMENTO

O pré-processamento no OpenFOAM consiste na definição dos arquivos contendo o controle das condições de simulação e as propriedades físicas e modelos adicionais do problema. Nessa etapa também é definido o domínio computacional e é feita a geração da malha.

A modificação dos parâmetros da simulação deve ser feita editando-se os arquivos do caso, por meio de programas editores de texto como o gedit.

3.3.1 Geração e importação de malhas

O OpenFOAM sempre opera em um sistema de coordenadas cartesianas de três dimensões, sendo que todas as geometrias são geradas em 3D. Por padrão, ele resolve o caso em três dimensões, mas pode ser instruído para resolver em duas

especificando-se uma condição de contorno especial “empty” para o contorno normal à terceira dimensão, na qual não é necessária nenhuma solução.

Para gerar a geometria, o OpenFOAM não apresenta um editor CAD. Porém, ele possui dois utilitários para gerar a malha, que são o *blockMesh* e o *snappyHexMesh*. Outra opção é a importação de malhas geradas em outros programas.

No presente trabalho optou-se pela geração e importação de malha fazendo uso de um *software* também gratuito, o SALOMÉ. Neste *software* pode-se gerar a geometria para um dado problema, lembrando sempre de nomear as faces ou regiões do domínio onde serão aplicadas as condições iniciais e de contorno, e em seguida, pode-se gerar malhas que posteriormente serão exportadas para o OpenFOAM.

O arquivo gerado no SALOMÉ é salvo no formato `.unv`, e para importar a malha do SALOMÉ para o OpenFOAM insere-se o arquivo dentro da pasta que contém o *case* a ser simulado e digita-se o seguinte texto no terminal:

```
ideasUnvToFoam nomedoarquivo.unv
```

Alguns dos utilitários conversores de malha mais populares são:

- *fluentMeshToFoam*: converte um arquivo `.msh` do Fluent;
- *star4ToFoam*: converte arquivos de malha do STAR-CD/PROSTAR;
- *gambitToFoam*: converte arquivos de malha do GAMBIT;
- *ideasUnvToFoam*: converte arquivos de malha no formato I-Deas unv;
- *gmshToFoam*: converte um arquivo de malha `.msh` escrito pelo Gmsh.

Uma tabela com todos os utilitários conversores de malha do OpenFOAM está disponível na sessão 3.6 do OpenFOAM User Guide.

Vale destacar que há no OpenFOAM um utilitário de grande importância, o *checkMesh*. Ele faz um diagnóstico da sua malha, relatando diversos aspectos das

propriedades topológicas e geométricas, como ortogonalidade, assimetria, orientação ou número de regiões.

É altamente aconselhável que o usuário execute o *checkMesh* sempre que importar malhas de outros *softwares* para a detecção de possíveis erros oriundos da geração da malha ou de seu processo de conversão.

Ele é executado no terminal a partir do comando *checkMesh* dentro do diretório do caso.

3.4 COMO ALTERAR UM SOLVER

Para aprender a alterar um *solver* previamente existente considera-se como exemplo adicionar a equação de energia no *solver* *icoFoam* (*solver* previamente existente destinado à solução de problemas fluidodinâmicos de fluidos incompressíveis).

Foi utilizada a malha gerada no exemplo tutorial *cavity*^{*}.

Percorrem-se então as etapas de criação de uma versão pessoal de *icoFoam* no subdiretório do usuário. O primeiro passo é garantir que a instalação do OpenFOAM funciona corretamente e compila o *solver* ainda não editado.

```
cd OpenFOAM
```

A pasta de instalação específica do OpenFOAM terá o número da versão que foi instalada, tal como:

```
cd OpenFOAM-2.2.2
```

* O tutorial *cavity* descreve como são realizadas etapas de pré-processamento, solução e pós-processamento de um caso isotérmico, envolvendo fluxo incompressível em um domínio quadrado bidimensional. O escoamento é considerado newtoniano, laminar, incompressível e transiente.

O OpenFOAM organizou os *solvers* separando-os do código fonte do OpenFOAM chamando-os de "*applications*". Dentro da pasta "*applications*", há subdiretórios para cada *solver*.

```
cd applications/solvers/
```

Uma vez que estamos interessados em alterar o *solver* icoFoam vamos copiar e colar o subdiretório icoFoam no mesmo diretório raiz renomeando-o para my_icoFoam. Este novo subdiretório receberá as posteriores alterações desejadas.

```
mkdir -p $WM_PROJECT_USER_DIR/applications/solvers
cp -r icoFoam $WM_PROJECT_USER_DIR/applications/solvers/my_icoFoam
cd $WM_PROJECT_USER_DIR/applications/solvers/my_icoFoam
```

Agora, algumas alterações precisam ser feitas nos arquivos *make* para que tudo possa ser compilado no novo *solver* criado sem substituir o *solver* inicial. Em primeiro lugar, muda-se o nome do arquivo principal para o seu novo nome e apaga-se o arquivo de dependências:

```
mv icoFoam.C my_icoFoam.C
rm icoFoam.dep
```

Agora, fazem-se as seguintes alterações no subdiretório *Make*:

```
my_icoFoam.C
EXE = $(FOAM_USER_APPBIN)/my_icoFoam
```

Não são necessárias alterações para o arquivo "*options*". Exclui-se, portanto, o antigo subdiretório de binários:


```
rm -rf linuxGccDP0pt  
cd ..
```

Agora, testa-se se o *solver* renomeado, *my_icoFoam*, (e sua instalação do OpenFOAM) funcionam digitando o seguinte comando no terminal:

```
wmake
```

Se tudo funcionar corretamente, um novo *solver* de binário deve aparecer no diretório `FOAM_USER_APPBIN`. Verifica-se isso com o seguinte comando:

```
ls $FOAM_USER_APPBIN
```

A próxima etapa agora é adicionar ao *solver* um campo escalar de temperatura, ou seja, a nova variável do problema. Nesta etapa, são adicionadas também as propriedades de transporte para o problema, como por exemplo, a difusividade térmica, *DT*. Os comandos adiante detalham os passos a serem seguidos:

Abra o *my_icoFoam.C* (ou o que você nomeou-o) com o seu editor de texto.

Primeiro, edite o "Aplicativo" para refletir o novo nome.

Seguindo o fluxo do programa, verifica-se que o arquivo 'createFields.H' é chamado antes do ciclo solução. Este arquivo foi copiado com o *solver* e tem as informações específicas referentes a quais variáveis serão resolvidos.

Abra o arquivo *createFields.H* em seu editor de texto.

O primeiro item carregado é a viscosidade cinemática do arquivo, *transportProperties*. Adiciona-se uma nova propriedade de transporte relacionada

com a difusão térmica que será indicada como DT. Em resumo, fazem-se as seguintes edições:

```
Info<< "Reading transportProperties\n" << endl;

IOdictionary transportProperties
(
    IOobject
    (
        "transportProperties",
        runTime.constant(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::NO_WRITE
    )
);

dimensionedScalar nu
(
    transportProperties.lookup("nu")
);
//Add here...

dimensionedScalar DT
(
    transportProperties.lookup("DT")
);
//Done for now...
```

Seguindo o texto do arquivo percebe-se que existem linhas que se referem à criação dos campos de pressão (p) e campos de velocidade (U). Adiciona-se então, um novo campo para a temperatura (T). A maneira mais rápida de fazer isso é para copiar e colar as linhas de pressão e depois editá-los adequadamente da seguinte forma:

```
Info<< "Reading field T\n" <<endl;

volScalarField T
```

```
(  
    IObject  
    (  
        "T",  
        runtime.timeName(),  
        mesh,  
        IObject::MUST_READ,  
        IObject::AUTO_WRITE  
    ),  
    mesh  
);
```

Note que o comando acima gerou um campo escalar de temperatura, e adicionou uma nova variável para o problema, "T". Salve as alterações.

O próximo passo é adicionar uma nova equação que descreve o transporte de energia. Para isso volta-se para a edição do arquivo *my_icoFoam.C*.

Uma vez que o transporte de energia depende do campo de velocidade, adiciona-se a equação de energia após a equação de momento (depois do *loop* PISO), mas antes que o passo de tempo seja escrito. Exemplo:

```

#           include "continuityErrs.H"

           U -= rUA*fvc::grad(p);
           U.correctBoundaryConditions();
       }

//add these lines...
       fvScalarMatrix TEqn
       (
           fvm::ddt(T)
           + fvm::div(phi, T)
           - fvm::laplacian(DT, T)
       );

       TEqn.solve();
//done adding lines...

       runTime.write();

```

Estas linhas adicionam uma nova equação para a variável de temperatura e utilizam a variável *phi*, que já fora utilizada na solução da equação de momento. Salve as mudanças execute novamente o comando *wmake*:

```
wmake
```

O próximo passo neste processo é para testar o novo *solver*. Para isto, pode-se modificar o tutorial *cavity* existente. A seguir são apresentados os passos:

Primeiro, copie os arquivos do tutorial *cavity* para uma nova pasta:

```

cd $FOAM_RUN/tutorials/incompressible/icoFoam
cp -r cavity $FOAM_RUN/my_icoFoam_cavity
cd $FOAM_RUN/my_icoFoam_cavity

```

Pode-se começar pela edição do dicionário *transportProperties*:

```
cd constant
```

Abra o dicionário *transportProperties* em seu editor de texto e adicione a seguinte linha abaixo, ou acima, da viscosidade cinemática nu:

```
DT [0 2 -1 0 0 0 0] 0.002;
```

Os termos entre colchetes referem-se às unidades do termo difusividade térmica, DT, enquanto o valor numérico à direita representa o valor absoluto associado.

Em seguida, cria-se um novo arquivo de condições iniciais e de contorno para o campo de temperatura:

```
cd ../0
cp p T
```

Abra o arquivo 'T' em seu editor.

Para este teste inicial, considera-se simplesmente que a parede móvel esta submetida a uma temperatura superior à temperatura das paredes fixas. Edite o arquivo para que ele se parece com o seguinte:

```
class          volScalarField;
  object       T;
}
//*****//

dimensions     [0 0 0 1 0 0 0];

internalField  uniform 300;

boundaryField
{
  movingWall
  {
    type        fixedValue;
    value       uniform 350;
  }

  fixedWalls
  {
    type        fixedValue;
    value       uniform 300;
  }

  frontAndBack
  {
    type        empty;
  }
}
```

Salve essas mudanças. Por último, há mais uma alteração a ser feita antes que se possa executar o *solver*.

Ao adicionar uma nova equação para resolver, nós precisamos dizer ao OpenFOAM que esquemas de discretização aplicam-se às equações. Isto é feito no dicionário *fvSchemes*. Entre no diretório "system" para este caso:

```
cd ../system
```

Abra o dicionário “*fvSchemes*” com seu editor de texto.

Agora, há dois principais itens adicionados na equação de transporte térmico acima: um termo divergente e um laplaciano. Sob cada uma dessas seções no dicionário, precisamos adicionar termos que correspondem ao que foi adicionado no código-fonte. Edite seu arquivo para que ele inclua o seguinte:

```
divSchemes
{
    default          none;
    div(phi,U)      Gauss linear; //NOTICE: there is no space between the comma and
the variables
    div(phi,T)      Gauss upwind;
}

laplacianSchemes
{
    default          none;
    laplacian(nu,U)  Gauss linear corrected;
    laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear corrected;
    laplacian(DT,T) Gauss linear corrected;
}
```

Salve essas alterações.

Em seguida, abra o dicionário *fvSolution*. As seguintes alterações são feitas:

```

solvers
{
    p PCG
    {
        //information about the pressure solver
    };
//add this...
    T
    {
        solver          BICCG;
        preconditioner  DILU;
        tolerance       1e-7;
        relTol          0;
    };
//done editing..

```

Deixe os termos referentes à variável de velocidade intactos. Salve as alterações. Revise o arquivo *controlDict*. Agora o *solver* modificado está pronto para ser testado e executado.

```

cd ..
my_icoFoam

```

A solução para o passo de tempo de 0,5 segundo deve ficar conforme ilustrado na Figura 11. Pode-se notar que o campo de temperatura tende a se deslocar para a direita, no mesmo sentido do vetor velocidade aplicado na face superior.

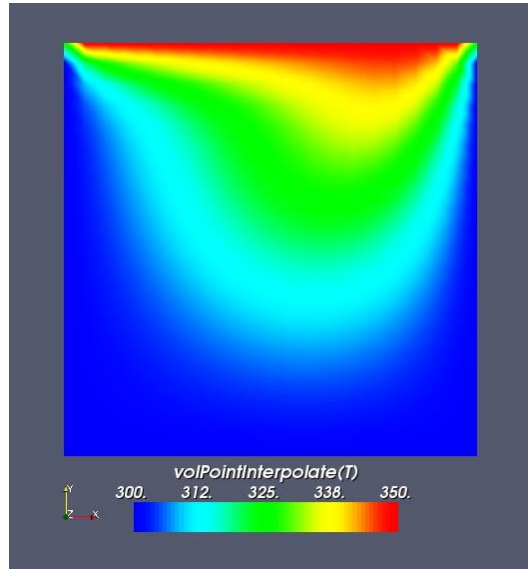


Figura 11: Solução my_icoFoam

Fonte: Autor

3.5 EXEMPLOS PRÉVIOS

Com o intuito de familiarizar-se com o *software* OpenFOAM foram reproduzidas simulações de alguns *solvers* próprios do pacote do OpenFOAM, e também alterou-se o *solver* laplacianFoam que resolve problemas para difusão do calor sem geração para incluir o termo fonte de geração de calor. Os exemplos a seguir apresentam resultados preliminares dessas simulações.

3.5.1 Difusão do Calor em uma placa quadrada

Neste exemplo é apresentado a distribuição de temperatura em uma quadrada para duas diferentes considerações. Na placa à esquerda consideraram-se termo fonte nulo, temperatura constante nas paredes inferior, superior e direita, e uma convecção na parede esquerda. Na placa da direita considerou-se as mesmas condições de contorno, entretanto aplicou-se um termo fonte para a geração de calor uniforme em todo o volume. A Figura 12 ilustra os resultados obtidos. A Equação (3.1) descreve a difusão do calor, com geração e transiente.

$$\nabla \cdot (\alpha \nabla T) + S_q = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

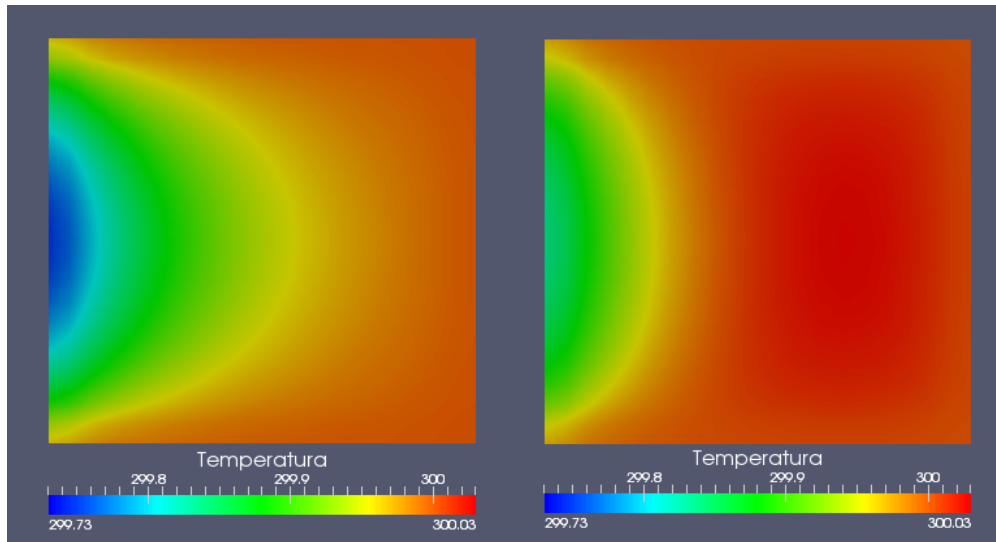


Figura 12: Distribuição de temperatura em uma placa, sem geração (esquerda) e com geração (direita).

Fonte: Autor

3.5.2 Fluidodinâmica com transferência de calor

Neste segundo exemplo, descrito no item 3.4, aplicou-se velocidade e temperatura constantes na superfície de uma cavidade quadrada onde está inserido um fluido incompressível, o fluxo é laminar e o fluido é newtoniano com viscosidade constante.

A Figura 13 ilustra os campos de velocidade e pressão, juntamente com a distribuição de temperaturas obtidos pela simulação. A Equação (3.2) descreve a equação de movimento simplificada.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi U) - \nabla \cdot (\mu \nabla U) = -\nabla p \quad (3.2)$$

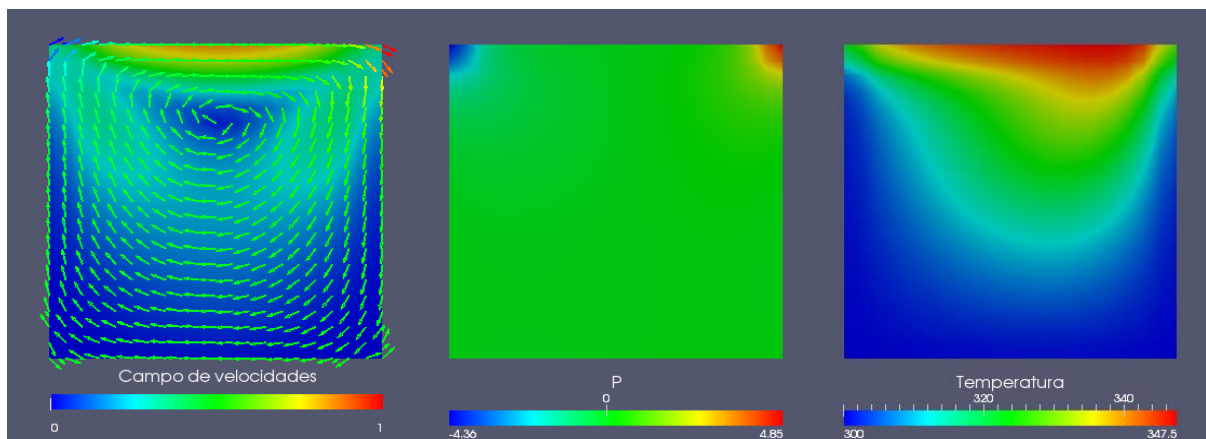


Figura 13: Campo de velocidade (esquerda), campo de pressão (centro) e distribuição de temperatura (direita).

Fonte: Autor

3.5.3 Combustão do metano com ar

No último exemplo foi simulada a combustão do metano com ar em uma cavidade inicialmente preenchida com gás inerte, nitrogênio. Na parede à esquerda há uma vazão mássica constante de metano, e à direita uma vazão mássica constante de ar.

A Figura 14 apresenta a distribuição de metano e do CO₂ formado pela reação de combustão para dois intervalos de tempo.

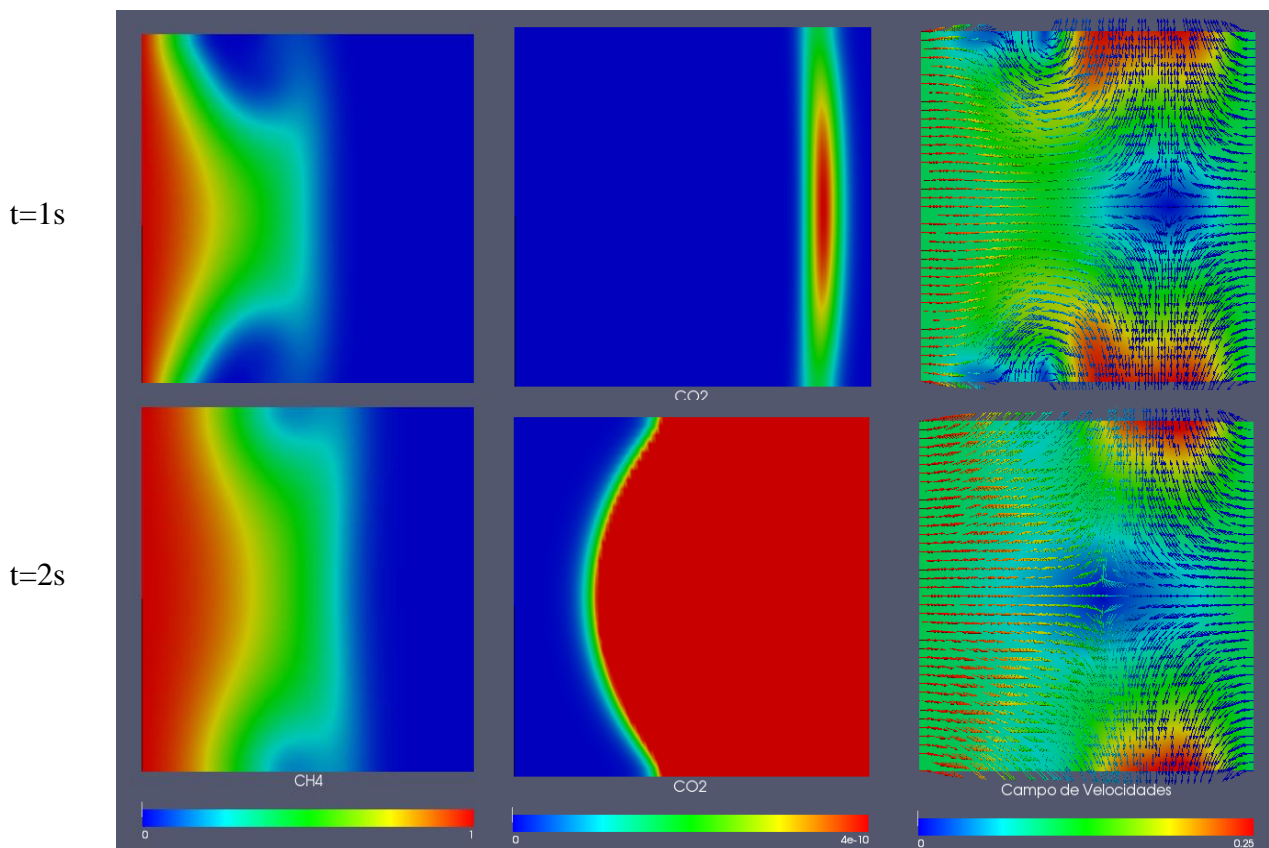


Figura 14: Simulação da combustão do metano com ar

Fonte: Autor

Capítulo 4:

Modelagem Numérica Transiente em Não Equilíbrio Térmico Local da Combustão Smouldering

“Obs: Este capítulo dedica-se a apresentar a modelagem utilizada nesta dissertação, bem como suas simplificações. É realizado também um teste de malhas para o problema proposto, e por último, encerra-se o capítulo com uma validação do modelo comparando as curvas de evolução de temperatura simulada e real.”

4 MODELAGEM NUMÉRICA TRANSIENTE EM NÃO EQUILÍBRIO TÉRMICO LOCAL DA COMBUSTÃO SMOULDERING

Conforme apresentado no tópico 2.2.1, um modelo matemático completo foi desenvolvido pela equipe do Instituto de Mecânica dos Fluidos de Toulouse (IMFT) [(LAPENE; MARTINS, et al. 2007), (LAPENE; DEBENEST, et al. 2008) apud (MARTINS, 2008)]. Resumidamente, para descrever as equações da transferência de calor no meio poroso reativo, uma descrição homogênea foi utilizada. Transporte térmico em não equilíbrio foi considerado pelo modelo, e tratou-se como um modelo de “duas temperaturas”: uma para a fase gasosa e outra para a fase sólida.

Pretti e Martins (2014) resolveram numericamente o balanço de energia para a fase sólida por diferenças finitas conforme apresentado anteriormente, entretanto faz-se necessário tratar a modelagem matemática apresentada como duas equações de energia acopladas (fases sólida e gasosa), e dessa forma, obter resultados numéricos para ambas as fases.

É importante destacar que nesta modelagem a energia liberada pelo processo de combustão é substituída por um termo fonte de geração de calor. Este termo fonte está associado a um número onde são consideradas propriedades termofísicas do combustível em estudo, como massa específica e poder calorífico. O modelo agora será tratado de forma mais abrangente, na forma tridimensional.

A Tabela 1 a seguir apresenta valores de parâmetros numéricos, parâmetros físicos e propriedades térmicas utilizadas neste trabalho. Pode-se observar que existem dois valores para o termo fonte de geração de calor, pois foram utilizados dois combustíveis neste trabalho, fezes e carvão.

Tabela 1 - Tabela de parâmetros de simulação

Parâmetros numéricos	Descrição	Unidade
$dt=5 \times 10^{-2}$	Intervalo de tempo	s
92395	Número de nós	
$t_{sim}=16.500(\text{fezes})$ e $17.300(\text{carvão})$	tempo de experimento	s
Parâmetros físicos		
$T_{amb}=300$	Temperatura ambiente	K
$V_{ar,ent}=0.0385$	Velocidade do ar de entrada	$m\ s^{-1}$
$V_{ar,sai}=0.0385$	Velocidade do ar de saída	$m\ s^{-1}$
$\rho_{carvão}=720$	Densidade do carvão	$kg\ m^{-3}$
$\rho_{fezes}=1123$	Densidade das fezes	$kg\ m^{-3}$
Propriedades térmicas		
$h=20$	Coeficiente de convecção natural	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
$h_{GS}=h_{SG}=50$	Coeficiente de convecção gás-sólido	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
$Q_{carvão}=1.45 \times 10^6$	Geração de calor do carvão	$J\ m^{-3}$
$Q_{fezes}=1.58 \times 10^6$	Geração de calor das fezes	$J\ m^{-3}$
$C_{pS}=1250$	Calor específico do carvão	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$\lambda_S=0.16$	Condutividade térmica do sólido	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$

A Tabela 2 a seguir apresenta os esquemas de discretização utilizados neste trabalho. Cabe ressaltar que o usuário pode selecionar os esquemas de discretização conforme sua conveniência.

Tabela 2 - Esquemas de discretização

Operador	Esquema de discretização
dt	Euler
Gradiente	Gauss linear
Divergente	Gauss linear
Laplaciano	Gauss linear corrected
Interpolador	Linear

As simulações foram realizadas no Laboratório de Fenômenos de Transporte Computacional (LFTC) da Universidade Federal do Espírito Santo. O LFTC, com instalação física de 36 m², desenvolve atividades e pesquisa em simulação numérica de escoamentos de fluidos, transferência de calor, análise termoeconômica e combustão em meios porosos reativos.

O computador utilizado neste trabalho possui 20 núcleos, mas somente 12 núcleos foram utilizados, pois os 8 núcleos remanescentes estavam sendo dedicados à simulação de outros trabalhos. Em média, cada simulação dispendeu um tempo de 35 a 40 horas para sua completa execução. Os dados foram coletados e exportados para uma planilha para posterior confecção de gráficos.

4.1 EQUAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Com o intuito de simular os perfis térmicos para ambas as fases obtidos pela célula de combustão foi desenvolvido um *solver* no OpenFOAM para resolver numericamente as equações de governo para o balanço de energia das fases sólida e gasosa na forma tridimensional. As equações deste modelo seguem:

Balanço de energia da fase gasosa:

$$\varepsilon_g(\rho c_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + (\rho c_p)_g \vec{V}_g \nabla \cdot (T_g) = \nabla \cdot (\lambda_g \nabla T) + \Gamma_{g,s}(T_s - T_g) + Q_g + h(T_{amb} - T_g) \quad (4.1a)$$

Balanço de energia da fase sólida:

$$\varepsilon_s(\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T) + \Gamma_{g,s}(T_g - T_s) + Q_g + h(T_{amb} - T_s) \quad (4.1b)$$

As hipóteses consideradas no modelo são as seguintes:

- A frente de combustão é modelada como uma frente de geração de calor, com uma determinada espessura pré-estabelecida, que se desloca no interior da célula com uma velocidade constante e uniforme;
- As frações volumétricas de sólido e gás são constantes ao longo de todo o tempo de simulação, ou seja, quedas no leito não são consideradas pelo modelo;
- As propriedades termofísicas do gás e do sólido como massa específica, capacidade calorífica e condutividade térmica são consideradas constantes;
- Os coeficientes de troca térmica convectiva, h , e troca térmica gás-sólido, $\Gamma_{g,s}$, são constantes;
- O ar entra e sai no leito a uma dada vazão mássica uniforme;
- O termo fonte de geração de calor, Q , é constante;
- As paredes do reator são modeladas como superfícies adiabáticas.

O *solver* desenvolvido no OpenFOAM resolve as equações (4.1a) e (4.1b) acopladas fazendo uso do método dos volumes finitos. Devido à um certo grau de complexidade requerido para a criação deste *solver* descreve-se, brevemente, no tópico seguinte o procedimento adotado para criar este *solver*.

4.2 CRIAÇÃO DO SOLVER

Segue-se agora uma breve descrição da criação do *solver* utilizado para resolver as equações (4.1a) e (4.1b) no OpenFOAM. O *solver* criado recebeu genericamente o nome de *solidphaseFoam*. Pode-se notar que a criação de um novo *solver*, às vezes, segue um procedimento muito similar à alteração de um *solver* previamente existente conforme explicado no tópico 3.4 anteriormente.

Para desenvolver o *solver* foram criados dois campos escalares de temperatura no arquivo *createfields.H*, um campo para representar a temperatura do sólido e outro para representar a temperatura do gás; um campo vetorial para a velocidade de escoamento do gás no interior da célula; um campo no formato *expressionSource* para declarar o termo fonte de geração de energia no interior do leito (Q); e por último, foram declaradas as propriedades e constantes envolvidas no modelo matemático. Abaixo, seguem alguns exemplos de como esses termos foram declarados no arquivo *createfields.H* do OpenFOAM.

Declaração do campo escalar de temperatura para a fase gasosa (TG):

```
volScalarField TG
(
    IObject
    (
        "TG",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IObject::MUST_READ,
        IObject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);
```

Declaração do campo vetorial para a velocidade de escoamento do gás (vG):

```
volVectorField vG
(
    IObject
    (
        "vG",
        runTime.timeName(),
        mesh,
        IOobject::MUST_READ,
        IOobject::AUTO_WRITE
    ),
    mesh
);
```

Declaração de um campo para declarar o termo fonte de geração de calor (Q) no formato *expressionSource*:

```
expressionSource<scalar> Q
(
    IOdictionary
    (
        IObject
        (
            "QDict",
            runTime.constant(),
            mesh,
            IOobject::MUST_READ,
            IOobject::AUTO_WRITE
        )
    ),
    mesh
);
```

Declaração de uma propriedade física, por exemplo massa específica do sólido (rhoS), as demais propriedades são declaradas de forma análoga a esta:

```
dimensionedScalar rhoS
(
    transportProperties.lookup("rhoS")
);
```

Posteriormente as equações (4.1a) e (4.1b) foram inseridas no arquivo formato .C, no caso em questão, *solidphaseFoam.C*. Neste arquivo as equações são inseridas de acordo com a sintaxe proposta no *Programmers Guide* do OpenFOAM, que é um guia de uso para o programador. Abaixo segue uma figura retirada do *Programmers Guide* com as principais sintaxes utilizadas, como por exemplo, declaração de derivadas temporais, espaciais, divergente, gradiente, laplaciano, etc.

Term description	Implicit / Explicit	Text expression	fvm::/fvc:: functions
Laplacian	Imp/Exp	$\nabla^2 \phi$ $\nabla \cdot \Gamma \nabla \phi$	laplacian(phi) laplacian(Gamma, phi)
Time derivative	Imp/Exp	$\frac{\partial \phi}{\partial t}$ $\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}$	ddt(phi) ddt(rho, phi)
Second time derivative	Imp/Exp	$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)$	d2dt2(rho, phi)
Convection	Imp/Exp	$\nabla \cdot (\psi)$ $\nabla \cdot (\psi \phi)$	div(psi, scheme)* div(psi, phi, word)* div(psi, phi)
Divergence	Exp	$\nabla \cdot \chi$	div(chi)
Gradient	Exp	$\nabla \chi$ $\nabla \phi$	grad(chi) gGrad(phi) lsGrad(phi) snGrad(phi) snGradCorrection(phi)
Grad-grad squared	Exp	$ \nabla \nabla \phi ^2$	sqrGradGrad(phi)
Curl	Exp	$\nabla \times \phi$	curl(phi)
Source	Imp Imp/Exp†	$\rho \phi$	Sp(rho, phi) SuSp(rho, phi)

Figura 15: Sintaxe de equações no OpenFOAM

Fonte: Programmers Guide – OpenFOAM

Desta forma as equações (4.1a) e (4.1b) escritas de acordo com a sintaxe do OpenFOAM, Figura 15, são:

```

solve
    (
        epsilonG*rhoG*cpG*(fvm::ddt(TG)) + rhoG*cpG*(fvc::div(vG*TG)) - fvm
        ::laplacian(lambdaG,TG) + hSG*TG + h*TG == QG + h*Tamb + hSG*TS
    );

solve
    (
        epsilonS*rhoS*cpS*(fvm::ddt(TS)) - fvm::laplacian(lambdaS,TS) + hGS
        *TS + h*TS == Q() + h*Tamb + hGS*TG
    );
}

```

Basicamente estes foram os principais passos para a criação do *solver*. O passo seguinte consiste em gerar a geometria aplicável para a célula de combustão e gerar diferentes malhas para posterior teste de malha e comparação de resultados.

4.3 ESTUDO DA MALHA

As malhas foram geradas utilizando-se um *software* também gratuito, o SALOMÉ. Neste *software* a geometria foi gerada por um editor CAD, e posteriormente dividiu-se a geometria em tetraedros. Vale lembrar que é sempre necessário nomear as superfícies onde serão aplicadas as condições iniciais e de contorno para posterior reconhecimento destas faces pelo OpenFOAM.

O arquivo da malha gerado no SALOMÉ deve ser salvo no formato *.unv* para posterior exportação para o OpenFOAM. Insere-se então este arquivo no formato *.unv* na pasta que contém o caso a ser simulado. A malha gerada é importada digitando-se o seguinte comando no terminal a partir da pasta que contém o *case* a ser simulado:

ideasUnvToFoam *nomedoarquivo.unv*

Foram testadas várias malhas para simular a transferência de energia para as fases sólidas e gasosas da célula de combustão. As características de cada malha são apresentadas na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 - Número de nós das malhas utilizadas

Malha	Número de nós
Malha 1	1144
Malha 2	1942
Malha 3	5541
Malha 4	11955
Malha 5	30903

A Figura 16 mostra dois tipos de malhas geradas no Salomé que foram utilizadas, as malhas (1) e (3) estão representadas pelas letras (a) e (b), respectivamente.

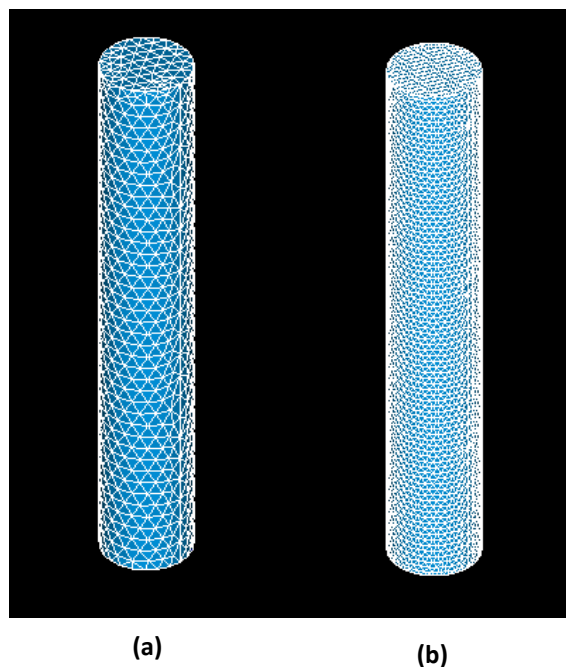


Figura 16: (a) Malha 1 e (b) malha 3

Fonte: Autor

4.3.1 Teste de Malhas

O teste de malha geralmente é realizado em problemas computacionais para assegurar que a solução encontrada é independente do tamanho da grade do volume discretizado, ou do número de nós para uma dada discretização. Para encontrar uma malha cuja solução seja independente do número de nós simulou-se a evolução de temperatura das fezes para as fases sólida e gasosa durante um tempo de 16500 segundos, refinando a malha partindo da malha 1 até a malha 5, e calculou-se o desvio máximo de Temperatura conforme explicado a seguir. O APÊNDICE A apresenta as curvas simuladas para as fases sólida e gasosa das fezes para as cinco malhas testadas.

4.3.1.1 Desvio Percentual Máximo de Temperatura

A Tabela 4 abaixo apresenta os desvios percentuais máximos na evolução de temperatura para as fezes relativo a um dado termopar, termopar T3 por exemplo, simulado para a fase gasosa. Pode-se observar que à medida que refina-se a malha o perfil simulado tende a apresentar um desvio percentual de temperatura cada vez menor.

Tabela 4 - Número de nós das malhas utilizadas e desvios percentuais máximos de temperatura

Malha	Número de nós	Desvio máximo de temperatura (%) [*]
Malha 1	1144	4,4
Malha 2	1942	2,4
Malha 3	5541	0,6
Malha 4	11955	0,1
Malha 5	30903	-

De acordo com a Tabela 4, optou-se pela utilização da malha 5 para as simulações deste trabalho, pois um aumento no número de nós acima do apresentado pela malha 5 não apresentaria uma diferença representativa nos resultados numéricos, e

^{*} Os desvios percentuais máximos calculados são relativos ao termopar T3 obtidos na evolução de temperatura para a fase gasosa das fezes.

além disso tornaria a solução cada vez mais custosa e onerosa em termos computacionais.

4.3.1.2 Efeito do número de nós na evolução da temperatura

Apesar dos pequenos desvios apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada**.Tabela 4 para a fase gasosa induzirem o leitor a pensar que as diferenças de temperaturas são pouco expressivas, observou-se que para a fase sólida malhas mais grosseiras apresentaram um certo grau de instabilidade numérica na simulação da evolução de temperatura, como pode ser observado na Figura 17. Nesta figura, o gráfico (a) apresenta a simulação de evolução da temperatura para as fezes para o termopar T12 da malha 1, e os demais gráficos apresentam a evolução para as demais malhas.

Pode-se observar o efeito de uma malha grosseira nos resultados simulados, como por exemplo o gráfico (a), pois durante a região inicial de resfriamento a malha 1 apresentou um certo grau de instabilidade numérica. Observa-se também nesta figura que, à medida que aumenta-se o número de nós, a curva de evolução da temperatura tende a ser cada vez mais uniforme de (a) para (e), e a instabilidade numérica se torna praticamente desprezível na malha 5. Portanto, considerando o pequeno desvio percentual máximo de temperatura apresentado anteriormente na Tabela 2, e a uniformidade no gráfico de evolução de temperatura, optou-se pela utilização da malha 5 para as simulações deste trabalho.

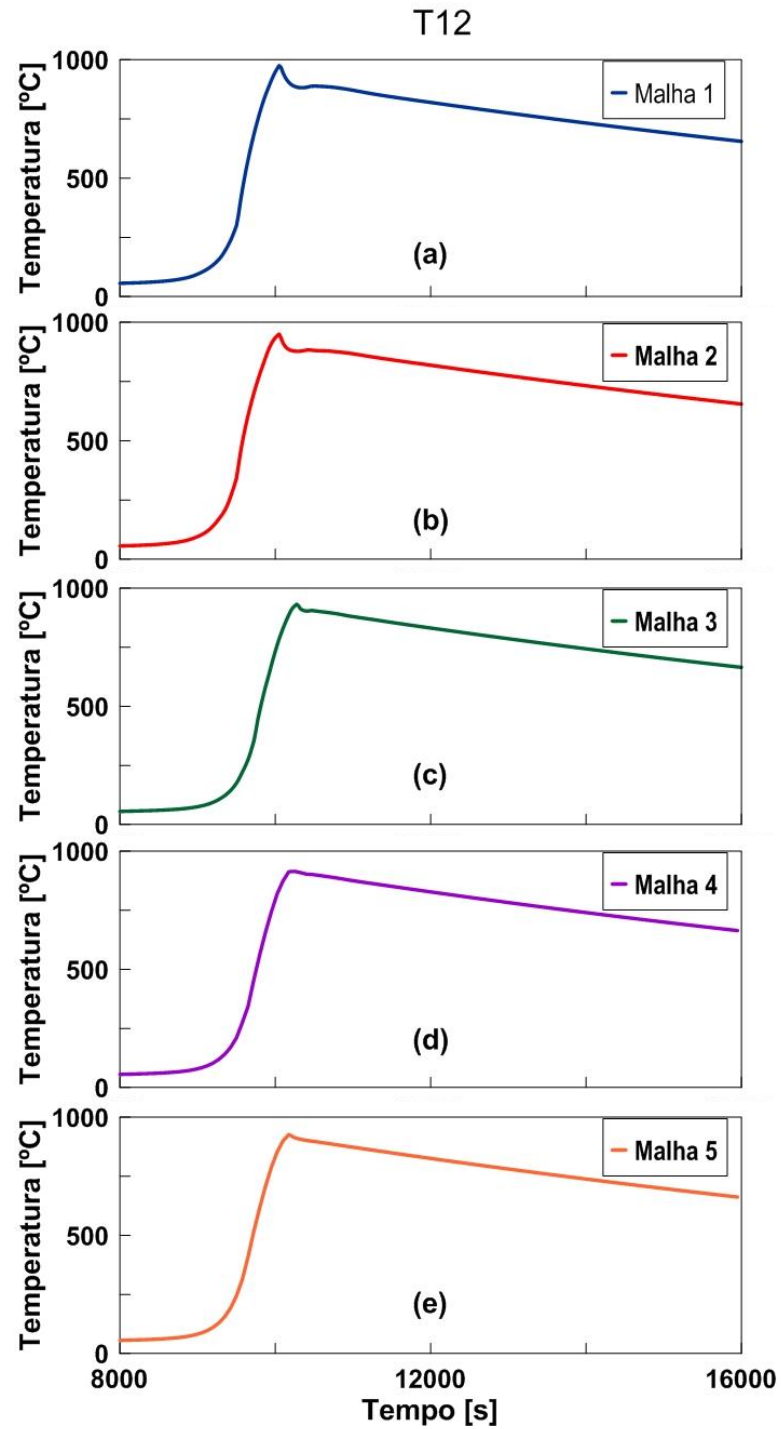


Figura 17: Efeito do número de nós na simulação de evolução da temperatura da fase sólida das fezes, termopar T12.

Fonte: Autor

4.4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Para realizar as simulações numéricas utilizando o *solver* desenvolvido para este trabalho gerou-se previamente a geometria apresentada na Figura 18 a seguir. A Figura 18 (a) e (b) apresenta, respectivamente, as vistas isométrica e frontal da geometria do interior da célula de combustão, que posteriormente foi utilizada para gerar as malhas da Tabela 1.

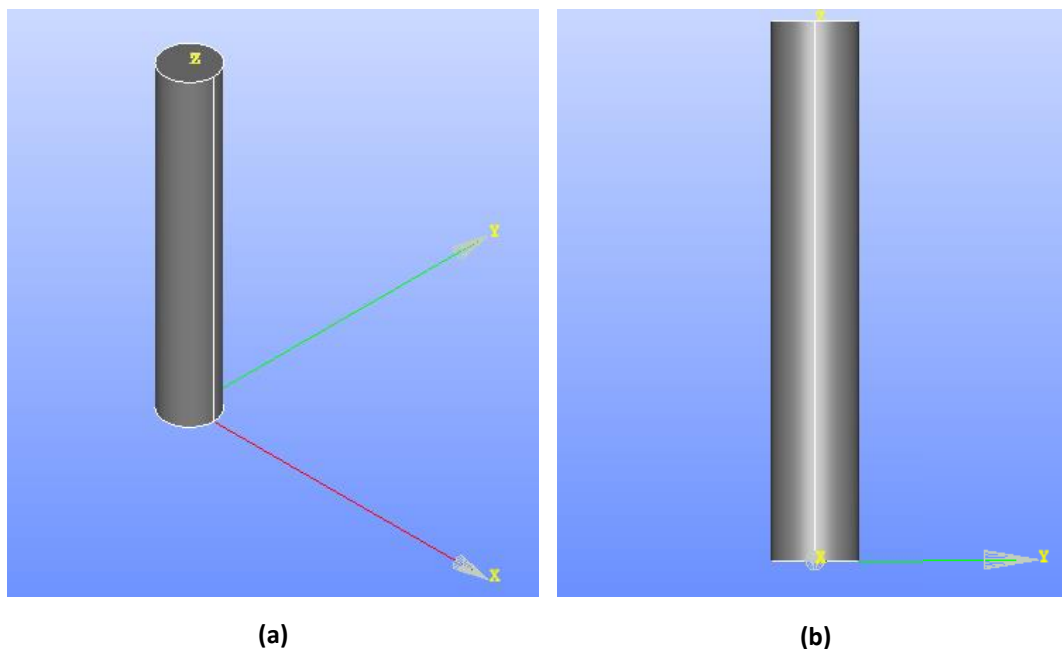


Figura 18: (a) vista isométrica e (b) frontal do meio contido no interior da célula de combustão, respectivamente.

Fonte: Autor

A célula de combustão em questão foi desenvolvida por Monhol, Pretti e Martins (2013). O leito consiste em um cilindro vertical de aço inoxidável, diâmetro interno de aproximadamente 73mm e altura 450mm. O diâmetro foi projetado amplo o suficiente para limitar as perdas de calor através das paredes do reator e, ao mesmo tempo, estreito o suficiente para evitar a preparação de grandes amostras experimentais. O cilindro é rodeado por dois tipos de materiais isolantes térmicos: uma manta térmica (Superwool 607 blanket, Thermal Ceramics, condutividade térmica = $0.28 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a $982 \text{ }^\circ\text{C}$) e 46 mm de espessura de fibras refratárias

(Kaowool HS 45 Board, Thermal Ceramics, condutividade térmica = $0.21 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$). A Figura 19, apresentada no capítulo 1, representa um croqui desta célula de combustão, e é aqui reproduzida para facilitar a explanação.

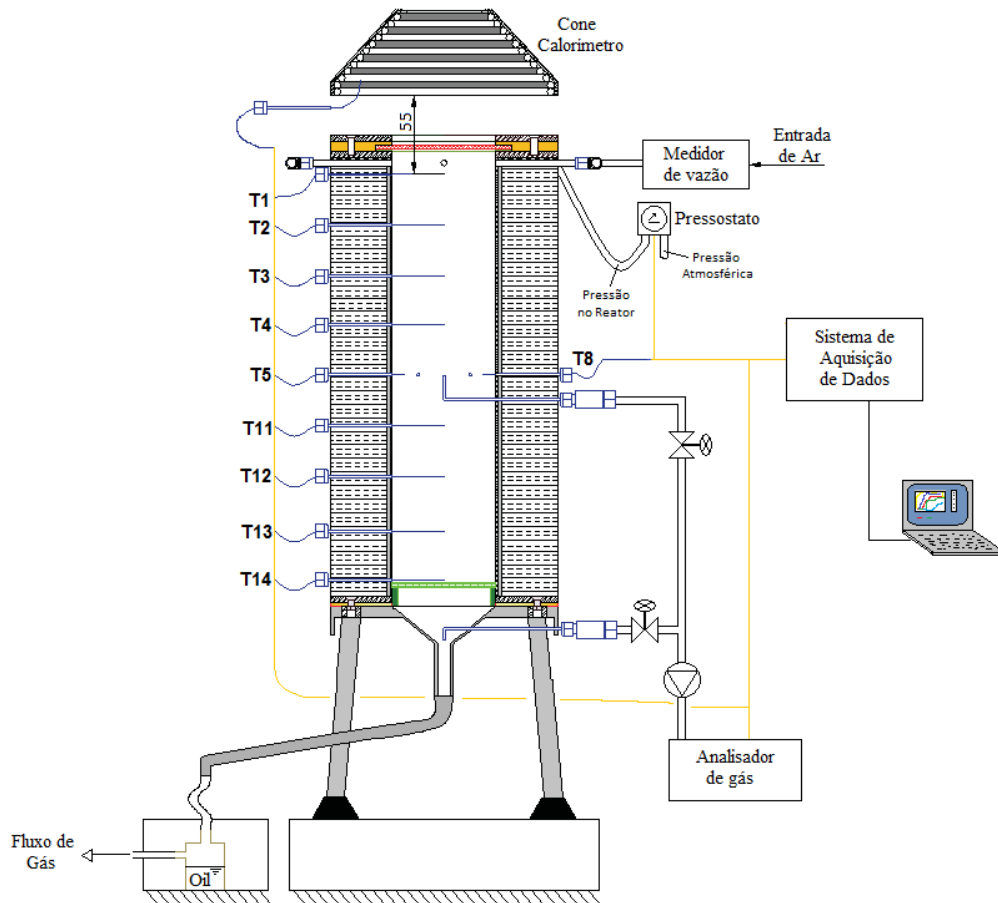


Figura 19: Croqui Célula de Combustão

Fonte: Martins M.F.(2008) (adaptado)

O reator é minuciosamente instrumentado. Um grupo de oito termopares em linha de 1,5 mm de diâmetro e 122 mm de comprimento (T1, T2, T3, T4, T11, T12, T13, T14) estão localizados em $Z=450$, 405, 360, 315 e 225, 180, 135, 90 mm, permitindo medir a temperatura ao longo do eixo da célula em diferentes alturas. Uma coroa de seis termopares iguais aos descritos anteriormente, porém de 95 mm de comprimento (T5, T6, T7, T8, T9, T10), permite medir a temperatura ao longo de um plano horizontal que está localizado em $Z=180\text{mm}$, ver Figura 19 e Figura 20. Esta disposição da coroa tem como objetivo estudar a superfície geométrica da frente de combustão.

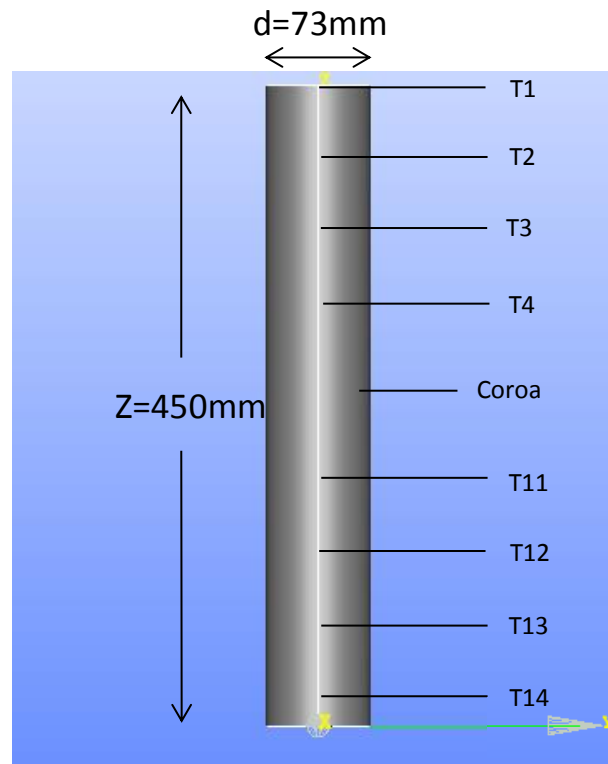


Figura 20: Representação geométrica da célula de combustão e disposição física dos termopares

Fonte: Autor

Para que as simulações fossem realizadas foram declaradas as condições iniciais e de contorno para o problema descritas sucintamente a seguir:

- Condições iniciais, ($t=0$):
 - Todo o leito encontra-se inicialmente à temperatura ambiente, ou seja, $T_{0,Ar}=T_{0,sólido}=T_{amb}=300K$;
 - A velocidade do ar tanto na entrada quanto na saída da célula de combustão é uniforme, e é uma medida da vazão de ar medida pelo rotâmetro nos ensaios experimentais ($V_{ar,ent}=V_{ar,sai}=38,5mm/s$), Figura 21.

- Condições de contorno:
 - As paredes laterais da célula de combustão são consideradas adiabáticas, e as superfícies superior e inferior estabeleceu-se $T=300\text{K}$ conforme mostra a Figura 21;
 - O ar entra no leito pela face superior da célula à temperatura ambiente e sai pela face inferior à uma temperatura de 500K .

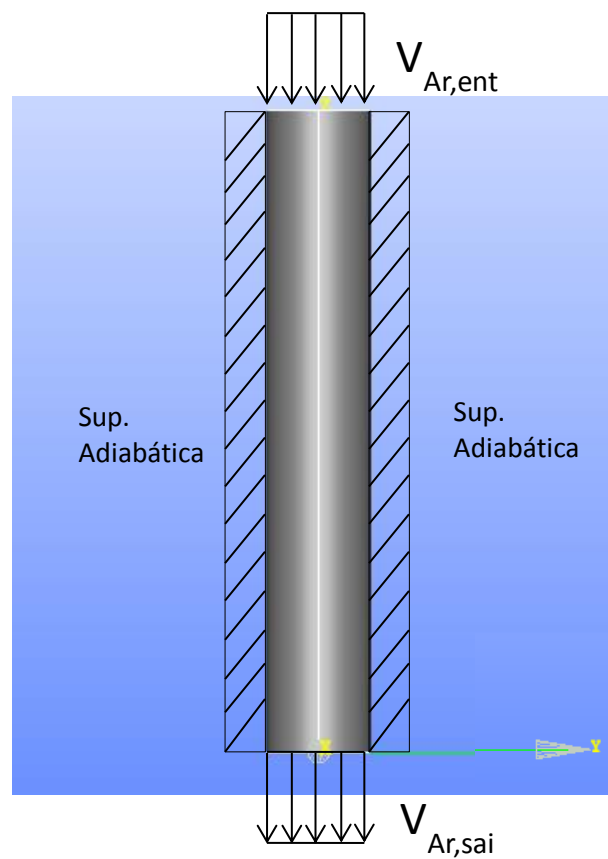


Figura 21: Representação das condições iniciais e de contorno do problema

Fonte: Autor

4.5 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Tendo conhecimento da descrição do problema apresentada na seção anterior pode-se fazer uma análise da simulação da evolução de temperatura no interior da célula de combustão com o objetivo de validar os resultados obtidos. Primeiramente é feita uma caracterização das propriedades termofísicas para ambas as amostras simuladas que são as fezes humana e o carvão vegetal.

4.5.1 Características da matéria-prima simulada

As simulações da parte térmica no meio poroso foram realizadas tendo como base de dados as propriedades termofísicas das fezes, pois as fezes apresentaram uma evolução mais homogênea e suave de temperatura no interior do leito, quando comparada ao carvão, durante os ensaios realizados por Monhol, Pretti e Matins (2013) conforme pode-se notar na Figura 22. Desta forma as premissas do processo de validação dos resultados são mais facilmente avaliadas.

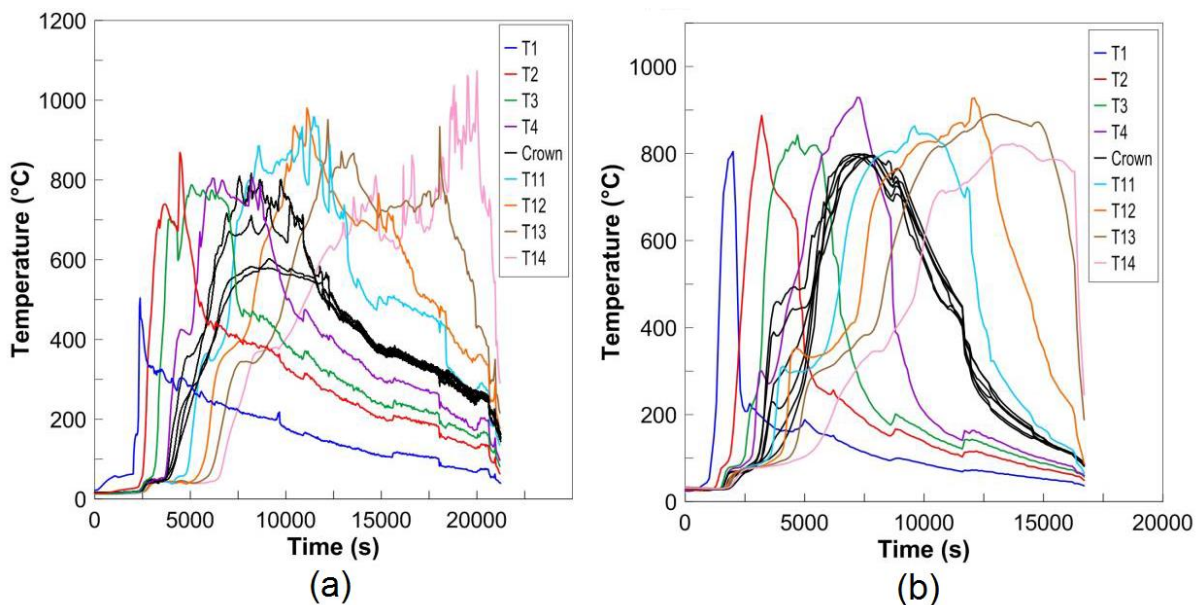


Figura 22: Evolução de temperatura ao longo do tempo - (a) Carvão e (b) Fezes

Fonte: Monhol, Pretti e Matins [2013]

As propriedades das fezes foram extraídas do artigo “*Cocurrent Combustion of Human Feces and Polyethylene Waste*” - (MONHOL; MARTINS, 2015). As amostras de fezes, após o esmagamento, tem a forma de grãos com aproximadamente 5 mm de diâmetro, densidade de 1123 kg m^{-3} (determinados pelo Método de Deslocamento). O poder calorífico superior, 23,2 MJ/kg, foi determinado utilizando uma bomba calorimétrica (GCA-Unicamp), de acordo com a ABNT NBR 8633/84, e balança eletrônica de alta precisão (QUIMIS-10-4 g-RBC INMETRO).

Para o carvão o poder calorífico superior foi medido utilizando a bomba calorimétrica disponível no LCC (Laboratório de Combustíveis e Combustão) da UFES, 20MJ/kg, e consideraram-se propriedades como massa específica, condutividade e capacidade calorífica similares às da madeira (Tabela A-3 INCROPERA, F.P.. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massas. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011).

4.5.2 Comparação entre a evolução de temperatura real e simulada

A Figura 23 apresenta as curvas de evolução de temperatura real (obtidas experimentalmente), e simulada (obtidas numericamente), para as fezes considerando uma espessura de frente de geração de calor igual a 15mm. O APÊNDICE D apresenta a evolução de temperatura das fezes para as fases sólida e gasosa para três diferentes espessuras da frente, 10, 15 e 20mm.

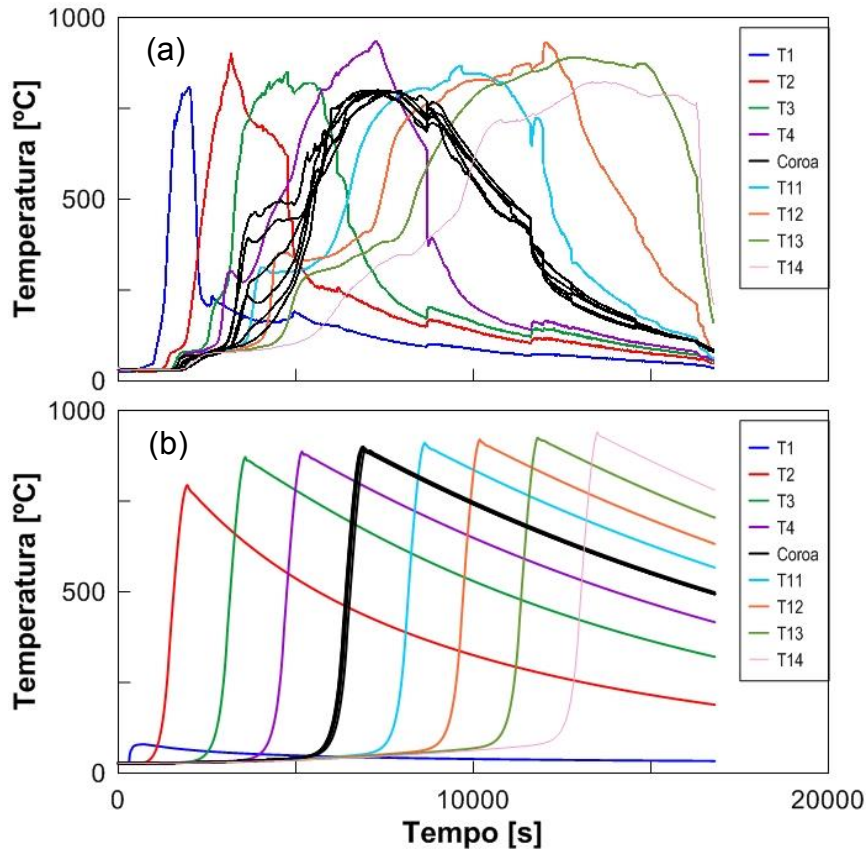


Figura 23 - Evolução de temperatura: (a) real e (b) simulada

Fonte: Autor

Na validação dos resultados simulados optou-se pela utilização das curvas para espessura de frente igual a 15mm, pois estas apresentam uma temperatura média de picos aproximadamente igual à temperatura média de picos reais. Portanto, pode-se concluir que é possível, numericamente, estimar a espessura da frente de chama apenas comparando as temperaturas médias de picos simuladas para diferentes espessuras simuladas com a temperatura média de picos obtidas experimentalmente em laboratório.

Com o objetivo de validar os resultados simulados plotou-se no mesmo gráfico as curvas de evolução de temperatura ao longo do tempo simuladas e reais para dois termopares, os termopares T3 e T4, Figura 24. As curvas simuladas para todos os termopares estão disponíveis no APÊNDICE D. Utilizaram-se apenas dois termopares nesta seção para uma melhor visualização da comparação entre a evolução de temperatura real e simulada.

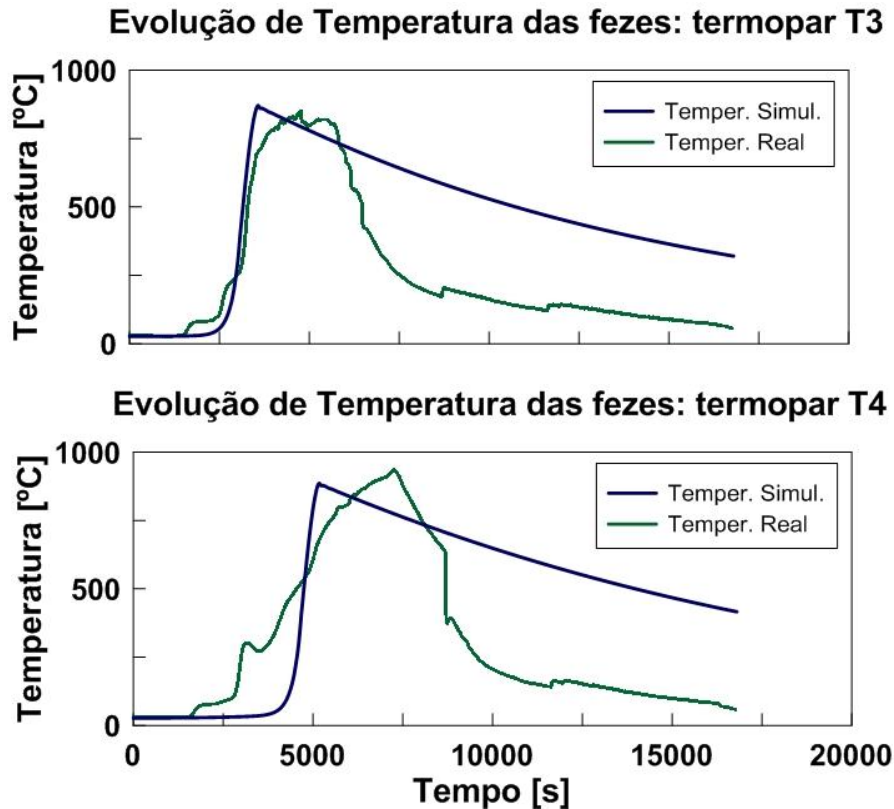


Figura 24: Comparação entre a evolução de temperatura real e simulada, termopar T3 e T4

Fonte: Autor

Observando a Figura 24 pode-se notar que a evolução de temperatura simulada apresentou resultados, em termos qualitativos, relativamente semelhantes à evolução de temperatura real, uma vez que as curvas na figura apresentam basicamente um processo de aquecimento seguido por um processo de resfriamento.

As diferenças mais significativas, expressas quantitativamente pelas diferenças de temperatura entre as curvas, podem ser explicadas pelas hipóteses consideradas na descrição do modelo. Entre elas podemos destacar as mais expressivas:

- A simplificação ao tratar o problema apenas com equações que remetam à transferência de calor e à mecânica dos fluidos, sem considerar no modelo equações que simulem as reações químicas presentes no leito.
- Considerações nas condições iniciais e de contorno.
- Quedas abruptas no leito durante a realização dos ensaios experimentais.

Em resumo, ao analisar as curvas da Figura 24, pode-se concluir que apesar das hipóteses consideradas para simular a evolução de temperatura no interior do leito para uma dada matéria-prima, resultados qualitativamente semelhantes são obtidos entre as curvas reais e simuladas, e os picos de temperatura atingidos por cada termopar são também relativamente semelhantes.

Capítulo 5:

Influência de Parâmetros Físicos na Evolução de Temperatura no Interior do Leito

“Obs: Este capítulo, como o próprio nome sugere, dedica-se a apresentar a influência de parâmetros físicos, como espessura da frente, fração volumétrica de sólido e velocidade de resfriamento, na evolução de temperatura no interior do leito.”

5 INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FÍSICOS NA EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO LEITO

Sabe-se que muitas são as configurações e maneiras de se estudar a combustão em meio poroso, como por exemplo suas configurações co-corrente e contra-corrente, avaliação de diferentes tipos de biomassa bem como seus parâmetros físicos (granulometria), poder calorífico, porosidade, massa específica, etc. Todos estes fatores exercem influência sobre a evolução da temperatura no interior do leito.

Com o intuito de avaliar esta influência, neste capítulo é mostrado graficamente a influência de três parâmetros físicos na evolução de temperatura das fezes. Os parâmetros avaliados são:

1. Espessura da frente de chama
2. Fração volumétrica de sólido
3. Velocidade de resfriamento

Vale lembrar que apesar das simulações da espessura da frente e fração volumétrica terem sido realizadas para as fezes, os resultados obtidos são qualitativamente semelhantes para outras diferentes matérias-primas.

5.1 EFEITO DA ESPESSURA DA FRENTE DE CHAMA

Para avaliar a influência exercida pela espessura da frente de chama na evolução de temperatura das fezes, foram simuladas três diferentes espessuras para a frente: 10, 15 e 20mm. Como o modelo apresentado não considera as reações de combustão, a espessura da frente é simulada considerando a espessura do volume no interior do leito responsável pela geração de calor, Figura 25.

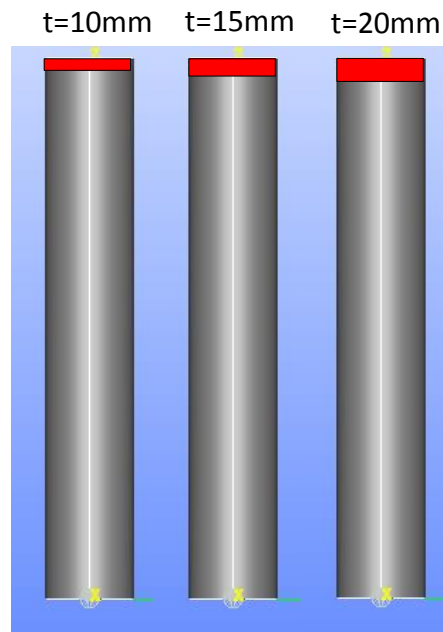


Figura 25 - Espessuras simuladas

Fonte: Autor

O APÊNDICE B apresenta os resultados obtidos para a evolução de temperatura das fezes para as três espessuras simuladas, tanto para a fase do gás quanto para o sólido. Para sintetizar o comportamento apresentado ao variar a espessura da frente, plotou-se no mesmo gráfico a evolução de temperatura para um dado termopar, T4 por exemplo, para as três espessuras simuladas. O resultado obtido é apresentado na Figura 26 a seguir.

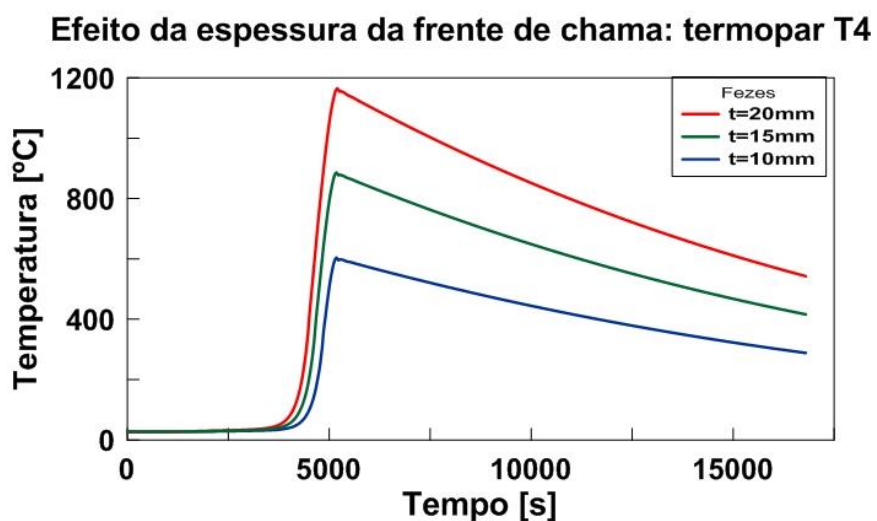


Figura 26 - Efeito da espessura da frente de chama

Fonte: Autor

Conforme pode-se observar na Figura 26, à medida que aumenta-se a espessura da frente de chama observa-se um aumento na curva de evolução de temperatura, uma vez que aumenta-se o volume no interior do leito responsável pela geração de calor.

Ao comparar os resultados obtidos para as três espessuras da frente, APÊNDICE B, pode-se notar que a espessura que corresponde a 15mm apresenta uma média de picos de temperatura similar à média de picos dos resultados obtidos experimentalmente, o que também é ilustrado na Figura 27. Portanto a espessura de 15 mm foi utilizada na validação dos resultados conforme apresentado no tópico 4.5.2 anteriormente.

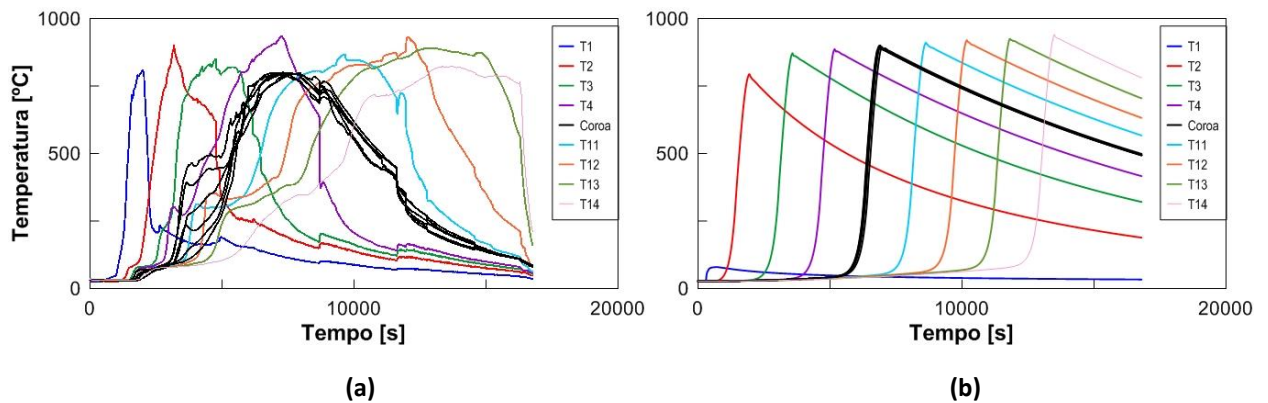


Figura 27 - Evolução de temperatura: (a) real e (b) simulada

Fonte: Autor

Com o objetivo de estudar os processos de aquecimento e resfriamento no interior do leito registraram-se imagens, em intervalos constantes de tempo, da simulação da temperatura no interior do leito.

A Figura 28 apresenta a simulação da temperatura das fezes no interior do leito, espessura da frente de 15mm, para intervalos constantes de tempo. Nesta figura pode-se observar que a frente de geração de energia, que hipoteticamente simula uma frente de chama, avança mais rapidamente do que a frente térmica, deixando a região acima da frente (parte superior do leito) aquecida, e a região abaixo da frente (parte inferior do leito) relativamente fria.

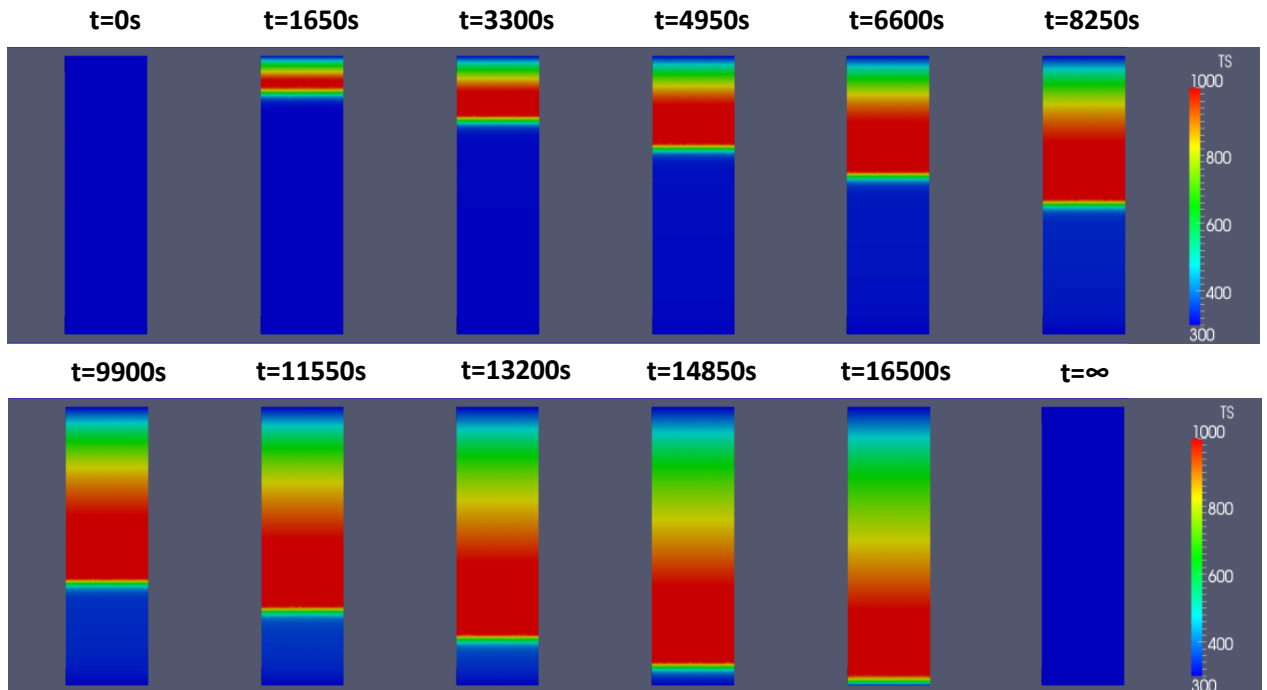


Figura 28 - Simulação da temperatura das fezes no interior do leito

Fonte: Autor

Conforme apresentado no Capítulo 1, (Aldushin, Rumanov and Matkowsky, 1999 apud Martins, 2008) apresentaram um esquemático para ilustrar as três estruturas de combustão, Figura 2. Foi mostrado que na estrutura de combustão onde a zona de combustão precede a zona de transferência de calor, ou seja $\Delta < 1$, o sólido transfere calor para o gás de entrada (fresco e frio). Uma vez que os processos em duas zonas são diferentes, cada um progride com sua própria velocidade. Neste tipo de estrutura, a zona de reação progride mais rápido, e portanto, à frente da zona de transferência de calor, fato também observado na Figura 28. Portanto, pode-se concluir que a simulação da temperatura das fezes no interior do leito apresenta estrutura de combustão $\Delta < 1$. O mesmo foi observado para a simulação do carvão.

5.2 EFEITO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDO NO LEITO

Para avaliar a influência exercida pela fração volumétrica de sólido no leito foram simuladas três diferentes frações volumétricas de sólido: 0,6; 0,7 e 0,8.

O APÊNDICE C apresenta os resultados obtidos para a evolução de temperatura para as três frações volumétricas simuladas, tanto para a fase do gás quanto para o sólido. Para sintetizar o comportamento apresentado ao variar a fração de sólido, plotou-se no mesmo gráfico a evolução de temperatura para um dado termopar, T3 por exemplo, para as três frações volumétricas simuladas. O resultado obtido é apresentado na Figura 29 a seguir.

Efeito da fração volumétrica de sólido no leito: termopar T3

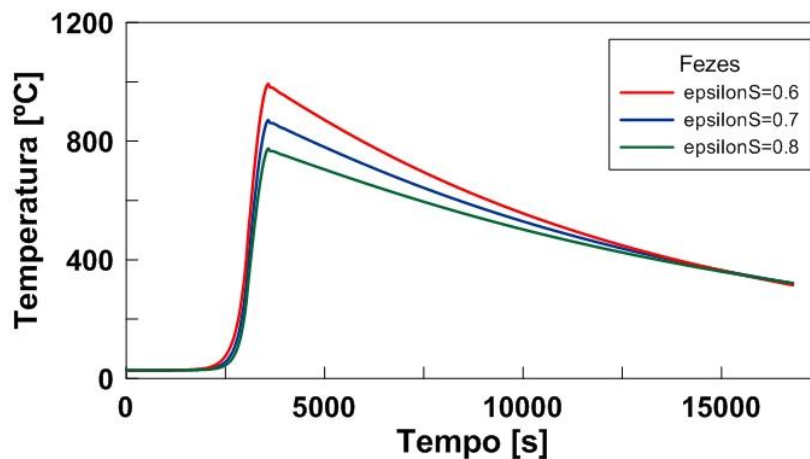


Figura 29 - Efeito da fração volumétrica de sólido no leito

Fonte: Autor

Analisando a Figura 29, pode-se observar que uma maior fração volumétrica de sólido gera perfis de temperatura inferiores quando comparado às frações menores. Uma possível explicação para o fato observado reside no fato de que quando o leito está menos poroso (maior fração de sólido) os caminhos para escoamento do gás são mais estreitos (menor diâmetro médio de canais), dessa forma a troca de calor gás-sólido fica mais pronunciada, uma vez que em uma menor área o gás escoava com maiores velocidades.

5.3 EFEITO DA VELOCIDADE DE RESFRIAMENTO

Para avaliar a influência exercida pela velocidade de resfriamento foram simuladas duas diferentes velocidades de entrada de ar: $V_{ar,ent}=0,004\text{m/s}$ e $V_{ar,ent}=0,04\text{m/s}$.

Os APÊNDICES D e E apresentam os resultados obtidos para a evolução de temperatura para as duas velocidades de resfriamento simuladas para o carvão e fezes, respectivamente, tanto para a fase do gás quanto para o sólido. Para sintetizar o comportamento apresentado ao variar a velocidade de resfriamento, plotou-se no mesmo gráfico a evolução de temperatura para um dado termopar, T2 por exemplo, para ambas as velocidades simuladas. O resultado obtido é apresentado na Figura 30 a seguir, tanto para as fezes quanto para o carvão.

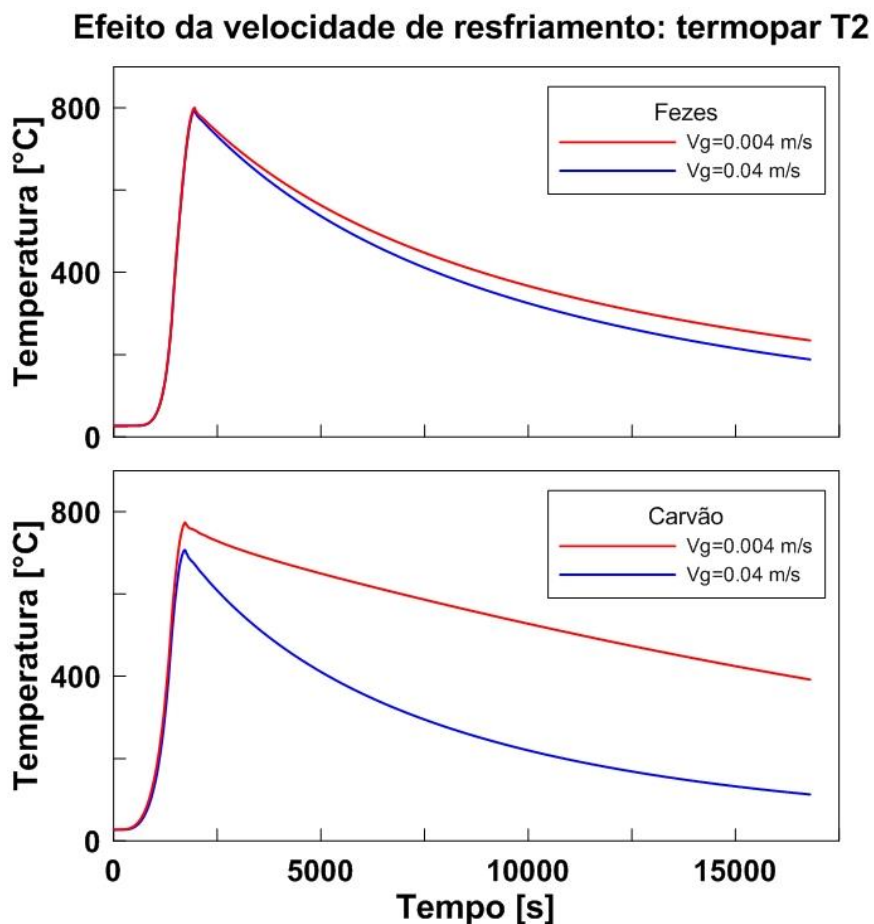


Figura 30 - Efeito da velocidade de resfriamento

Fonte: Autor

Analisando a Figura 30, pode-se observar que uma velocidade de entrada maior do ar tende a resfriar o leito mais rápido, conforme já esperado. Pode-se observar também que para ambas as velocidades de resfriamento a curva de aquecimento do reator é praticamente a mesma, sendo esta, portanto, pouco afetada pela velocidade de entrada do ar no leito. O carvão apresentou maior suscetibilidade à velocidade de resfriamento quando comparado às fezes.

Capítulo 6:

Conclusão

6 CONCLUSÃO

Após a realização deste trabalho, pode-se observar que os objetivos inicialmente propostos foram alcançados. A ideia embrionária de utilizar um *software* gratuito e aberto de simulação, como o OpenFOAM, na modelagem de problemas que envolvem combustão se mostrou um grande desafio para este trabalho.

Foi observado que o *software* utilizado oferece muitas vantagens aos seus usuários apresentando uma vasta liberdade ao programador pelo fato do programa ser escrito em código aberto C++. Entretanto a ausência de uma interface gráfica integrada ao programa tornou a curva de aprendizagem muito gradual.

Devido às dificuldades encontradas inicialmente para desenvolver e implantar um *solver* no OpenFOAM este trabalho teve o cuidado de apresentar ao leitor um passo-a-passo no que diz respeito aos processos de alteração e criação de *solver* no OpenFOAM. Desta forma, deixa-se um legado para auxiliar professores e alunos que utilizarão esta ferramenta em trabalhos de pesquisa.

A validação do modelo foi realizada comparando os resultados obtidos numericamente com os experimentais obtidos por Molhol, Pretti e Martins (2013). Pode-se notar que o modelo adota determinadas hipóteses simplificadoras que contribuíram para uma certa diferença entre os resultados. Entretanto, pode-se determinar, numericamente, informações de grande valia tais como a estrutura de propagação da frente de combustão *smouldering* para a célula de combustão.

Por último, foi realizado um estudo para avaliar a influência de três parâmetros físicos na evolução de temperatura no interior do leito, onde foi avaliada a influência da espessura da frente de chama, da fração volumétrica de sólido e da velocidade de resfriamento, e pode-se também, determinar a estrutura de propagação da frente da frente de combustão *smouldering*.

PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS

Depois do projeto realizado sugere-se que, se possível, sejam feitos estudos objetivando algumas melhorias e aprimoramentos para o presente trabalho. Por exemplo: incluir no modelo as reações de combustão para simular os fenômenos químicos que ocorrem no interior do leito.

Pode-se também propor uma geometria não uniforme para a frente de propagação de combustão, considerando a variação de velocidade com que a mesma se propaga e o processo de ignição por radiação.

Embora se tenha dado foco ao arranjo co-corrente sugere-se também simular e validar os resultados da combustão em meio poroso considerando a configuração de ensaio contra-corrente, tendo em vista que a célula foi projetada para também permitir estudos nesta configuração.

Pode-se também estudar formas para minimizar as considerações e hipóteses adotadas no atual modelo, como por exemplo embutir no modelo uma eficiência energética para a célula de combustão.

Sugere-se também estudar e propor melhorias para alterar os arquivos solucionadores de equações (*fvSolution*) e os esquemas de discretização (*fvSchemes*) visando à uma otimização do tempo de simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDUSHIN, A. P.; RUMANOV, I. E.; MATKOWSKY, B. J. Maximal energy accumulation in a superadiabatic filtration combustion wave. **Combustion and Flame**, v. 118, n. 1-2, p. 76–90, jul. 1999.
- DEBENEST, G.; MOURZENKO, V.; THOVERT, J. Smouldering in fixed beds of oil shale grains. A three-dimensional microscale numerical model. **Combustion Theory and Modelling**, v. 9, n. 1, p. 113–135, 2005a.
- DEBENEST, G.; MOURZENKO, V. V.; THOVERT, J.-F. Smouldering in fixed beds of oil shale grains: governing parameters and global regimes. **Combustion Theory and Modelling**, v. 9, n. 2, p. 301–321, 2005b.
- INCROPERA, F.P.. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massas. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- LAPENE, A., M. F. MARTINS, G. DEBENEST, M. QUINTARD, AND S. SALVADOR "Numerical simulation of oil shale combustion in a fixed bed: modelling and chemical." **Eurotherm Seminar N° 81** Reactive Heat Transfer in Porous Media. Albi, France, 2007.
- MAIOLI, A. G.; MAIOLI C. G. Estudo inicial do software de simulação gratuito openfoam, 2013.
- MARTINS, M. F. The structure of a combustion front propagating in a fixed bed of crushed oil shale: co-current configuration. 2008.
- MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. Cocurrent Combustion of Human Feces and Polyethylene Waste. **Waste and Biomass Valorization**, v. 6, n. 3, p. 425–432, 2015.
- MONHOL, F. A. F.; PRETTI, J. N.; MARTINS, M. F. Concepção e calibração de uma célula de combustão minuciosamente instrumentada para a análise da conversão de resíduos sólidos como fonte alternativa de energia, 2013.
- NUNES, J. Determinação e interpretação física dos grupos adimensionais que regem a taxa de transferência de calor da fase sólida de uma célula de combustão instrumentada. [s.d.].
- OHLEMILLER, T.; ROGERS, F. Smoldering combustion hazards of thermal insulation materials. n. August, 1981.
- RABINOVICH, O. S.; GUREVICH, I. G. Effect of heat losses on propagation of stationary low-temperature filtration combustion waves with forced filtration of the gas-oxidizer. **Combustion, Explosion, and Shock Waves**, v. 20, n. 1, p. 29–35, 1984.
- SHIN, D.; CHOI, S. The combustion of simulated waste particles in a fixed bed. **Combustion and Flame**, v. 121, n. 1-2, p. 167–180, 2000.
- TORERO, J. L. Buoyancy Effects on Smoldering of Polyurethane Foam. 2008.

YANG, C.; THOVERT, J.-F.; DEBENEST, G. Upscaling of mass and thermal transports in porous media with heterogeneous combustion reactions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 84, p. 862–875, 2015.

FOX R. W., PRITCHARD P., ALAN T. **McDonald Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 7ª edição.

OpenFOAM Programmers Guide. Versão 2.1.1.

OpenFOAM User Guide. Versão 2.1.1.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Gráficos da evolução de temperatura das fezes para teste de malha

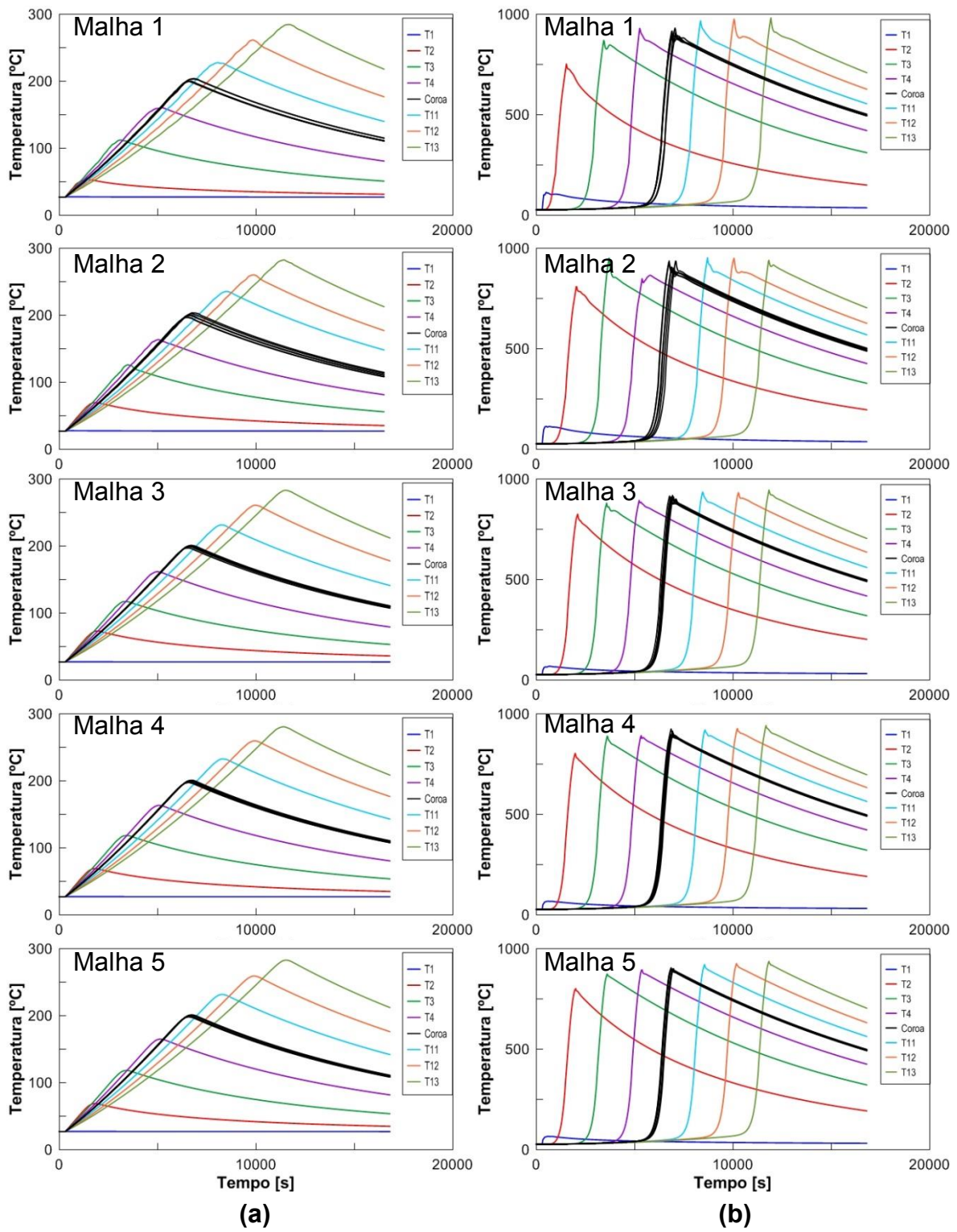


Figura 31 – Evolução da temperatura das fezes: (a) fase gasosa e (b) fase sólida

Fonte: Autor

APÊNDICE B – Gráficos da evolução de temperatura das fezes para diferentes espessuras da frente de chama

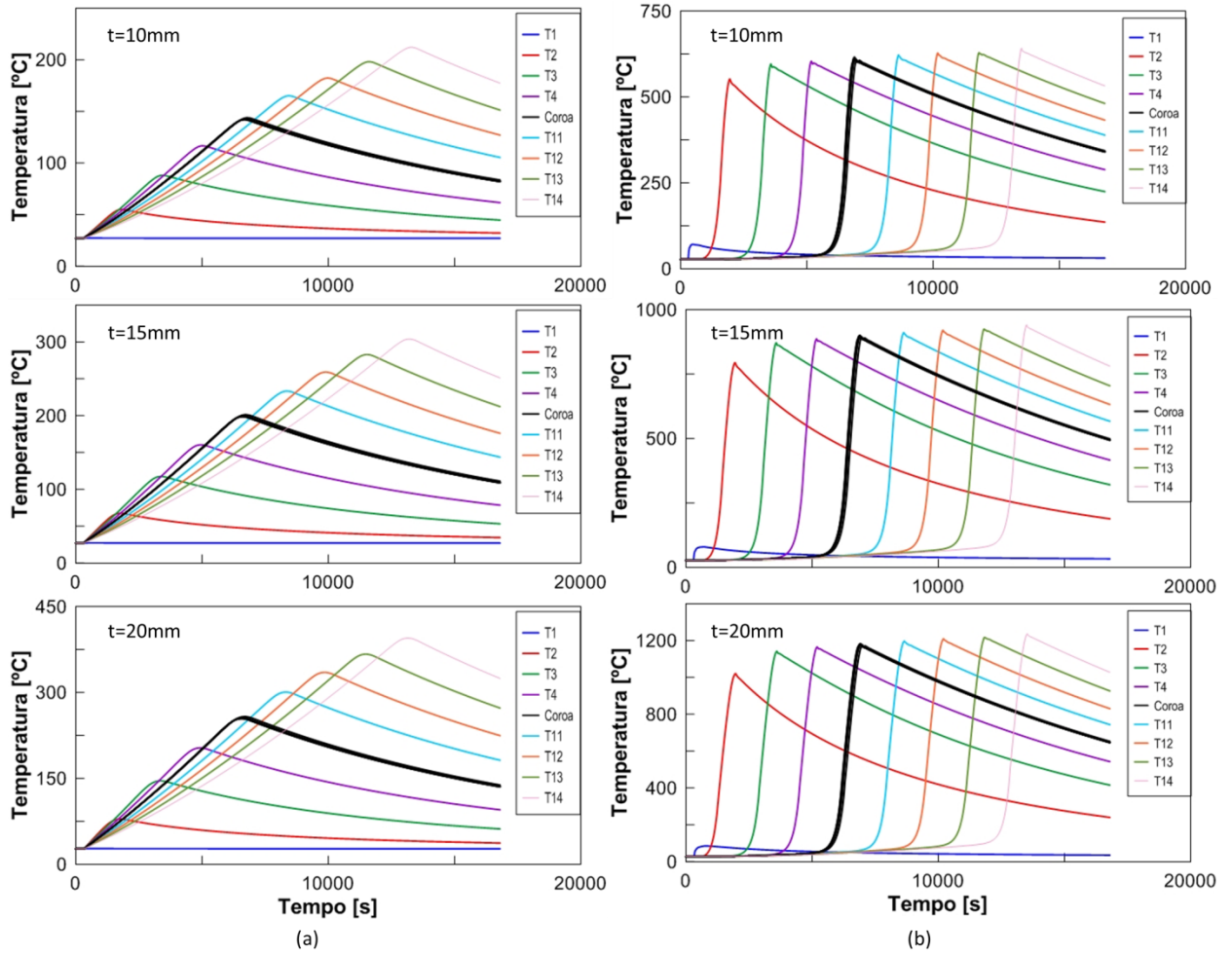


Figura 32 - Evolução de temperatura das fezes para diferentes espessuras da frente: (a) fase gasosa e (b) fase sólida

Fonte: Autor

APÊNDICE C – Gráficos da evolução de temperatura das fezes para diferentes frações volumétricas de sólido no leito

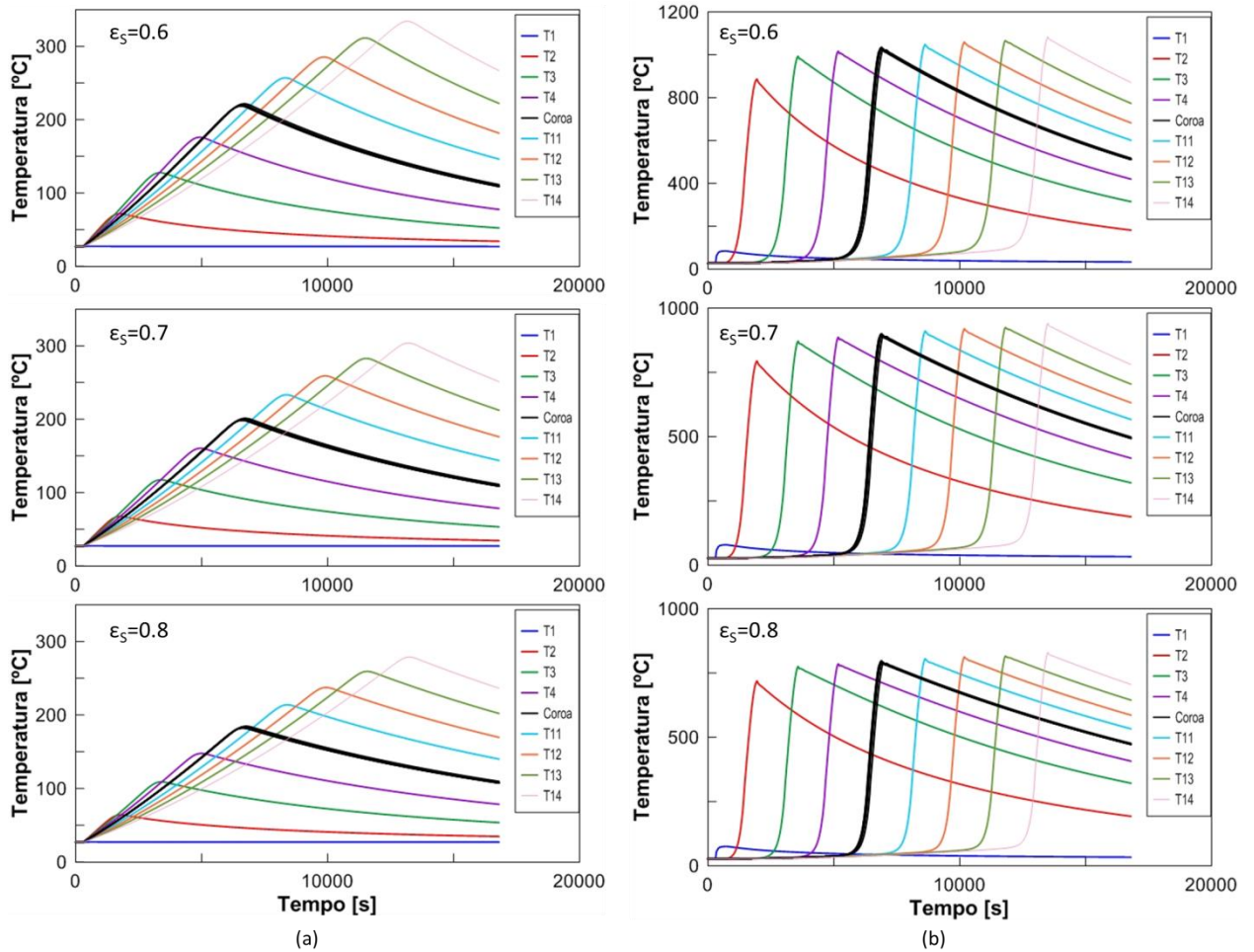


Figura 33- Evolução de temperatura das fezes para diferentes porosidades do leito: (a) fase gasosa e (b) fase sólida

Fonte: Autor

APÊNDICE D – Gráficos da evolução de temperatura do carvão para diferentes velocidades de resfriamento

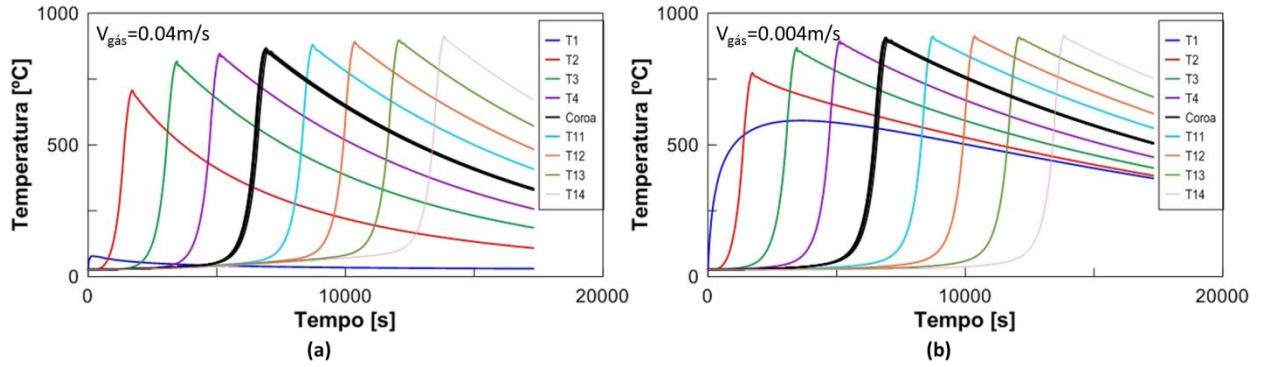


Figura 34 - Evolução de temperatura para a fase sólida do carvão: (a) $V_{gás}=0,04m/s$ e (b) $V_{gás}=0,004m/s$

Fonte: Autor

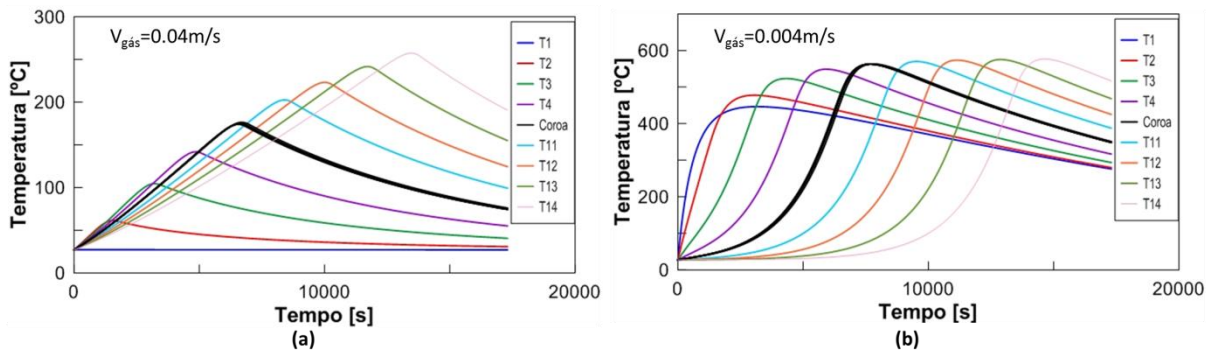


Figura 35- Evolução de temperatura para a fase gasosa do carvão: (a) $V_{gás}=0,04m/s$ e (b) $V_{gás}=0,004m/s$

Fonte: Autor

APÊNDICE E – Gráficos da evolução de temperatura das fezes para diferentes velocidades de resfriamento

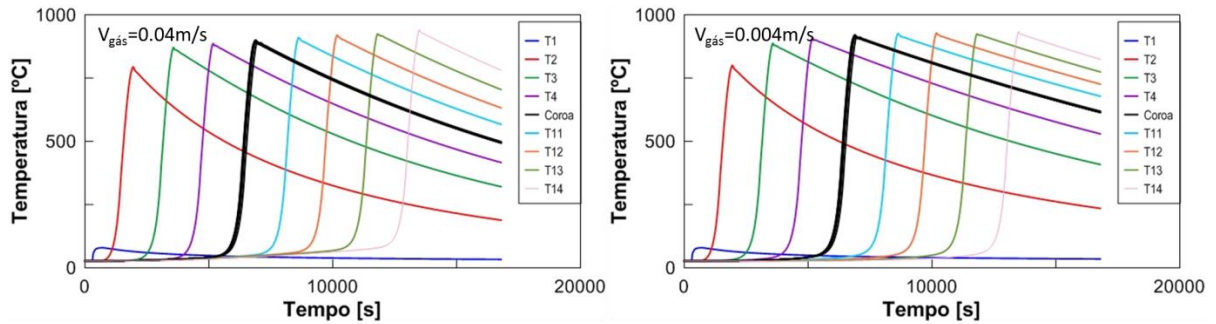


Figura 36- Evolução de temperatura para a fase sólida das fezes: (a) $V_{gás}=0,04m/s$ e (b) $V_{gás}=0,004m/s$

Fonte: Autor

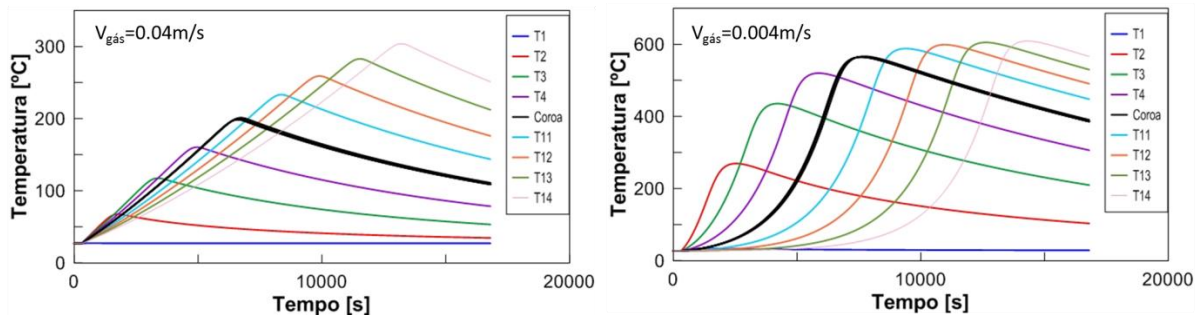


Figura 37- Evolução de temperatura para a fase gasosa das fezes: (a) $V_{gás}=0,04m/s$ e (b) $V_{gás}=0,004m/s$

Fonte: Autor