

Universidade Federal do Pará

SINTERIZAÇÃO DE PELLOTAS DE ARGILA, CARVÃO VEGETAL E CINZA
VOLANTE DE CALDEIRA EM UMA CÉLULA DE COMBUSTÃO DE LEITO
FIXO: ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA FRENTE DE REAÇÃO DE
COMBUSTÃO NO LEITO.

Alvino Oliveira Melo



Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia

SINTERIZAÇÃO DE PELOTAS DE ARGILA, CARVÃO VEGETAL E CINZA
VOLANTE DE CALDEIRA EM UMA CÉLULA DE COMBUSTÃO DE LEITO
FIXO: ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA FRENTE DE REAÇÃO DE
COMBUSTÃO NO LEITO.

Alvino Oliveira Melo

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Emanuel Negrão Macêdo

Orientador : Márcio Ferreira Martins

Belém - PA

Maio de 2016

SINTERIZAÇÃO DE PELOTAS DE ARGILA, CARVÃO VEGETAL E CINZA
VOLANTE DE CALDEIRA EM UMA CÉLULA DE COMBUSTÃO DE LEITO
FIXO: ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA FRENTE DE REAÇÃO DE
COMBUSTÃO NO LEITO.

Alvino Oliveira Melo

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:

Prof. Emanuel Negrão Macêdo, D.Sc.
(PRODERNA - ITEC/UFPA - Orientador)

Prof. Clauderino Da Silva Batista, D.Eng.
(PRODERNA - ITEC/UFPA - Membro)

Prof. Edilson Marques Magalhães, D. Eng.
(FEQ/ITEC/UFPA - Membro)

Prof. João N.N. Quaresma, D.Sc.
(FEQ - ITEC/UFPA - Membro)

Prof. José Antônio Da Silva Souza, D. Eng.
(PRODERNA - ITEC/UFPA - Membro)

Prof. Márcio Ferreira Martins, Ph.D.
(PPGEM - CT/UFES - Membro Externo)

BELÉM, PA - BRASIL
MAIO de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

**Instituto de Tecnologia/Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia**

Melo, Alvino Oliveira

Sinterização de pelotas de argila, carvão vegetal e cinza volante de caldeira em uma célula de combustão de leito fixo: análise da propagação da frente de reação de combustão no leito/Alvino Oliveira Melo; orientadores, Emanuel Negrão Macêdo, Márcio Ferreira Martins. Belém, 2016

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, 2016

1. Célula de combustão 2. Reator e processo de combustão 3. Argila, cinza volante, carvão vegetal 4. Resíduos industriais I. Título

CDD 22. ed. 621.4023

*Dedico este trabalho a todas as pessoas
que sempre me foram cordiais.*

*Em especial à minha esposa pela
paciência e incentivo. E aos meus filhos
Anna Carollina e Pedro Fellipe sempre
cordatos e responsáveis.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus pai todo poderoso criador do céu e da terra e à, Jesus Cristo, seu único filho e nosso senhor.

Conforme dicionários da língua portuguesa agradecer significa demonstrar ou expressar gratidão, reconhecer um favor.

Agradeço por tudo que tenho, pois agradecer é a arte de atrair coisas boas!

Agradeço tudo aquilo que está na minha vida até neste momento, incluindo até as dores, pois a nossa compreensão do universo ainda é muito pequena para julgarmos o que quer que seja da nossa vida.

Agradeço todas as dificuldades que enfrentei. Elas foram adversárias dignas e tornaram-me digno de enfrentá-las.

Gostaria de agradecer à meu pai e à minha mãe (que por vontade divina, já não se encontra entre nós) por terem criado seus doze filhos com dignidade.

Agradeço à minha esposa Maria Antônia de Oliveira Abreu Melo que sempre esteve ao meu lado mesmo nos momentos de distâncias quilométricas. Foram momentos difíceis, mas não nos deixamos abater.

Agradecer a Deus por ter dois filhos que sempre foram cumpridores de suas responsabilidades. Anna Carollina estudante de Direito e Pedro Fellipe estudante de Engenharia da Computação.

Pela sua importante contribuição para realização deste trabalho gostaria de agradecer ao Prof. Emanuel Negrão Macêdo, meu orientador, pela orientação e perseverança para que este trabalho fosse enfim concluído.

Gostaria de estender os meus agradecimentos ao amigo Prof. Márcio Ferreira Martins da UFES que teve a hombridade de ceder o programa numérico computacional para validação deste trabalho.

Agradecer ao Prof. José Antônio pelas orientações e discussões, in situ, enquanto desencadeava o processo de combustão.

Agradecer ao Prof. Roberto de Freitas Neves pela colaboração e sempre pronto a me tirar alguma dúvida .

Agradecer à banca examinadora pelas criticas e sugestões que foram bastante significantes para a conclusão deste trabalho.

Gostaria de fazer uma referência ao Georgemir Negrão Macêdo meu companheiro de aventura na região amazônica, ao fazermos uma pesquisa de campo,

junto às indústrias madeireiras da região de Paragominas-Pa, para o levantamento da quantidade de biomassa (resíduos de madeiras) gerados pelos madeireiros daquela região. Os resultados dessa pesquisa foram utilizados para realização da minha dissertação de mestrado que me renderam dois artigos publicados no COBEM e um artigo publicado no CONEM.

Agradecer ao companheiro Inaldo Silva sempre amigo e prestativo.

Agradecer à Doutoranda Danielly Quaresma que foi de suma importância no desenrolar deste trabalho, sempre presente, durante a realização de todas as fases dos experimentos.

Agradecer ao Doutorando Alacid Neves pela ajuda que nos dispensou.

Ao Prof. Hilton Rangel do Departamento Acadêmico de Química do IFMA por ter dedicado seu precioso tempo na realização da análise termogravimétrica das amostras utilizadas neste trabalho.

Agradecer a todos professores do PRODERNA que ministraram as disciplinas nas quais fui discente.

Enfim, gostaria de agradecer a todos Professores do Departamento de Mecânica e Materiais do IFMA que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

Não poderia deixar de mencionar todos colegas discentes do PRODERNA, sem nenhuma exceção, pela camaradagem e colaboração entre todos.

Aos técnicos da Usina de Materiais pela ajuda dispensada para realização dos experimentos.

Meus sinceros agradecimentos à FAPEMA e a CAPES pela bolsa de estudo que foi uma ajuda de vital importância na condução deste trabalho.

A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito.

Isaac Newton

Não tentes ser bem sucedido, tenta antes ser um homem de valor.

Albert Einstein

Nunca podemos deixar que cada dia pareça igual ao anterior porque todos os dias são diferentes porque estamos em constante processo de mudança.

Paulo Coelho

Não tenha medo da vida, tenha medo de não vivê-la.

Não há céu sem tempestades, nem caminhos sem acidentes.

Augusto Cury

O Universo sempre conspira a nosso favor. Basta entendê-lo!

Os planos não são nossos! Os planos são de Deus!

Autores: desconhecidos

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D.Eng.)

SINTERIZAÇÃO DE PELOTAS DE ARGILA, CARVÃO VEGETAL E CINZA VOLANTE DE CALDEIRA EM UMA CÉLULA DE COMBUSTÃO DE LEITO FIXO: ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA FRENTE DE REAÇÃO DE COMBUSTÃO NO LEITO.

Alvino Oliveira Melo

Maio/2016

Orientadores: Emanuel Negrão Macêdo

Márcio Ferreira Martins

Área de Concentração: Uso de Recursos Naturais

Uma das grandes preocupações da humanidade atualmente gira em torno da preservação do meio ambiente, buscando-se, constantemente, por meio de estudos e pesquisas, alternativas que encontrem um equilíbrio de convivência entre o homem e a natureza. Normalmente, as indústrias em geral, produzem resíduos, na sua maioria tóxicos, que prejudicam o meio ambiente, o homem e demais diversidades de vidas nele inseridas. Levando-se em consideração o contexto exposto acima, este trabalho faz um estudo de evolução da temperatura de combustão de uma mistura, em proporções previamente definidas, da cinza volante de caldeira proveniente de indústrias localizadas no Estado do Pará, argila proveniente das margens do Rio Guamá e carvão vegetal adquirido na região metropolitana de Belém-Pa. Os experimentos foram realizados em um reator de combustão, adquirido pelo Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia com a finalidade de avaliar-se o perfil de temperaturas de cada experimento durante o processo de combustão e se os valores dessas temperaturas seriam suficientes para desencadear o processo de sinterização das pelotas. Para realização dos experimentos, parâmetros como a velocidade de entrada do

fluido (ar), diâmetros das pelotas (mistura de cinza volante, carvão vegetal, e argila moídos) e a granulometria do carvão vegetal cominuído, utilizado como combustível sólido, foram variados para cada experimento. O histórico de temperaturas foram registrados por um instrumento de aquisição de dados identificado como Paperless Recorder - PHL, e posteriormente plotados para análises. Foram obtidas temperaturas variando em uma faixa de 800 °C a 1200 °C que são valores suficientes para desencadear o processo de sinterização das pelotas. Os dados gerados pelo reator de combustão foram registados pelo "Paperless Recorder - PHL" e comparados com os resultados obtidos numericamente.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFGA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.).

SINTERING OF CLAY PELLETS, CHARCOAL AND FLY ASH IN A
COMBUSTION CELL IN FIXED BED : ANALYSIS OF PROPAGATION OF
COMBUSTION REACTION FRONT IN THE BED.

Alvino Oliveira Melo

Maio/2016

Advisor: Emanuel Negrão Macêdo

Research Area: Use of Natural Resources

A great preoccupation of humanity turns around the preservation of the environment, seeking to constantly through studies and search, alternatives to find a balance of coexistence between man and nature. Normally, industries in general, produce waste at its majority toxic which damage the environment, humans being and other diversities of life inserted in it. Looking up, insert itself in this context, this work makes a study of evolution of the temperature of combustion of a mixture, in predefined proportions of fly ash from boiler industries located in the State of Pará, clay from the banks of the Guamá River and charcoal acquired in metropolitan region of Belem-Pa, Brazil. The experiments were performed in a combustion reactor, acquired by Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia in order to assess the temperature profile of each experiment during the combustion process and if the values of these temperatures would be sufficient to initiate the process of sintering of the pellets. For the experiments performance, parameters such as inlet velocity of the fluid (air), diameters of the pellets (mixture of charcoal, ash and clay) and grain size of charcoal were varied and the effect of variations of these parameters were analyzed for each experiment. The historical temperatures were recorded by a data acquisition instrument named Paperless

Recorder - PHL and subsequently plotted for analysis. Temperatures varying in the range of 800°C - 1290°C, were obtained and these values are sufficient to initiate the process of sintering of the pellets. Data generated by the combustion reactor were recorded by "Paperless Recorder" and compared with numerical results computational.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 - Motivação	2
1.2 - Objetivos.....	2
1.3 - Contribuição da Tese	3
1.4 - Síntese do Trabalho	3
CAPÍTULO 2	4
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 - Meio Poroso.....	4
2.1.1 - Porosidade	5
2.1.2 - Permeabilidade e Equação de Darcy	6
2.1.3 - Superfície Específica	8
2.1.4 - Mecanismos de Transferência de Calor em Meios Porosos	9
2.2 – Processos Termoquímicos em Meios Porosos.....	10
2.2.1 - Processo de Combustão	10
2.2.2 - Reação de Combustão	12
2.2.2.1 - Combustão lenta (Smoldering Combustion)	13
2.2.2.1.1 - Estrutura de uma Frente de Reação de Combustão sem Chamas.....	14
i) - Pré-aquecimento do Combustível em Repouso.	14
ii) - Evaporação.....	15
iii) - Região de Combustão.	15
iv) - Formação de Carvão e de Cinzas	15
2.2.3 - Retorta	16
2.3 - Trabalhos desenvolvidos na área de Combustão de Biomassa.....	17
2.4-Trabalhos acadêmicos desenvolvidos utilizando-se a cinza volante	19
2.5 - Estudos realizados utilizando-se a Argila.....	20
CAPÍTULO 3	22
MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	22
3.1 - Materiais utilizados como Matéria Prima.....	22
3.1.1 - Carvão Vegetal	22
3.1.1.1- Propriedades características do Carvão Vegetal.....	22

3.1.1.2 - Tecnologia de Produção do Carvão Vegetal	22
3.1.2 - Argila.....	25
3.1.2.1 - Composição da Argila	25
3.1.2.2 - Propriedades da Argila	26
3.1.3 - Cinza Volante	26
3.2 - Etapas para Produção das Pelotas.....	27
3.3 - Fluxograma de Atividades para o Processo de Produção das Pelotas	28
3.4 - Descrição do Aparato Experimental.....	29
3.5 - Fluxograma do Processo para Realização dos Experimentos	30
3.6 - Procedimento Experimental	32
CAPÍTULO 4.....	35
RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS NA CÉLULA DE.....	35
COMBUSTÃO.....	35
4.1 - Resultado das Análises dos Materiais utilizados no Experimento	35
4.2 - Resultado da Análise da Argila em Microscopia Eletrônica de Varredura.....	35
(MEV).....	35
4.3 - Resultado da Análise da Cinza Volante em Microscopia Eletrônica de Varredura	
(MEV).....	37
4.4 - Resultado da Análise do Carvão em Microscopia Eletrônica De Varredura	
(MEV).....	38
4.5 - Análise das Pelotas antes da Combustão no Reator	39
4.6 - Análise das Pelotas após a Combustão.....	40
4.7 - Análise Termogravimétrica da Amostra das Pelotas.....	41
4.8 - Resultado e Análises dos Experimentos.....	43
4.9 - Análise dos Fluxos de Velocidades do Fluido	46
4.10 - Evolução axial da Temperatura ao longo do Reator	49
4.10.1 - Perfil de Temperaturas ao longo do Reator	49
CAPÍTULO 5.....	51
MODELO NUMÉRICO	51
5.1 - O Princípio do Volume Médio	51
5.2 - Modelo Numérico Unidimensional	53
5.2.1 - Formulação Matemática	53
5.2.2 - Equações de Conservação	53
1. Balanço de Massa	54

2. Equação de Darcy, negligenciando a ação da gravidade	54
3. Equações da Energia	54
4. Equação do Gás Perfeito	55
5.2.3 - Condição Inicial e Condições de Contornos	55
5.2.4 - Dados Empíricos	59
5.2.5 - Integração Numérica Unidimensional	60
5.3 - Resultado Modelo Numérico	61
5.4 - Análise Comparativa entre o Resultado Experimental e o Numérico	62
CAPÍTULO 6	65
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	65
6.1 - Conclusões	65
6.2 - Sugestões	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXO I	70
I.1 - O Método da Média Volumétrica	70
APÊNDICE I	73
ARTIGOS PRODUZIDOS	73
I.1- Artigos Publicados em Congressos	73
I.2 - Artigo Aceito em Periódico	73
I.3 - Artigo Submetido	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Representação esquemática de transporte de calor e espécies, mudanças de fases e reações em meios porosos	5
Figura 2.2	Representação esquemática de um meio poroso.....	7
Figura 2.3	Esquema para interpretação da equação de Darcy	8
Figura 2.4	Representação esquemática de transferência de calor e massa em meio poroso.....	10
Figura 2.5	Mecanismo de transporte de calor em meio poroso.....	10
Figura 2.6	Etapas de combustão em meio poroso.. ..	11
Figura 2.7	Etapas da combustão para as pelotas utilizadas neste trabalho.....	12
Figura 2.8	Combustão com chamas e combustão sem chamas	14
Figura 2.9	Combustão de biomassa em repouso.	14
Figura 2.10	Fluxograma de carbonização em retorta	16
Figura 2.11	Desenho esquemático do reator de combustão.	18
Figura 2.12	Combustor unidimensional para combustível sólido	19
Figura 3.1	Ilustração da pirólise de madeira.	23
Figura 3.2	Moinho de discos e carvão vegetal cominuído	27
Figura 3.3	Moinho de bolas.....	27
Figura 3.4	(a) Betoneira; (b) Pelotas úmidas; (c), (d) Pelotas secas com diferentes granulometrias.....	28
Figura 3.5	Fluxograma de atividades para produção das pelotas.....	29
Figura 3.6	(a) Desenho esquemático do reator; (b) Reator de combustão in loco. ..	30
Figura 3.7	Fluxograma esquemático dos experimentos.	31
Figura 3.8	Ignição do combustível no reator de combustão.....	32
Figura 3.9	Paper Lass Register acoplado ao reator de combustão.	33
Figura 3.10	Temperatura na superfície externa do reator.....	33
Figura 3.11	Temperatura interna do fluido.....	34
Figura 4.1	MEV utilizado neste trabalho.	35
Figura 4.2	Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra de argila e respectivos Espectros de Energia Dispersiva.....	36
Figura 4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra de cinza volante e respectivos Espectros de Energia Dispersiva.....	37

Figura 4.4	Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra de carvão moído e seu respectivo Spectrum EDS.	38
Figura 4.5	Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra das pelotas antes da combustão e respectivos Espectros de Energia Dispersiva.....	39
Figura 4.6	Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra das pelotas antes da combustão e respectivos Espectros de Energia Dispersiva.....	40
Figura 4.7	Análise térmica das pelotas em atmosfera de ar sintético.....	41
Figura 4.8	Aspecto das pelotas após sofrer o processo de sinterização durante a reação de combustão.	42
Figura 4.9	Balança analítica para pesagem da pelota de amostra.	42
Figura 4.10	Evolução da frente de combustão para o experimento 2.	44
Figura 4.11	Evolução da frente de combustão para o experimento 4.	44
Figura 4.12	Evolução da frente de combustão para o experimento 3.	44
Figura 4.13	Evolução da frente de combustão para o experimento 1.	45
Figura 4.14	Perfil de velocidades no reator para os experimentos 1,2,3, 4.....	47
Figura 4.15	Evolução de temperaturas axiais no reator- experimento 3.	49
Figura 4.16	Perfil de temperaturas ao longo do reator.	50
Figura 5.1	Representação esquemática do reator usado na simulação.....	61
Figura 5.2	Evolução de temperaturas obtido numericamente.	61
Figura 5.3	Evolução de temperaturas numérico e experimental.	63
Figura 5.4	Análise da frente de combustão para termopar 7.....	64
Figura I.1	Volume Médio Local.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Influência da temperatura no rendimento e composição elementar do carvão.....	24
Tabela 4.1	Análise química elementar da argila.....	36
Tabela 4.2	Composição química elementar da cinza volante.....	37
Tabela 4.3	Micro análise do carvão em pó.....	38
Tabela 4.4	Composição química elementar das pelotas antes da combustão.....	39
Tabela 4.5	Composição química elementar das pelotas após o processo de combustão.....	40
Tabela 4.6	Parâmetros utilizados para realização dos experimentos.....	43
Tabela 4.7	Picos de tempo e velocidades de propagação da reação no reator.....	47
Tabela 4.8	Dados para geração do perfil axial de temperatura do reator de combustão.....	49
Tabela 5.1	Dados de entrada para o modelo computacional.....	62

NOMENCLATURA

CENBIO	Centro de Biomassa
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
VER	Volume Elementar Representativo
A	Fator de frequência, s^{-1}
A_{fs}	Área total da superfície do meio poroso
A_p	Área dos grânulos
C_p	Calor específico à pressão constante, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
d_p	Diâmetro médio das partículas, m
d	Desvio
e	Erro
D	Coeficiente de dispersão, $m^2.s^{-1}$
E_a	Energia de ativação, J
h	Perdas térmicas através das paredes, $J.s^{-1}.m^{-2}.K^{-1}$
k_0	Taxa de reação, s^{-1}
K	Permeabilidade do meio poroso, m^2
m	Massa
M	Massa molar, $kg.mol^{-1}$
P	Pressão, $kgf.m^{-2}$
Pe	Número de Peclet
\dot{Q}	Taxa de reação de calor, $J.s^{-1}.m^{-3}$
R	Constante do gás perfeito, $J.K^{-1}.mol^{-1}$
\dot{R}	Taxa de reação, $kg.s^{-1}.m^{-3}$
S_{spec}	Superfície específica, m^{-1}
t	Tempo, s
T	Temperatura, K
v	Velocidade, $m.s^{-1}$
v_g	Fluxo por unidade de área, $m.s^{-1}$
V	Volume, m^3
V_p	Volume dos grânulos
\bar{V}	Velocidade de infiltração, $m.s^{-1}$

x	Posição axial, m
Y	Fração mássica

SÍMBOLOS GREGOS

∇	Gradiente
$\nabla \cdot$	Divergente
ε	Fração volumétrica, porosidade
μ	Viscosidade, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$
Γ	Coefficiente de transmissão de calor, $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$
ρ	Densidade, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
λ	Condutividade térmica, $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
α	Razão entre $[\text{CO}_2] / [\text{CO}]$
φ	Fluxo de radiação de calor, $\text{J}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$

ÍNDICE SOBRESCRITOS E SUBSCRITOS

*	Grandeza efetiva
amb	Ambiente
C	Químico
f	fluido
g	Gás
k	Espécies constituintes k (N_2 , O_2 , CO , CO_2 , CaCO_3)
rad	Radiação
s	Sólido
T	Térmico

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Transporte de gás e vapor em meio poroso ocorre em um grande número de aplicações importantes, incluindo a secagem de produtos industriais e alimentares, exploração de petróleo e gás, remediação ambiental de áreas contaminadas, e sequestro de carbono. A compreensão dos mecanismos fundamentais em processos de transporte de gás e de vapor em meio poroso permite que modelos sejam utilizados para avaliar e otimizar o desempenho e projetos destes sistemas. Geralmente a matriz sólida é rígida ou sofre pequenas deformações quando submetida a esforços. A interligação dos poros permite o fluxo de um ou mais fluidos através do material. No escoamento monofásico os poros ficam saturados por um único fluido. Num escoamento bifásico os vazios da matriz sólida ficam preenchidos por dois fluidos diferentes, por exemplo água e gás. A distribuição de poros, tamanho e a forma de um meio poroso natural é irregular. Como exemplo de meios porosos tem-se, dentre outros, areia, arenito, calcário, madeira, e resíduos humanos. Em escala microscópica as grandezas físicas como pressão e velocidades são visivelmente irregulares. Em escala macroscópicas, grandezas físicas de interesse em um determinado experimento como pressão e velocidades do fluido que atravessa um meio poroso ao longo de um leito podem ser medidas com a utilização de instrumentos adequados. Devido à extrema complexidade do sistema de condutos formados pelos vazios de um meio poroso por onde o fluido se movimenta não é trivial o uso de um tratamento microscópico para descrever tal movimento. É preferível descrever-se o movimento no seu aspecto global, em termos de grandezas médias .

Diversos estudos experimentais e teóricos da combustão de partículas de carvão ou de madeira em um leito fixo têm sido realizados com o objetivo de entender-se os fenômenos que ocorrem durante o processo de combustão em meios porosos tal qual a transferência de calor e massa. No entanto, os parâmetros que regem a combustão de sólidos no leito, tais como os efeitos do tamanho de partícula, transferência de calor e massa em meios porosos e a interferência entre as reações de sólidos e de fase de gás, não estão totalmente entendidos.

Para entender os processos de difíceis interpretações que ocorrem em um leito fixo, foi desenvolvida um reator de combustão o qual foi preenchido com um material sólido poroso (pelotas) na forma geométrica predominantemente esférica, constituído de uma mistura previamente definida em percentuais de argila, proveniente das margens do Rio Guamá, cinza volante, de minérios provenientes das indústrias mínero-siderúrgicas do Estado do Pará e carvão vegetal adquirido na região metropolitana de Belém-Pa.

O combustível utilizado para a reação de combustão foi o carvão vegetal cominuído em um moinho de discos e granulometria devidamente controladas. Neste trabalho foram estudados parâmetros como a taxa de fornecimento de ar, a influência do tamanho das partículas do combustível (carvão vegetal) e das pelotas (argila, carvão vegetal e cinza volante) durante a reação de combustão. A aquisição dos dados foi feita pelo "Paper Less Recorder-PHL" devidamente conectado aos termopares. Utilizou-se um computador de 6 GB de memória Ram, 2,50 MHz, 1 Tb de espaço em disco rígido.

1.1 - Motivação

A motivação para a realização deste trabalho está diretamente ligada à pesquisa de novas tecnologias direcionadas ao aproveitamento de resíduos sólido com a finalidade de gerar novos produtos benéficos à sociedade, uma vez que geralmente os resíduos industriais na sua maioria são prejudiciais ao meio ambiente. Não menos motivante é a expectativa de aplicações destes conhecimentos adquiridos em sala de aula e em laboratórios.

1.2 - Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma análise do perfil de evolução das temperaturas, e se os valores dessas temperaturas seriam suficiente para desencadear o processo de sinterização das pelotas durante a reação de combustão, em um reator de combustão de leito fixo, preenchido de pelotas, constituídas proporcionalmente de uma mistura de cinza volante de caldeiras, carvão vegetal e argila previamente moídos em moinho de bolas.

Como objetivos específicos a alcançar-se, tem-se:

- i) Plotar e analisar os perfis de temperaturas dos experimentos;

- ii) Estudar a influência dos diferentes fluxos de velocidades durante a reação combustão;
- iii) Estudar o efeito da variação dos diâmetros das pelotas e granulometria do combustível sólido durante o processo de combustão;

1.3 - Contribuição da Tese

Este trabalho tem como principal contribuição para o meio acadêmico a interpretação dos fenômenos termodinâmicos, ocorrido em um reator de combustão, preenchido com pelotas, constituídas de cinza volante de caldeiras, argila e carvão vegetal moídos.

1.4 - Síntese do Trabalho

O trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos, divididos em itens e subitens. Neste Capítulo 1, que consiste na introdução do trabalho, faz-se referências aos objetivos, motivação e a estruturação do trabalho.

O Capítulo 2, é composto pela revisão da literatura e o estado da arte sobre meios porosos, carvão vegetal, argila, cinza volante e processos de combustão. Neste capítulo, apresenta-se, também, alguns estudos realizados envolvendo o carvão vegetal, a argila, cinzas volantes e processos de combustão de importância para este trabalho.

No Capítulo 3, é feita uma explanação dos materiais utilizados e dos procedimentos experimentais aplicados para a realização dos experimentos.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados dos experimentos realizados no reator de combustão.

No Capítulo 5, aborda-se o modelo numérico matemático utilizado para validação deste trabalho. Finalmente no Capítulo 6 tem-se a conclusão deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 - Meio Poroso

Meio poroso pode ser definido como um material constituído de uma matriz sólida com vazios (poros) interligados que sofre pequenas deformações. As interconectividades dos vazios ou poros permitem o fluxo de um ou mais fluidos através do material. Para uma situação de fluxo de fluido com apenas uma fase, os vazios são saturados com o fluido passante através da matriz sólida. Para o fluxo de uma substância composta por duas fases, uma líquida e outra gasosa, por exemplo, vapor d'água, os vazios são preenchidos pelas duas substâncias. Em um meio poroso natural, a distribuição dos poros em relação a forma e tamanhos é irregular (BEJAN, 2006).

A análise de transferência de calor em meios porosos tem uma grande escala de aplicações. Os meios porosos podem ser naturalmente formado, por exemplo, em rochas, areias e madeiras, resíduos humanos ou podem ser fabricados como pelotas catalíticas e isolantes (BEJAN, 2013).

As aplicações de transferência de calor em meios porosos são nas áreas de química, meio ambiente, mecânica, engenharia do petróleo e em geologia. A Figura 2.1, ilustra o transporte de calor e massa, reações e mudança de fase em um meios porosos. Em virtude desta complexidade, a aplicação da teoria do volume médio nas equações do transporte das espécies, momento e energia, reações químicas endotérmicas ou exotérmicas e mudanças de fases de sólido para líquido, sólido para gás e líquido para gás e aplicação da teoria do volume médio leva a resultados bastante precisos (KAVIANY, 1991).

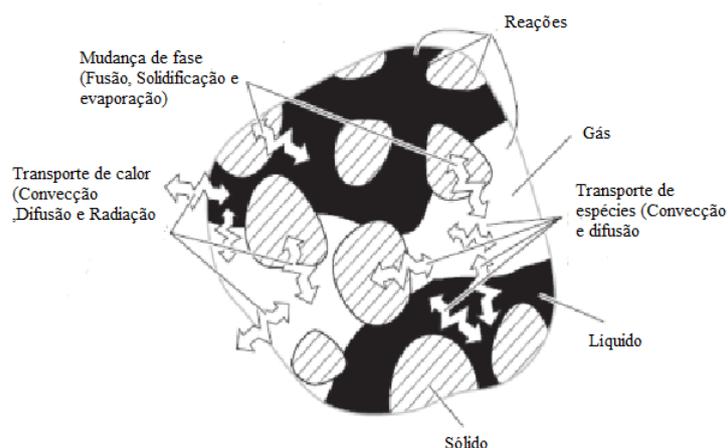


Figura 2.1 - Representação esquemática de transporte de calor e espécies, mudanças de fases e reações em meios porosos. Fonte: KAVIANY (1991).

2.1.1 - Porosidade

A porosidade é uma propriedade importante dos materiais porosos, pois mede a sua capacidade de armazenamento de fluidos e está relacionada com o volume, sendo definida como o volume vazio em relação ao volume total ocupado pelo material e, portanto, representa o percentual de poros no meio poroso, não necessariamente interligados (NIELD, 1999).

Quando porções de espaços vazios estiverem interconectadas umas às outras, estes espaços são denominados de espaços vazios efetivos ou porosidade efetiva. Quanto maior for o índice de espaços vazios, maior será a porosidade e vice-versa. Um meio poroso é uma porção de espaço ocupada por matéria heterogênea ou multifásica, sendo pelo menos uma dessas fases não sólida. Genericamente, a porosidade, ε , é definida como sendo a relação entre o volume de espaços vazios, existentes no material poroso e o volume total ocupado pelo material (BEAR, 2013). É uma propriedade macroscópica do meio poroso, podendo ser definida pela equação 2.1

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V} = \frac{V - V_s}{V} \quad (2.1)$$

V_f é o volume do fluido, V_s é o volume do sólido e V o volume total do meio poroso. Esta definição leva em conta os poros que não estão conectados. Considerando-

se apenas os poros onde os fluidos podem circular, então tem-se a definição da porosidade efetiva, ε^* :

$$\varepsilon^* = \frac{V_f}{V_s} \quad (2.2)$$

2.1.2 - Permeabilidade e Equação de Darcy

A permeabilidade está ligada à porosidade e descreve a capacidade com que um fluido newtoniano sob pressão flui através de um meio poroso e é dependente da geometria do meio. A condutividade de um fluido é definida pela capacidade de se deixar atravessar em um meio, indicando a maior ou menor facilidade que o material possui de percolar o fluido no seu interior. Dessa forma, um material é bem permeável quando os fluidos se deslocam com facilidade, e pouco permeável quando ocorre o contrário. Com efeito, a permeabilidade é mais fortemente influenciada pela dimensão dos raios de acesso aos eporos e pelos graus de interligação e homogeneidade do meio poroso do que pelo valor absoluto da porosidade (Begonha, 2001). Para meios porosos compostos por grânulos que não são esféricas o diâmetro médio dos grânulos, d_p , pode ser determinado pela equação abaixo:

$$d_p = \frac{6A_p}{V_p} \quad (2.3)$$

A_p e V_p são área superficial e volume dos grânulos ou partículas.

O movimento de um fluido só é possível através dos poros interconectados, conforme mostra a Figura 2.2. O fluxo de um fluido em um meio poroso é expresso pela lei de Darcy, que define a vazão de um fluido através de um meio permeável e varia diretamente proporcional à pressão aplicada, e inversamente proporcional à viscosidade do fluido. Dessa forma, a intensidade do fluxo aumenta à medida que se exerce mais pressão ou diminui a viscosidade (ORTEGA et al., 2002).

A porosidade e a permeabilidade, apesar de relacionadas, não são sinônimas, pois pode haver casos de materiais em que, depois de saturados, tornam-se praticamente impermeáveis. Assim, não existe uma conexão direta entre a porosidade e a

permeabilidade, embora materiais com alta porosidade sejam, em geral, muito permeáveis, e isso se deve ao número de poros interligados.

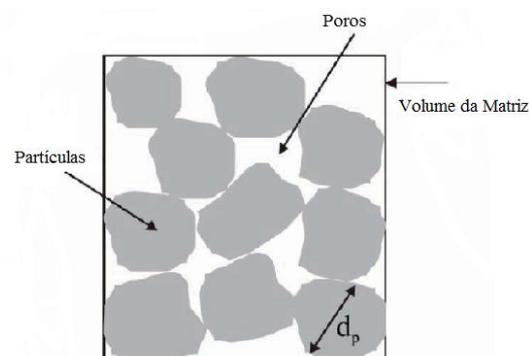


Figura 2.2 - Representação esquemática de um meio poroso. Fonte: MARTINS (2008).

A permeabilidade da fase gasosa é uma constante de proporcionalidade, que é geralmente experimentalmente determinada com unidades de comprimento². A permeabilidade da fase gasosa pode ser um pouco diferente do que a permeabilidade da fase líquida devido aos efeitos dos fluidos. A lei de Darcy é aplicável para baixa velocidade de fluxo que é geralmente o caso de escoamento em meios porosos, e nas regiões do fluxo onde as forças cisalhantes, tais como longe das paredes, são desprezíveis (CLIFFORD, 2006).

Um desenho esquemático do experimento de Darcy é mostrado na Figura. 2.3, em que um filtro homogêneo de altura h , é limitado por seções planas de mesma área superficial A . O filtro é preenchido com um líquido incompressível. Manômetros abertos são colocados para medir a pressão nos pontos inferiores e superior do filtro, fornecendo as alturas h_1 e h_2 , respectivamente (OLIVEIRA, 2012). Pela variação das várias quantidades envolvidas, Darcy deduziu a seguinte relação:

$$Q = -KA \left(\frac{h_2 - h_1}{h} \right) \quad (2.4)$$

Q - Vazão volumétrica de fluido que atravessa o filtro ($m^3 \cdot s^{-1}$)

K - Constante que depende das propriedades do fluido e do meio poroso, ($m \cdot s^{-1}$)

A - Área das seções planas do filtro (m^2)

$h_2 - h_1$ - Diferença de altura manométrica (m)

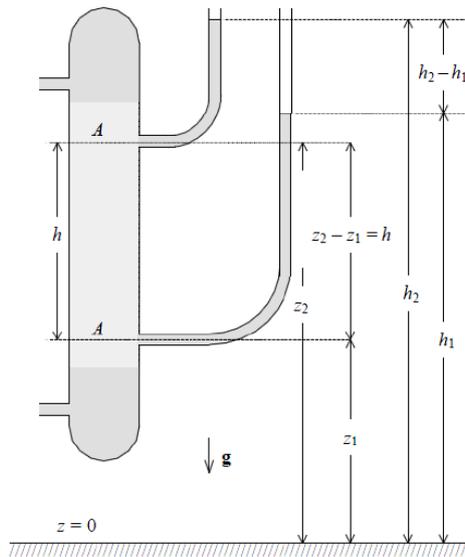


Figura 2.3 - Esquema para interpretação da equação de Darcy. Fonte: OLIVEIRA (2012).

O sinal negativo na expressão (2.4) indica que o escoamento é na direção oposta à pressão crescente. Escrevendo-se a equação de Darcy na forma diferencial, tem-se:

$$v_g = -\frac{K}{\mu}(\nabla P - \rho g) \quad (2.5)$$

Negligenciando-se os efeitos gravitacionais (g) a equação acima pode ser escrita na forma seguinte:

$$v_g = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (2.6)$$

2.1.3 - Superfície Específica

A superfície específica S_{spec} é definida como sendo a razão entre a área total da superfície do meio poroso A_{fs} e o volume total de sólido V_s , ou seja,

$$S_{\text{spec}} = \frac{A_{\text{fs}}}{V_s} \quad (2.7)$$

2.1.4 - Mecanismos de Transferência de Calor em Meios Porosos

Um típico mecanismo de transferência de calor é ilustrado na Figura 2.4, mostrando de forma esquemática um processo de transferência de calor e massa entre uma substância no estado gasoso e uma substância no estado sólido.

Levando-se em consideração a Figura 2.4, e, sabendo-se, que as pelotas utilizadas neste trabalho têm aproximadamente 3,5% de umidade; faz-se uma analogia dos mecanismos de transferência de calor e de massa no meio poroso durante a reação de combustão. Uma interpretação do processo de transferência de calor e massa em meios porosos é feita utilizando-se a Figura 2.5, onde ilustra-se quatro pelotas em contatos superficiais e um vazio (poro) entre as pelotas. A condução, a convecção e a radiação são os mecanismos de transferências de calor envolvidos no processo.

O processo de transferência de calor por condução é observado entre as moléculas de água que migram do interior das pelotas para a superfície e entre as moléculas de água que estão em contatos entre si na superfície como ilustra-se na Figura 2.5, o calor latente de evaporação é envolvido nesta etapa; as moléculas de água que ficam em contato com o meio vazio (poros) sofrem o processo de evaporação por convecção e por radiação.

Na Figura 2.5: 1 - representa o processo migratório das moléculas de água para a superfície; 2 - representa moléculas de água em contato na superfície da pelota onde prevalece a troca de calor por condução entre as moléculas; 3 e 4 - ilustram as molécula em contato com o meio vazio (poros) sofrendo o processo de transferência de calor por convecção e por radiação.

Neste mecanismo de transferência de calor pode-se observar ainda pela Figura 2.5, que as moléculas do vapor d'água na superfície das pelotas evaporam por ação do calor latente e do calor sensível. A ação do calor sensível dá-se após todas moléculas de água terem sido evaporadas.

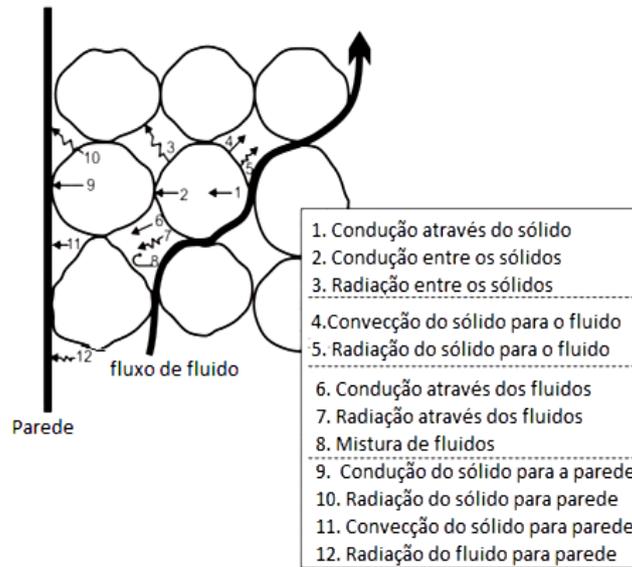


Figura 2.4 - Representação esquemática de transferência de calor e massa em meio poroso. Fonte: MARTINS (2008).

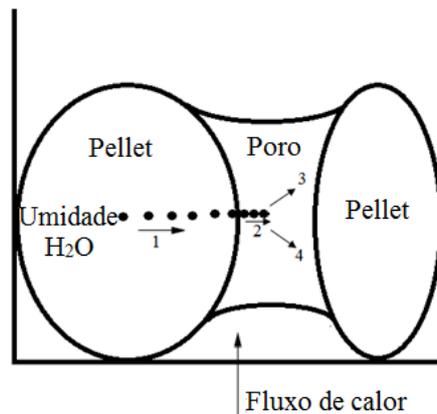


Figura 2.5 - Mecanismo de transporte de calor em meio poroso.

2.2 – Processos Termoquímicos em Meios Porosos

2.2.1 - Processo de Combustão

O processo de combustão envolvendo meios porosos geralmente apresenta três etapas bem definidas conforme mostra a Figura 2.6:

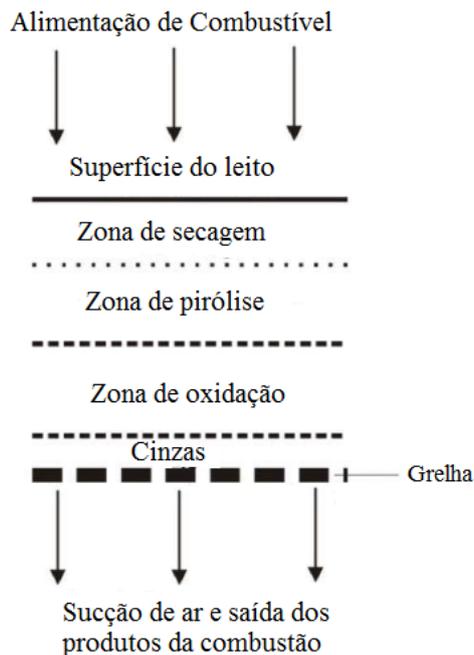


Figura 2.6 - Etapas de combustão em meio poroso. Fonte: DONGHOON (2000).

- ✓ Zona de secagem - O combustível sólido introduzido no reator sofre o processo de secagem em consequência das transferências de calor que ocorrem dentro do reator.
- ✓ Zona de pirólise - Em temperaturas acima de 250 °C, o combustível sólido começa pirólise. As macro moléculas moléculas decompõem-se em moléculas de tamanho médio e de carbono (char).
- ✓ Zona de oxidação - A zona de oxidação é formado ao nível em que o oxigênio (ar) é introduzido. Reações com oxigênio são altamente exotérmica e resulta em um aumento acentuado da temperatura entre 1200 °C - 1500 °C.

Especificamente durante a realização deste trabalho, observou-se que, durante o processo de combustão dentro do reator, as pelotas sofreram o processo de secagem com a eliminação da umidade que estavam retidas nas pelotas. Após a secagem ocorreu o processo de oxidação das pelotas, constituídas de cinza volante de caldeiras, carvão e argila, moídos. Baseando-se nestas observações, para este trabalho, pode-se esquematizar o processo de combustão com a ausência da reação de pirólise conforme a Figura 2.7.

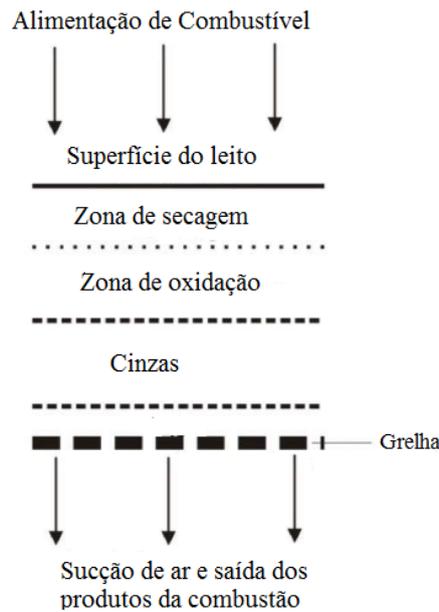
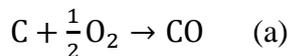


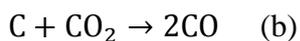
Figura 2.7 - Etapas de combustão observado para as pelotas utilizadas neste trabalho.

2.2.2 - Reação de Combustão

A reação de combustão é desencadeado por uma reação química entre o combustível e o oxigênio com a finalidade de geração de calor. Como resultado da reação de combustão, produtos químicos como CO_2 , CO , vapores de água, nitrogênio e componentes sulfúricos como SO_2 e SO_3 são produzidos. O CO_2 é resultante de uma combustão completa enquanto que o CO resulta de uma reação incompleta durante a reação de combustão. Industrialmente objetiva-se produzir uma máxima quantidade de calor durante o processo de combustão. Durante o processo de combustão o carbono reage com o oxigênio na superfície para formar monóxido conforme BORMAN (1998), mostrado na equação abaixo:



A superfície do carbono também reage com o dióxido de carbono e vapor d'água conforme as equações de redução:



As Eq. de redução (b) e (c) são geralmente mais lentas do que a reação de oxidação (a), e para a combustão geralmente somente a reação (a) precisa ser considerada.

2.2.2.1 - Combustão lenta (Smoldering Combustion)

Combustão lenta (Smoldering combustão) é uma reação de combustão que se desencadeia de forma lenta, sem chamas, sustentada pelo calor desenvolvido quando o oxigênio ataca diretamente a superfície de um combustível na fase condensada. É geralmente uma reação de combustão incompleta. Embora a combustão lenta seja um fenômeno de superfície ela pode se propagar pelo interior de um combustível poroso com permeabilidade ao fluxo. A diferença fundamental entre a combustão sem chamas (smoldering combustion) e a combustão com chamas (flaming combustion) é que a combustão sem chamas ocorre a nível de superfície do combustível sólido em detrimento à fase gasosa (REIN, 2009).

Muitos materiais sólidos podem sustentar uma reação de combustão lenta, incluindo o carvão, algodão, tabaco, papel, turfa, carvão em pó, a madeira, a placa de fibras orgânicas, espumas sintéticas e a carbonização de polímeros, incluindo poliuretano espuma (TORERO, 1993).

Em termos gerais, o combustível característico para uma reação lenta é constituído por um agregado com meio permeável, formado por partículas, grãos, fibras ou de uma matriz porosa. Estes elementos de combustível agregados facilitam a reação com o oxigênio da superfície, proporcionando uma grande área de superfície por unidade de volume. Eles também atuam como isolamento térmico que reduz as perdas de calor, mas, ao mesmo tempo, permitem o transporte de oxigênio para os locais de reação por convecção e difusão. Na indústria de petróleo, frentes de combustões lentas (smoldering combustion) são utilizadas com o propósito de iniciar-se a extração de óleo em reservatórios submersos (REIN, 2009). A Figura 2.8, mostra uma queimada florestal, onde observa-se o regime de queima em combustão lenta (sem chamas) e o regime de combustão com chamas.



Combustão com chamas Smouldering Combustão

Figura 2.8 - Combustão com chamas e combustão sem chamas durante uma queimada florestal. Fonte: REIN (2009).

2.2.2.1.1 - Estrutura de uma Frente de Reação de Combustão sem Chamas (Smoldering)

De um modo geral, há quatro regiões visualmente discerníveis propagando-se durante uma frente de combustão lenta. Estas são os seguintes:

i) - Pré-aquecimento do Combustível em Repouso.

Calor a partir da frente reação é transportado pela frente de pré-aquecimento do combustível até temperaturas onde evaporação da água ocorre. Esta frente não emite gases em quantidade significativa conforme a Figura 2.9.

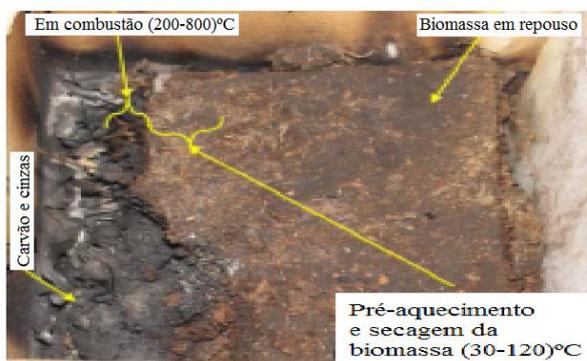


Figura 2.9 - Combustão de biomassa em repouso. Fonte: REIN (2008).

ii) - Evaporação.

Ocorre uma reação endotérmica dentro de numa faixa de temperaturas entre 80 °C a 100 °C, emitindo vapor d'água. Neste frente a perda de massa depende do teor de umidade.

iii) - Região de Combustão.

É o local onde as reações de pirólise e oxidação ocorrem e calor é liberado. Na reação de pirólise calor é absorvido e o combustível é convertido em gases voláteis, hidrocarbonetos poliaromáticos, traços de CO e CO₂, e vapor de água. Nesta etapa ocorre formação de alcatrão sólido carbonáceo.

A pirólise começa aproximadamente a temperaturas numa faixa entre (200 - 250) °C. A pirólise é mais forte nas camadas mais profundas do combustível, onde o transporte de oxigênio é reduzida e taxa de oxidação é menor. A oxidação envolve a reação exotérmica do combustível e carvão deixado pela frente da pirólise. O pico de temperatura é encontrada nesta região, e é onde a maioria da massa do combustível é perdida. A reação de oxidação ocorre a temperaturas superiores a 300 °C e é a principal fonte de CO e CO₂. Mais CO₂ é formado onde o suprimento de oxigênio é grande (por exemplo, mais próximo do suprimento de oxigênio ou da superfície livre) e CO é limitado (por exemplo, em locais distante do suprimento de oxigênio ou nas camadas mais profundo do combustível).

iv) - Formação de Carvão e de Cinzas

É a região onde a combustão lenta (smoldering combustão) cessa e deixa o restante da matéria esfriar à temperatura ambiente. As cinzas remanescentes da combustão representa o teor de minerais presentes no combustível original e o carvão é o resultado da combustão incompleta. A taxa de propagação da combustão lenta (smoldering) auto-sustentada é normalmente controlado pelo transporte de oxigênio e as perdas de calor líquido . No entanto, cinética química heterogênea do meio, governa a estrutura da frente da reação e impõe o valor efetivo do calor global liberado. A degradação de um combustível sólido envolve múltiplos caminhos para mudanças químicas (pirólise e oxidação), e

2.3 - Trabalhos desenvolvidos na área de Combustão de Biomassa

No artigo intitulado *On the Propagation of reaction Front Through a Porous Fuel in the Presence of an Opposed Forced Flow: Application to Mixture Characteristic of Municipal Waste*, observou-se que a queima de madeira, papel, papelão e plásticos é controlada pela cinética da reação e transporte de oxigênio para zona de reação. Experimentos foram conduzidos com papelão, madeira e plástico em um reator de contra fluxo (X. ZHOU, 1995).

O experimento consiste basicamente de um reator de leito fixo cilíndrico de 150mm de diâmetro , comprimento de 950 mm e com uma camada de isolante refratário de 35 mm de espessura e uma camada de isolamento de fibra de rocha também de 35 mm para obter-se uma propagação unidimensional . O ar entra pelo fundo do reator.

O reator de leito fixo é colocado no topo de uma escala hidráulica, assim a massa perdida durante o processo de combustão pode ser determinado em função do tempo. As temperaturas dentro da câmara de combustão são medidas com termopares tipo K, colocados ao longo reator em sua direção axial. O reator é preenchido até uma altura de 320 mm, com combustível sólido degradado tais como papéis, papelões e plásticos (lixos municipais) encontrados em regiões urbanas.

A ignição do combustível sólido é feita através de uma chama externa proveniente de papel encharcado com álcool distribuído na superfície do combustível para tornar o processo homogêneo. Ao término do processo de ignição inicia-se a propagação auto sustentada da chama. Os parâmetros variáveis são a velocidade do fluxo do oxidante forçado e a temperatura inicial, as temperaturas são registradas em função do tempo e a velocidade de propagação para frente de reação é obtida para diferentes locais.

Em um trabalho de tese de doutorado intitulada *The Structure of a Combustion Front Propagating in a Fixed Bed of Crushed Oil Shale: Co-current Configuration* desenvolvida na Universidade de Toulouse na França por MARTINS (2008), analisou-se a evolução de temperatura ao longo de um leito fixo preenchido com rochas, xisto betuminoso esmagado, em seguida moído para reduções granulométricas e uma mistura de carvão e areia .

O reator de combustão desenvolvido para a realização do trabalho de tese consiste de um cilindro vertical de 91mm de diâmetro interno, altura de 300 mm e envolto por uma camada de 3 mm de lã e uma camada de 50 mm de cerâmica refratária conforme a Figura 2.11.

Um grupo de seis termopares são colocados ao longo do cilindro com a finalidade de detectar as temperaturas ao longo do reator cilíndrico. Outro grupo formando uma coroa com seis termopares foram distribuídos em volta do reator em $Z=135$ mm, cuja finalidade é detectar o perfil da frente da reação de combustão neste local. A ignição para o início da combustão foi feita através de um calorímetro cônico ajustado para emitir um fluxo de calor radiante entre 45 KW e 50 KW e uma temperatura de 845 °C.

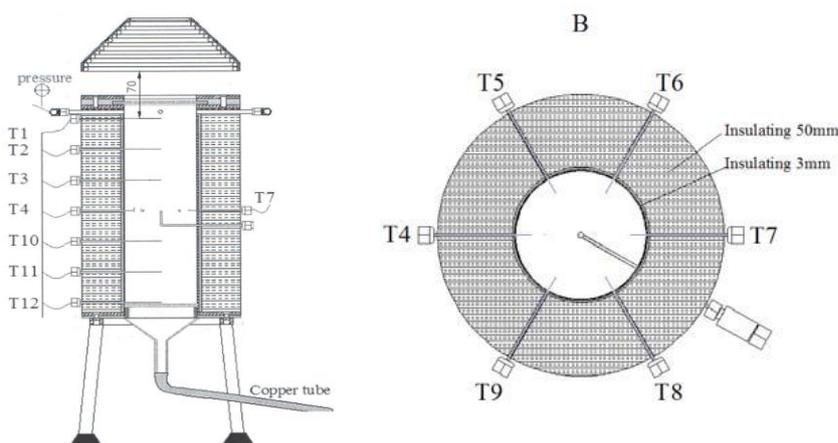


Figura 2.11 - Desenho esquemático do reator de combustão. Fonte: MARTINS (2008).

MACÊDO (1998), desenvolveu modelo matemático para simulação computacional e estimativa de propriedades termofísicas na combustão de troncos cilíndricos de madeiras baseado apenas na equação de conservação de energia para o processo de transferência de calor.

DONGHOON (2000), fez um estudo numérico e experimental da combustão de partículas de resíduos municipais em um reator de leito fixo o qual foi preenchido com cubos de madeiras cujo principal objetivo foi estudar os efeitos de variação de parâmetros tais como o suprimento de ar, tamanho das partículas e o poder calorífico do

combustível durante a reação de combustão. A combustão do combustível sólido em leito fixo foi modelado matematicamente através do método dos volumes finitos. O esquema do aparato experimental utilizado por DONGHOON (2000) é esquematizado na Figura 2.12. Para mais detalhes consultar a referência citada.

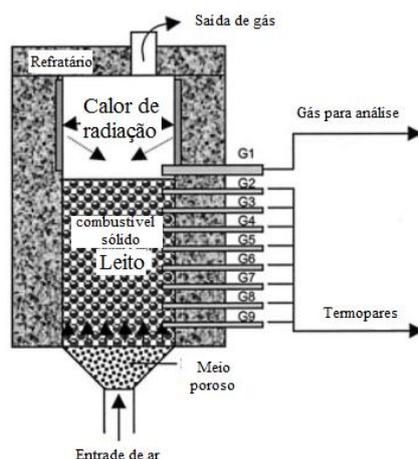


Figura 2.12 - Combustor unidimensional para combustível sólido. Fonte: DONGHOON (2000).

A combustão de resíduos sólidos humanos para verificação do seu potencial térmico como fonte de energia alternativa foi realizado por (MONHOL, 2013) na Universidade Federal do Espírito Santo.

2.4-Trabalhos acadêmicos desenvolvidos utilizando-se a cinza volante

No trabalho desenvolvido por TANCREDI (2010), foi feito um estudo para a utilização da cinza volante de caldeira tendo como objetivo principal a substituição do cimento na produção de concreto para uso na construção civil. Foram realizados experimentos com proporções de cinzas de 0%, 10%, 20% e 30% que foram devidamente misturadas. Foram realizadas quatro misturas diferentes devidamente homogêneas num misturador tipo betoneira com um tempo de mistura de 10 minutos para todos os traços. Do trabalho foi concluído que a cinza volante substituiu ao cimento de forma eficiente quanto ao critério de resistência.

Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento portland foi estudado por VAGHETTI (1999).

Nesse trabalho investigou-se a influência que a substituição de parte do cimento por alguns tipos de pozolanas, como a cinza volante, a sílica ativa de casca de arroz, exercem sobre a carbonatação do concreto.

2.5 - Estudos realizados utilizando-se a Argila

Existem inúmeros trabalhos publicados utilizando a argila para determinados fins; levando-se sempre em consideração a pesquisa a ser desenvolvida e os resultados a serem obtidos. Dentre outros, cita-se abaixo dois trabalhos, contextualizando o uso da argila em diferentes setores industriais.

Um dos segmentos importantes de aplicação da argila é o da indústria química de cosmético onde, por exemplo, no trabalho desenvolvido por SILVA (2011), foi feito um estudo da argila do Estado do Piauí para uso em formulações cosméticas que, conforme a autora, a utilização da argila piauiense em cosméticos, além de incentivar o uso de matérias primas do Nordeste, também contribuirá para o desenvolvimento sócio econômico e geração de recursos e distribuição de renda na região.

Outro segmento importante para a utilização da argila é o da indústria cerâmica, nesse contexto, SOUZA (2010). desenvolveu um trabalho onde é avaliado o uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil. Resultados obtidos nesse trabalho mostram a possibilidade de fabricação de agregados com diferentes propriedades e possibilidades de aplicações na indústria da construção civil. Tais propriedades dependem do controle de parâmetros, dentre outros, cita-se, o teor de sílica livre e argila. Tais variáveis, dentre outras, permitem controlar a formação da fase vítrea que é a responsável pelas propriedades dos agregados como a porosidade, resistência mecânica e densidade. A argila que foi utilizada para melhorar a plasticidade e possibilitar a conformação do material é oriunda das margens do Rio Guamá.

Trabalho desenvolvido com a finalidade de estudar a utilização do rejeito do processo Bayer como matéria prima para a produção de agregados leves, utilizando-se a lama vermelha proveniente das indústrias de mineração e metalúrgicas do Estado do Pará, misturada com argila e sílica. Ao término do trabalho concluiu-se que a lama vermelha misturada com a sílica e a argila tem como produto final um material com

resistência mecânica e densidade comparadas aos agregados naturais utilizados na construção civil, podendo, desta forma substituir alguns agregados como o seixo rolado e a pedra brita, contribuindo também para a preservação da natureza, (DOS SANTOS, 2011).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Materiais utilizados como Matéria Prima

3.1.1 - Carvão Vegetal

3.1.1.1- Propriedades características do Carvão Vegetal

O carvão vegetal é um produto sólido de cor negra, friável, possuindo densidade na faixa de 180 kg/m³ a 300 kg/m³. Densidade e composição química do carvão vegetal dependem da madeira que lhe deu origem. Além disso, os tamanhos dos pedaços ou a granulometria podem variar em função dos parâmetros da carbonização (BARCELLOS, 2007). O carvão, logo que é preparado, tem capacidade de absorver água (higroscopicidade) que varia de 4 a 16%. Quanto maior a temperatura de carbonização, menor é o poder higroscópico.

O carvão em termos de análise química é considerado um produto constituído de três partes: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. Os materiais voláteis são as substâncias desprendidas da madeira como gases durante a carbonização e/ou queima do carvão, sendo aceitável de 20% a 24% o teor de voláteis encontrados no carvão vegetal. Normalmente, quanto maior o teor de carbono fixo, menor é o teor de materiais voláteis. As cinzas que são provenientes do lenho e principalmente da casca da madeira carbonizada devem estar abaixo de 1% para carvão vegetal e o teor de umidade desejável é abaixo dos 5% (VITAL et al.,1986). O carvão vegetal é altamente poroso. A porosidade do carvão vegetal é de aproximadamente 90% , este valor pode variar de acordo com o tipo ou a procedência da madeira, (BORMAN, 1988).

A granulometria do carvão vegetal, juntamente com o teor de carbono fixo e a porosidade são os principais fatores que afetam a reatividade. A reatividade pode ser definida como sendo a velocidade com a qual, a uma temperatura determinada, o carbono reage com um gás contendo oxigênio.

3.1.1.2 - Tecnologia de Produção do Carvão Vegetal

A ação do calor sobre a madeira, que é um material predominantemente orgânico, implica na sua degradação. Por consequência, há o surgimento de uma

pequena fração residual que é denominada “cinzas” e que correspondem aos elementos minerais quantitativamente minoritários originalmente presentes na madeira. Este fenômeno é denominado genericamente de "pirólise" ou "termodegradação" da madeira (BRITO, 1990).

A pirólise da madeira ou de outra biomassa vegetal, em atmosfera controlada e à temperatura conveniente, produz carvão vegetal e matéria volátil parcialmente condensável. Este processo também é chamado de “destilação seca da madeira” pois, mediante a ação do calor, ocorre a eliminação da maior parte dos componentes voláteis da madeira e a concentração de carbono no carvão vegetal produzido. A Figura 3.1, ilustra este processo. Da condensação da matéria volátil resultam o licor pirolenhoso e o alcatrão insolúvel. O licor pirolenhoso é composto de ácido pirolenhoso, que pode ser definido como uma solução aquosa de ácidos acético e fórmico, metanol e alcatrão solúvel, além de outros constituintes menores. Os gases não condensáveis consistem de compostos gasosos de carbono (CO_2 , CO , C_nH_m) e nitrogênio. A análise do carvão e da matéria volátil mostra que sua composição depende fortemente da temperatura de carbonização, da espécie vegetal que fornece a madeira e da idade da árvore (FRREIRA, 2000).

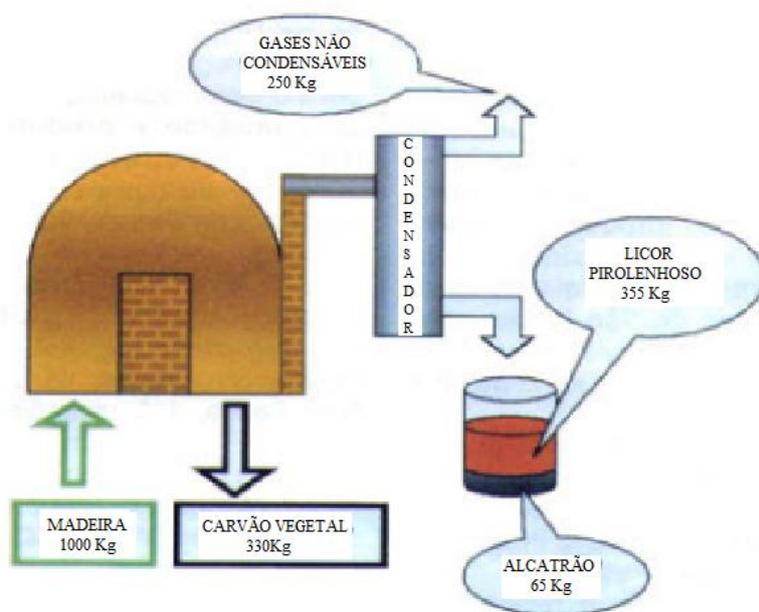


Figura 3.1 - Ilustração da pirólise de madeira. Fonte: (CENBIO, 2008).

O processo de carbonização pode ser dividido em 4 fases, dependendo da faixa de temperatura alcançada:

- i) Até 200 °C: Ocorre a secagem da madeira. O processo é endotérmico, verificando-se a liberação de H₂O, traços de CO₂, HCOOH, CH₃COOH.
- ii) 280 °C: O processo ainda é endotérmico, com a liberação de H₂O, CO₂, HCOOH, CH₃COOH e glioxal e um pouco de CO. Nesta etapa, destaca-se o início da liberação de produtos com alto poder calorífico.
- iii) 500 °C: O processo é exotérmico e auto-sustentável. Ocorrem reações secundárias com os produtos da pirólise primária. Verifica-se a liberação de CO, CH₄, HCHO, CH₃COOH, CH₃OH, H₂ e alcatrões. Forma-se o resíduo da pirólise: o carvão vegetal.
- iv) Acima de 500 °C: Processo indesejado, pois a H₂O e o CO₂ reagem com o carvão, produzindo CO, H₂ e HCHO, e diminuindo, portanto, o rendimento. Ocorrem também reações de pirólise dos gases efluentes da etapa anterior.

A temperatura de carbonização influencia diretamente no rendimento de carvão vegetal produzido e também em sua composição elementar, conforme pode ser visto na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Influência da temperatura no rendimento e composição elementar do carvão.

Fonte: LEPAGE et al. (1986).

Temperatura de Carbonização(°C)	C (%)	H (%)	O (%)	Rendimentos (%)
200	53,3	6,3	41,4	91,8
300	73,2	4,9	21,9	51,4
400	82,7	3,8	13,5	37,8
500	89,6	3,1	6,7	33,0
600	92,6	2,6	5,2	31,0
800	95,8	1,0	3,3	26,7
1000	96,6	0,5	2,9	26,5

3.1.2 - Argila

São materiais terrosos cujo tamanho de partícula não ultrapassa 2 μm , sendo constituída por um conjunto de argilominerais e cuja estrutura cristalina depende da composição e proporções dos minerais presentes. Atualmente não existe padronização para o significado do termo argila, permitindo vários conceitos dependentes da formação profissional, técnica ou científica dos que por ela se interessam (geólogos, pedólogos, agrônomos, químicos, mineralogistas, petrólogos, ceramistas, engenheiros civis, sedimentólogos, farmacêuticos, etc) (MEIRA, 2001).

GUGGENHEIM e MARTIN (1995), definem argila como um material de ocorrência natural composto principalmente de minerais de baixa granulometria, que apresenta plasticidade em teores de água apropriados. O tamanho da partícula nas argilas é um parâmetro essencial em todas as definições de argila, porém não há um limite específico aceito. Por exemplo, em pedologia o diâmetro esférico equivalente é de 2 μm ; já na geologia, sedimentologia e geoengenharia o limite máximo fixado é de 4 μm ; à nível coloidal o limite máximo geralmente aceito é de 1 μm (MOORE, 1997).

3.1.2.1 - Composição da Argila

As argilas são constituídas essencialmente por argilominerais que contêm em sua composição silício, alumínio, água, e, frequentemente, quantidades apreciáveis de ferro, metais alcalinos e alcalino-terrosos. Além dos argilominerais as argilas geralmente contêm 28 matéria orgânica, sais solúveis, partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais não-cristalinos (MILLER, 2009).

Para RANKKA (2004), argila é composta de substâncias sólidas, líquidas e gasosas. As partículas sólidas formam um esqueleto e os vazios entre as partículas são preenchidos com gás ou líquido, ou uma mistura de ambos.

Os argilominerais e outros constituintes, como quartzo, feldspatos, carbonatos, matéria orgânica, dentre outros formam a sua estrutura química. Geologicamente, as argilas se originam das rochas, ou de sedimentos rochosos, como resultado do intemperismo, da ação hidrotermal ou de materiais que se depositaram como sedimentos fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos (CLARKE, 1985).

3.1.2.2 - Propriedades da Argila

As propriedades mais importantes das argilas e que auxiliam na escolha das mesmas para as mais diversas ações são: composição mineralógica, formato e distribuição granulométrica das partículas, plasticidade, resistência mecânica, retração linear de secagem, compactação, tixotropia, superfície reativa (absorção, troca iônica, intumescimento), baixa toxicidade, terapêutica e viscosidade da dispersão (SOUZA, 2008).

3.1.3 - Cinza Volante

As cinzas provenientes da combustão do carvão mineral, são denominadas cinzas volantes, são resíduos sólidos obtidos principalmente em usinas termelétricas quando suas partículas finas e esféricas são retidas por precipitadores eletrostáticos ou mecânicos e armazenadas em silos apropriados (VAGHETTI, 1999).

Uma central termelétrica de dimensão média produz várias centenas de toneladas de cinzas diariamente. As suas características físicas e químicas são extremamente diferenciadas em função, sobretudo, do tipo de carvão e fornos utilizados. A composição granulométrica das cinzas volantes situam-se geralmente, entre 5 μm e 200 μm , com um tamanho médio de 30 μm a 50 μm . Deste modo, para utilização das cinzas volantes não há necessidade, em geral, de submetê-las à trituração. As partículas tendem a apresentar uma forma esférica, conferindo uma boa plasticidade à massa. Trata-se de materiais, na sua grande maioria amorfos, contendo percentagem muito baixas de componentes cristalinos, constituídos de agulhas finíssimas de mulita. A própria composição química parece ser muito variável: sílica (30-55%), ferro (5%-14%), cálcio (1% - 15%), sódio(0,1% - 1,5%), potássio (0,2% - 3,6%), magnésio (1% - 5%) além de vestígios de outros elementos químicos.

As partículas de cinza volante apresentam diâmetros entre 1 μm e 100 μm , com mais de 50% menores do que 20 μm . A área específica Blaine está normalmente entre 250 m^2/kg e 600 m^2/kg . A massa específica da cinza volante encontra-se na faixa entre 1,9 g/cm^3 e 2,4 g/cm^3 , não sendo uma característica determinante da qualidade da cinza, mas é um indicativo da dimensão dos grãos.

3.2 - Etapas para Produção das Pelotas

Os seguintes procedimentos foram adotados para produção das pelotas:

- i) Secagem em estufa à temperatura de 105 °C do carvão vegetal e da argila.
- ii) Cominuição do carvão no moinho de disco é ilustrada na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Moinho de discos e carvão vegetal cominuído.

- iii) Moagem do carvão e da argila durante 30 minutos em um moinho de bolas mostrado na Fig. 3.3.



Figura 3.3 - Moinho de bolas.

- iv) Homogeneização do carvão, argila e cinza volante de caldeira no moinho de bolas durante uma hora.
- v) Produção dos agregados numa betoneira de 160 litros de capacidade, Figura 3.4.
- vi) Os agregados produzidos eram retirados da betoneira e colocados em uma estufa à temperatura de 105 °C durante um período de 24 horas.

Após a realização de vários experimentos concluiu-se que para cada 1 Kg de agregados o ideal seria utilizar aproximadamente 400 ml de água, obtendo-se, desta forma, um agregado que após a secagem na estufa apresentava-se resistente bastante para ser utilizado no reator de combustão durante o experimento. O controle da

quantidade de água para produção dos agregados foi feito utilizando-se uma pisseta de 500ml.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 3.4 - (a) Betoneira; (b) Pelotas úmidas; (c), (d) Pelotas secas com diferentes granulometrias.

vii) A seleção dos agregados mostrados na Figura 3.4, para serem utilizados no reator de combustão, foi feita utilizando-se peneiras com diâmetro variando entre 6 mm e 13 mm. Figura 3.4, (c) e (d).

3.3 - Fluxograma de Atividades para o Processo de Produção das Pelotas.

Para realização dos experimentos no reator de combustão, foram produzidos pelotas compostas de cinza volante de caldeiras, carvão e argila retirados das margens do rio Guamá. Após várias tentativas, observou-se que as pelotas produzidas com um teor 30% de cinza volante, de 40% de argila e 30% de carvão vegetal moído, apresentavam maiores consistências. A Figura 3.5, mostra o fluxograma de atividades para o processo de produção das pelotas. Nos subitens seguintes descreve-se as etapas de produção das pelotas mostradas no fluxograma a seguir:

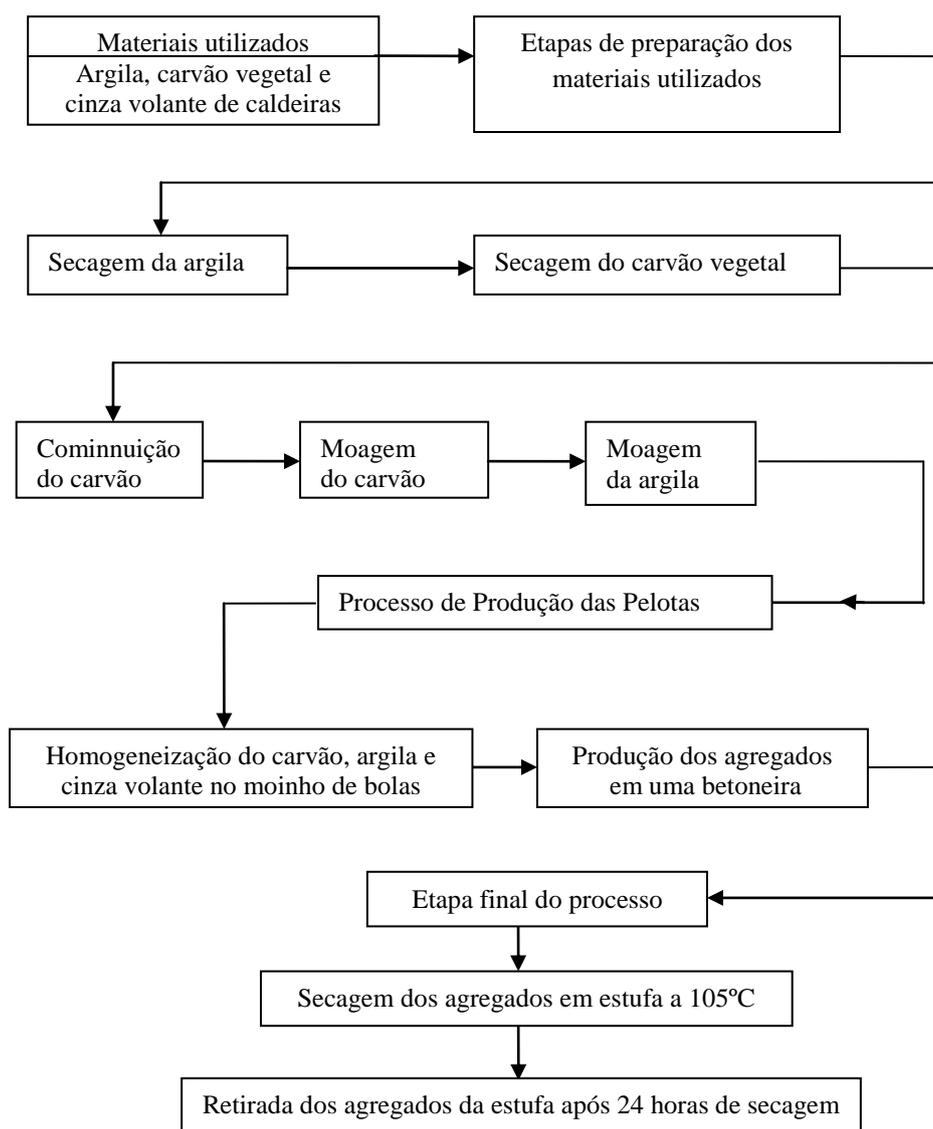


Figura 3.5 - Fluxograma de atividades para produção das pelotas.

3.4 - Descrição do Aparato Experimental

O experimento consiste de um reator de leito fixo esquematizado na Figura 3.6a. O reator de leito fixo é um cilindro confeccionados em aço carbono com espessura de 1/8" com 158 mm de diâmetro interno, comprimento de 700 mm e 164 mm de diâmetro externo. Para obter uma propagação unidimensional da frente de combustão as paredes do reator são isoladas por uma camada de isolamento de fibra de lã de rocha de 30 mm espessura. Por meio deste isolamento radial, as perdas de calor são minimizados e a propagação ao longo do eixo do reator pode ser considerada unidimensional. Sete

termopares do tipo K são distribuídos ao longo do reator, guardando as devidas distâncias, mostradas na Figura 3.6 a. A Figura 3.6 b, mostra o reator in loco.

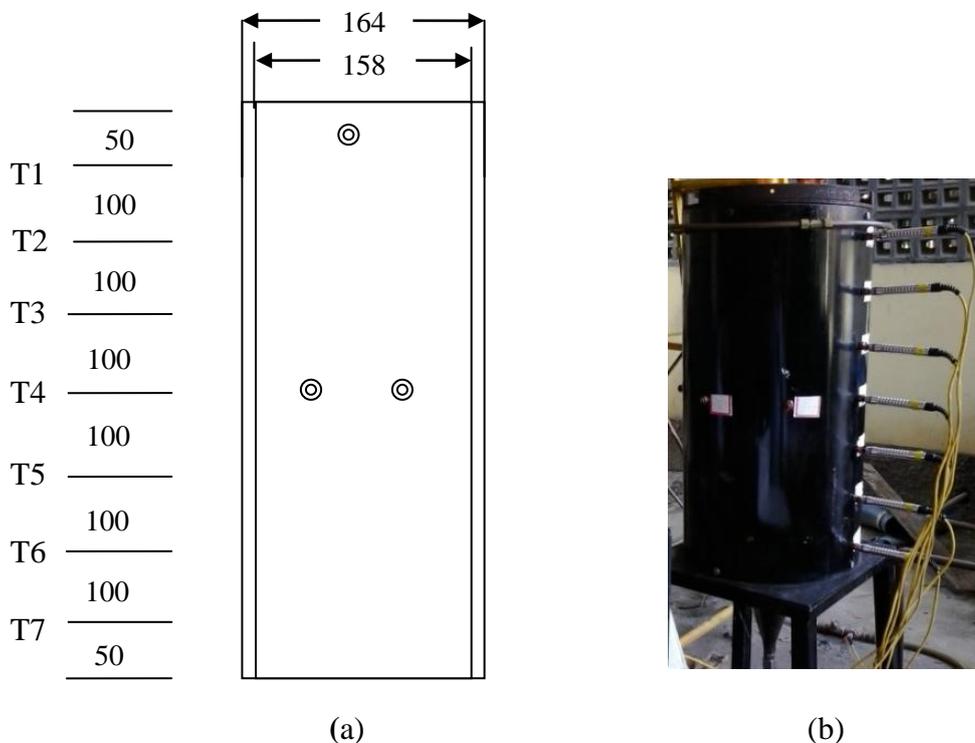


Figura 3.6 - (a) Desenho esquemático do reator; (b) Reator de combustão in loco.

3.5 - Fluxograma do Processo para Realização dos Experimentos

O fluxograma do processo para a realização dos experimentos é mostrado na Figura 3.7, onde inicialmente o ar é introduzido no reator de combustão por meio de um exaustor (6) conectado na saída do reator por um tubo de cobre de 1/2 polegadas. Uma grelha perfurada garante uma distribuição homogênea do fluxo de ar, além de evitar de forma bastante eficiente o entupimento do reator com cinzas succionadas pelo exaustor. As taxas de fluxos de ar são controladas por meio de válvulas manuais (4) e (5), as velocidades dos fluxos de ar são medidas para cada experimento com o reator previamente preenchido com as pelotas, antes do início da combustão, através de um anemômetro. Um ventilador centrífugo (13), foi utilizado para arrefecer a temperatura dos gases na saída do reator e entrada do tubo de cobre. As temperaturas dentro da câmara de combustão são registradas por meio de termômetros digitais termo acoplados. Sete termopares são colocados dentro do reator de tal modo que suas

extremidades ficam localizadas na linha de centro do eixo do reator de combustão. A distância entre os termopares é determinada para assegurar a melhor descrição do campo de temperatura ao longo do eixo. Um termopar colocado na superfície externa do reator foi utilizado para medir a temperatura do reator nesse local, e de acordo com a temperatura registrada pelo aquisitor de dados, observou-se que a temperatura na superfície externa é de aproximadamente 9% do valor da temperatura interna, mostrando desta forma, que o fluxo de calor ao longo do leito pode ser considerado unidimensional. Um outro termopar foi colocado na válvula 2, para medir a temperatura interna do fluxo de gases.

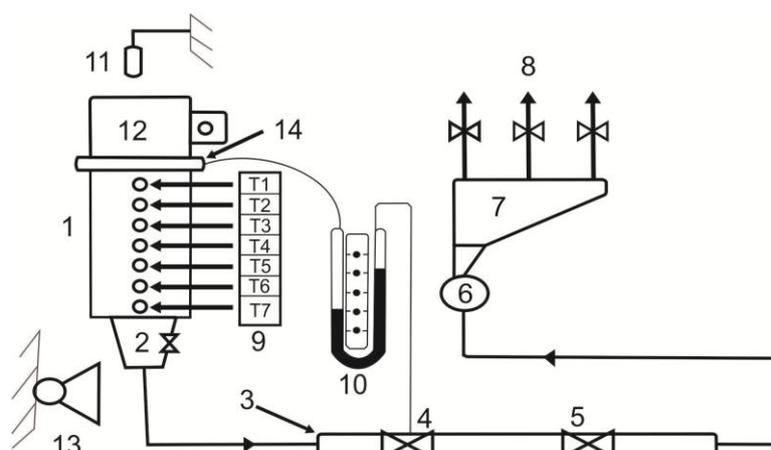


Figura 3.7 - Fluxograma esquemático dos experimentos.

- 1 - Reator de Combustão
- 2 - Cone acoplado na saída do reator
- 3 - Tubo de acrílico transparente
- 4 - Válvula conectada com o manômetro tipo U
- 5 - Válvula de controle de fluxo de ar
- 6 - Exaustor
- 7 - Descarga do exaustor
- 8 - Válvulas de descarga de saída de ar para atmosfera
- 9 - Termopares
- 10 - Manômetro tipo U
- 11 - Maçarico
- 12 - Tampa do reator de combustão
- 13 - Ventilador para arrefecer o fluido interno

14 - Aro de cobre para entrada de ar

3.6 - Procedimento Experimental

O reator de leito fixo foi preenchido proporcionalmente com 80% de carvão cominuído em moinho de discos e tamanho devidamente selecionados através de peneiras e com 20% de pelotas, constituídas de 40% de argila moída, 30% de cinza volante de caldeiras e 30% de carvão moído até uma altura de 700 mm (totalmente preenchido). O combustível foi levemente compactado e o procedimento foi adotado para os diferentes testes.

A ignição do combustível sólido inicia-se com uma chama externa de um maçarico, utilizando o gás butano como combustível, distribuída uniformemente em toda superfície do combustível, conforme mostra a Figura 3.8, para tornar o processo homogêneo. Após terminado o processo de ignição, inicia a auto sustentação de propagação da chama. O tempo para ignição do combustível e a auto sustentação da chama duravam aproximadamente 6 minutos, quando o termômetro 1, colocado a uma distância de 50mm do topo do reator, totalmente preenchido com o combustível sólido, acusava uma temperatura de aproximadamente 700 °C, então, cortava-se o combustível (gás butano) para o maçarico e a reação de combustão avançava de forma auto sustentada. O maçarico foi colocado a uma distância de aproximadamente 13 mm do topo do reator.



Figura 3.8 - Ignição do combustível no reator de combustão.

As variáveis do processo são as velocidades dos fluxos do oxidante, os diâmetros das pelotas e as granulometrias do carvão. As temperaturas são registradas em função do tempo através dos termopares distribuídos axialmente ao longo do reator e devidamente conectados ao registrador de gráfico (Paper Less Recorder), é mostrado

na Figura. 3.9, e a velocidade de propagação da frente de reação de combustão é obtida para diferentes locais.

A propagação da frente de chama é determinada pelo tempo levado para a reação atravessar dois termopares consecutivos. A chegada da frente de reação em um termopar é determinada por um repentino aumento na temperatura. Somente os termopares colocados na linha de centro do leito combustível são usados para calcular a velocidade de propagação da frente de chama.



Figura 3.9 - Paper Lass Register acoplado ao reator de combustão.

Um termopar colocado na parede externa do reator acusou uma temperatura máxima de 110 °C conforme mostra a Figura 3.10, que é um valor cerca de 9% da temperatura máxima dentro do reator de combustão, mostrando que, desta forma pode-se desprezar-se as perdas na direção radial.

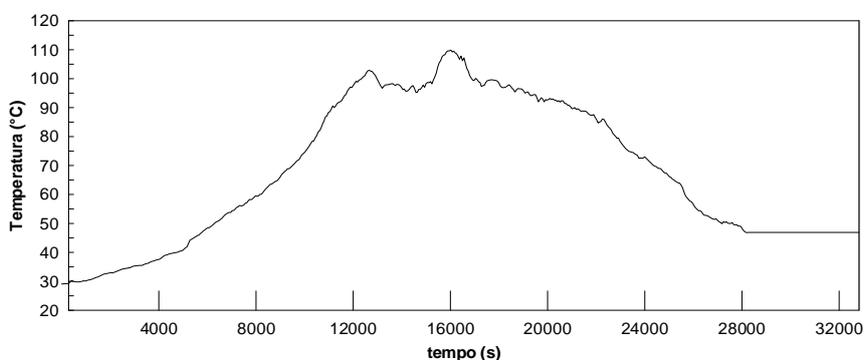


Figura 3.10 - Temperatura na superfície externa do reator.

Foram descartados quatro experimentos devido a problemas apresentados durante a evolução da reação de combustão ao longo do leito. Observou-se para estes experimentos a não evolução da reação devido ao entupimento do leito, entradas indevidas de ar no sistema, tubos conectados na saída do reator não suportaram altas temperaturas, proporção de carvão vegetal e pelotas adicionadas ao reator e vapores d'água condensados dentro dos tubos do sistema contribuíram para a não evolução da chama da reação. Para a correção dos problemas acima citados substituiu-se os tubos à base de acrílicos por tubos de cobre e tubos de alumínio, todo sistema foi inspecionado e vedados os locais que apresentavam possíveis entrada de ar. A retirada de vapores d'água provenientes das reações dentro do reator era feita desconectando e conectando um tubo à base de acrílico conectado à válvula (4) e com capacidade para suportar temperaturas de até 160 °C aproximadamente. A temperatura interna do fluido atingiu uma temperatura máxima de 123 °C, conforme mostra a Figura 3.11:

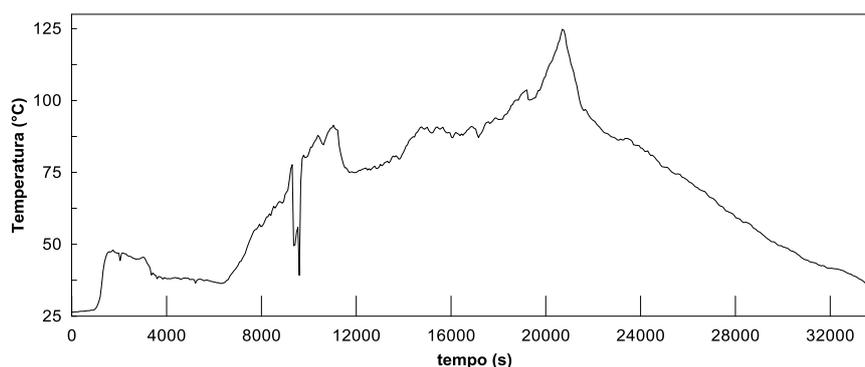


Figura 3.11- Temperatura interna do fluido.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS NA CÉLULA DE COMBUSTÃO

4.1 - Resultado das Análises dos Materiais utilizados no Experimento

As microanálise análise química dos materiais utilizados neste experimentos com a finalidade de determinar-se as suas composições químicas elementares foram realizadas via MEV - EDS do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia - PRODERNA, conforme mostra a Figura 4.1. Os resultados das análises são mostrados e analisados a seguir.



Figura 4.1 - MEV utilizado neste trabalho.

4.2 - Resultado da Análise da Argila em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura 4.2, apresenta o resultado, da microscopia de superfície das amostras da argila coletada às margens do Rio Guamá.

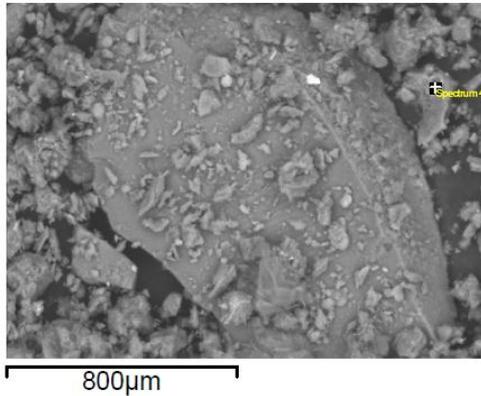
Spectrum details

Project: New project

Spectrum name: Spectrum 4

Electron Image

Image Width: 1.656 mm



Acquisition conditions

Acquisition time (s) : 30.0

Process time : 5

Accelerating voltage (kV) : 20.0

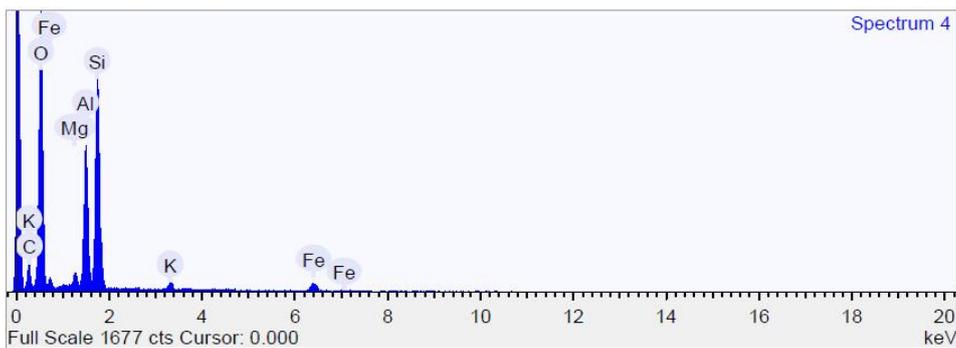


Figura 4.2 - Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra de argila e respectivos Espectros de Energia Dispersiva.

A Tabela 4.1, mostra os resultados para análise de quatro amostras de argila. Pode-se observar que para todas análises a quantidade de sílica presente é mais intensa do que os outros elementos. O percentual de carvão na amostra número quatro pode ser explicado como uma contaminação presente na argila, possivelmente pela deposição do carvão em pó sobre a amostra.

Tabela 4.1 - Análise química elementar da argila.

Elemento	C (%)	O (%)	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	K (%)	Fe (%)
Análise 1		65,069	0,371	3,599	29,667	0,433	0,861
Análise 2		68,895		1,773	28,604	0,186	0,543
Análise 3		55,763	0,661	12,498	24,434	5,486	1,157
Análise 4	13,732	63,811	0,948	7,551	11,993	0,532	1,433

4.3 - Resultado da Análise da Cinza Volante em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Figura. 4.3 e a Tabela 4.2, mostram os resultados da microscopia de superfície das amostras de cinza volante. Nota-se uma predominância do Carbono, Oxigênio, Alumínio, Sílica e Cálcio.

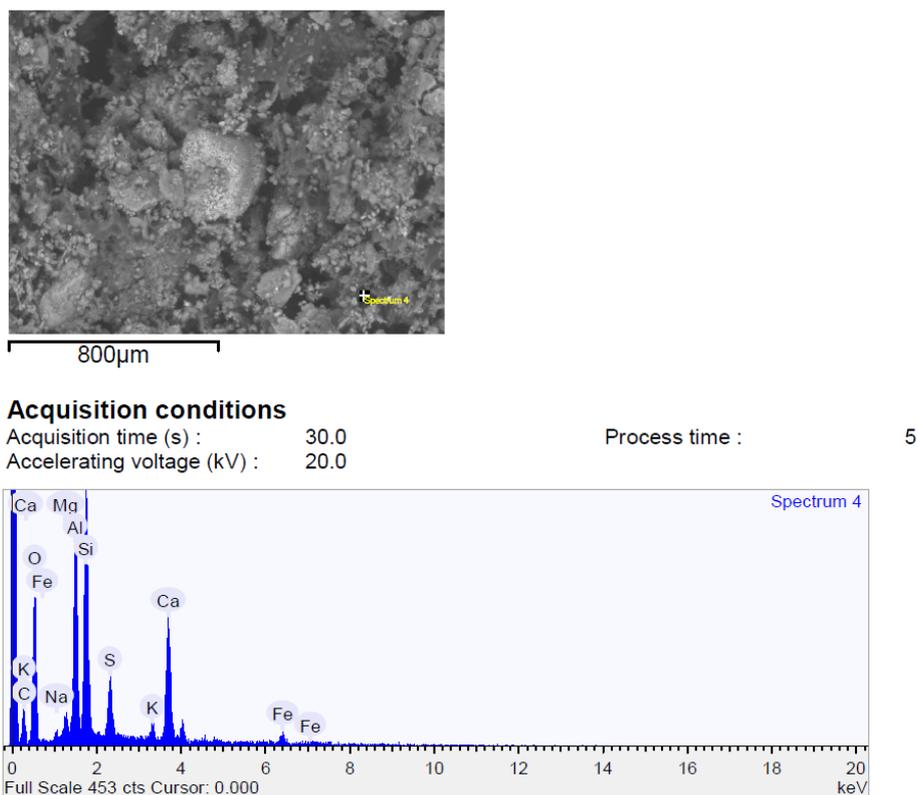


Figura 4.3- Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra de cinza volante e respectivos Espectros de Energia Dispersiva.

Tabela 4.2 - Composição química elementar da cinza volante.

Elemento	C (%)	O (%)	Na (%)	Mg (%)	Al (%)	Si (%)	S (%)	K (%)	Ca (%)
Análise 1	16,755	54,719		0,943	4,760	8,479	2,311	0,683	8,787
Análise 2	3,189	55,950	1,105	2,056	11,428	13,979	0,405	1,237	6,506
Análise 3	17,648	52,264		0,927	1,200	1,560	1,034		25,366
Análise 4	9,550	50,283	0,752	1,192	10,629	13,391	3,271	0,941	8,471

4.4 - Resultado da Análise do Carvão em Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV).

A Figura. 4.4, e a Tabela 4.3, apresentam os resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra de carvão moído, utilizado nos experimentos e respectivos Espectros de Energia Dispersiva.

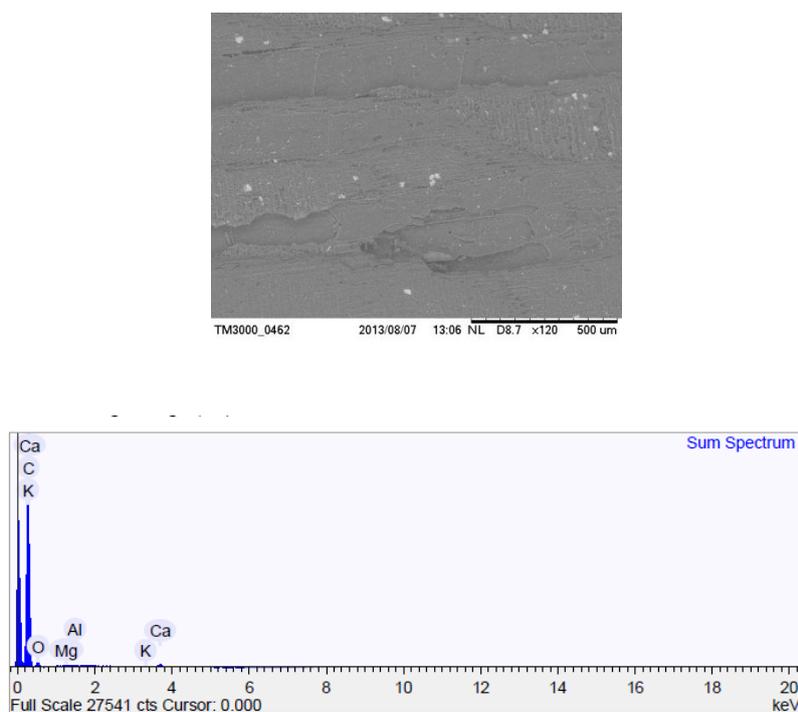


Figura 4.4 - Microscopia Eletrônica de Varredura da amostra de carvão moído e seu respectivo Spectrum EDS.

Observa-se na Tabela 4.3, um percentual bastante elevado de carbono na presença do carvão utilizado como combustível neste trabalho. Durante as reações de combustão foi registrado picos de até 1290°C, confirmando a boa qualidade desse combustível utilizado nos experimentos.

Tabela 4.3 - Micro análise do carvão em pó.

Elemento	(% em peso)
Carbono	87,274
Oxigênio	11,274
Magnésio	0,205
Alumínio	0,115
Potássio	0,349
Cálcio	0,783

4.5 - Análise das Pelotas antes da Combustão no Reator

Na Figura. 4.5 e na Tabela 4.4, mostra-se os resultado da análise MEV - EDS para as pelotas (misturas de argila, carvão e cinza volante de caldeira) antes da combustão das pelotas.

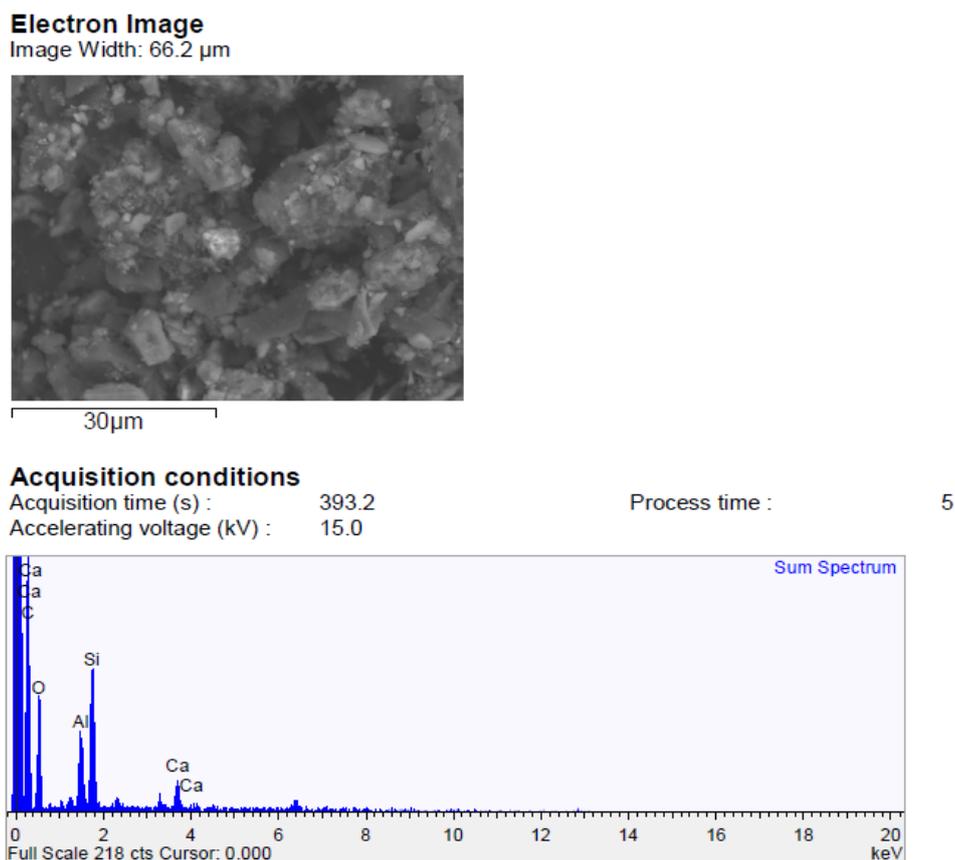


Figura 4.5 - Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra das pelotas antes da combustão e respectivos Espectros de Energia Dispersiva.

Na Tabela. 4.4, observa-se a predominância do carbono em relação aos demais elementos para as pelotas antes de sofrerem o processo de combustão.

Tabela 4.4 - Composição química elementar das pelotas antes da combustão.

Elementos	(% em Peso)
Carbono	58,819
Oxigênio	30,422
Alumínio	2,561
Silício	5,087
Cálcio	2,111
outros	1,000

4.6 - Análise das Pelotas após a Combustão

Na Figura 4.6 e na Tabela 4.5, é apresentado o resultado análise MEV - EDS para as pelotas após a combustão das pelotas.

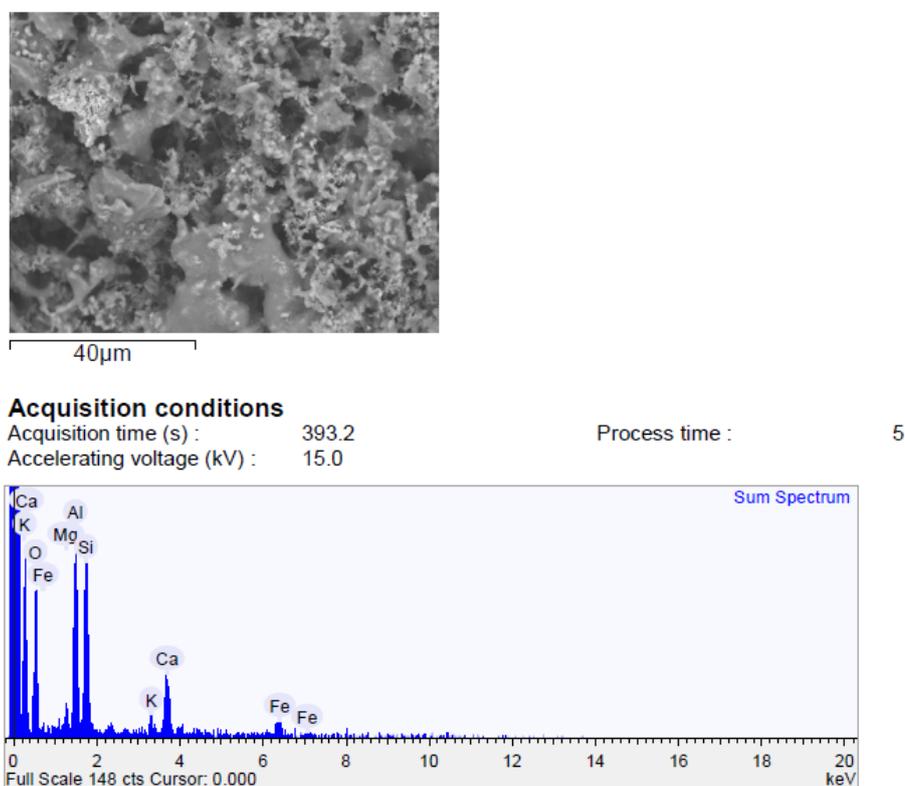


Figura 4.6 - Microscopia Eletrônica de Varredura de amostra das pelotas antes da combustão e respectivos Espectros de Energia Dispersiva.

Na Tabela 4.5, observa-se que após o processo de combustão, o carbono contido nas pelotas foi totalmente consumido, restando proporções predominantes de Oxigênio, Alumínio, Silício, Cálcio e Ferro.

Tabela 4.5 - Composição química elementar das pelotas após o processo de combustão.

Elementos	(% em peso)
Oxigênio	47,853
Magnésio	2,345
Alumínio	13,860
Silício	17,935
Potássio	2,446
Cálcio	8,943
Ferro	6,618

4.7 - Análise Termogravimétrica da Amostra das Pelotas.

A análise foi feita no termogravímetro do Departamento Acadêmico de Química do Instituto Federal de Educação Tecnológica do Maranhão - IFMA, conforme dados abaixo:

Amostra previamente macerada em almofariz de ágata;

Massa da amostra: 10,2 mg;

Temperatura final: 900 °C;

Fluxo: 20 mL/min;

Atmosfera: Ar sintético;

Taxa de aquecimento: 10° C/min;

Cadinho de alumina;

Equipamento modelo TGA-51, marca SHIMADZU.

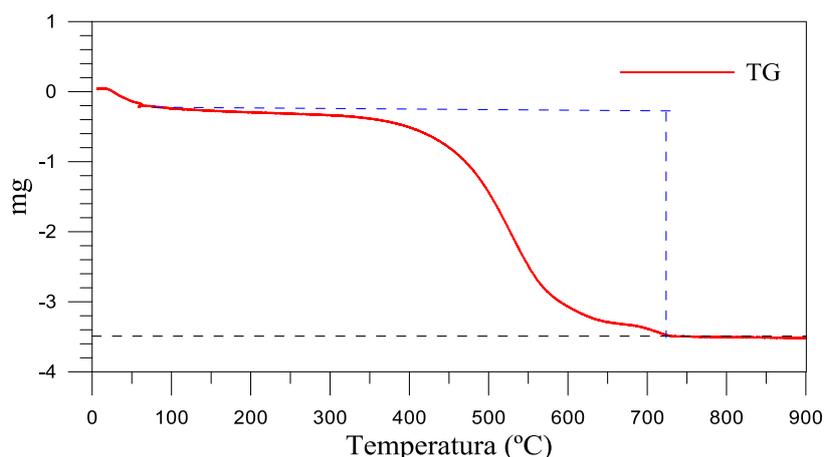


Figura 4.7 - Análise térmica das pelotas em atmosfera de ar sintético.

A análise termogravimétrica das amostras foi realizada por Melo et al.(2016) levando-se em consideração as perdas de massa da amostra durante a reação de combustão. Da Figura 4.7, pode-se observar que a secagem da amostra é realizada até uma temperatura de aproximadamente 50 °C. Entre as temperaturas (50-350) °C, observa-se uma quantidade muito pequena de massa consumida, indicando que neste intervalo de temperaturas as pelotas reagem lentamente na reação de combustão, mostrando que neste intervalo, as pelotas absorvem calor na reação, que é um fenômeno característico de uma reação endotérmica. A maior perda de massa ocorre no intervalo de temperaturas de aproximadamente (350-750) °C, pois neste intervalo, as pelotas já

absorveram calor suficiente para desencadear uma reação de combustão mais intensa e em consequência o consumo de massa é acelerado. A partir de 750 °C, a quantidade de matéria permanece constante, indicando o término da reação. Na Figura 4.7, observa-se que ao término do processo de combustão, foram consumidos aproximadamente 87% da matéria durante a combustão, conforme mostra a linha tracejada escura, inferior. Após o término da combustão, espera-se o reator de combustão esfriar e retira-se o material que após a combustão, sofreu um processo de sinterização, como ilustrado na Figura 4.8.



Figura 4.8 - Aspecto das pelotas após sofrer o processo de sinterização durante a reação de combustão.

A massa específica ou densidade absoluta das pelotas, após sofrerem o processo de combustão, foi determinada utilizando-se uma amostra de forma esférica, com um diâmetro de 8,0mm e massa de 0,2607 g, utilizando-se uma balança do laboratório de química do IFMa para pesagem da amostra. O valor da massa específica das pelotas encontra-se na Tabela. 4.6. A balança utilizada tem as características listadas abaixo. A Figura 4.9, mostra balança in locu:

Modelo - AY220;

Max - 220 g;

Min - 0,01 g;

d - 0,0001 g;

e - 0,001 g;

Tara - 100%



Figura 4.9- Balança analítica para pesagem da pelota de amostra.

4.8 - Resultado e Análises dos Experimentos

Os resultados obtidos experimentalmente através dos termopares espaçados de 100 mm, colocados axialmente ao longo do reator de combustão, foram registrados pelo aquisitor de dados (Paper Less Register) para os experimentos 1, 2, 3 e 4, conforme mostra-se nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13. A Tabela 4.6, mostra os parâmetros utilizados para a realização dos experimentos. A temperatura ambiente durante a realização dos experimentos era de 27 °C. A seguir é feita uma análise para os experimentos.

Tabela 4.6- Parâmetros utilizados para realização dos experimentos.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
Diâmetro das pelotas	4,0 - 7,93 mm	8,0 - 11mm	5,66 - 9,52 mm	10 - 13 mm
Granulometria do carvão	1,7 - 4,0 mm	4,0 - 8,0 mm	3,36 - 5,66 mm	1,70 mm - 4,0 mm
Temperaturas de Pico	1120 °C	1110 °C	1290 °C	1258 °C
Massa das pelotas	1,86 Kg (20% do leito)	1,71 Kg (20% do leito)	1,64 Kg (20% do leito)	1,80 Kg (20% do leito)
Massa de carvão	2,65 Kg (80% do leito)	2,56 Kg (80% do leito)	2,51 Kg ((80% do leito)	2,46 Kg ((80% do leito)
Massa Total	4,51 Kg	4,27Kg	4,15 Kg	4,26 Kg
Densidade do leito	328,93 Kg/m ³	311,70 Kg/m ³	302.95 Kg/m ³	311,70 Kg/m ³
Densidade das pelotas	973 Kg/m ³			
Velocidade do fluxo de ar	0,60 m/s	0,51 m/s	0,63 m/s	0,55 m/s
Diferencial de pressão	6 mmH ₂ O	6 mmH ₂ O	6 mmH ₂ O	6 mmH ₂ O
Posição do maçarico	13 mm			
Volume do reator	13724675,82 mm ³ (0,01372467582 m ³)			

As variáveis do processo para análise dos experimentos durante a evolução da combustão foram as velocidades de entrada do fluxo de ar, medida por um anemômetro, antes do início da ignição do combustível sólido, os diâmetros das pelotas que foram produzidas na betoneira e a granulometria do carvão.

Para realização dos experimentos, o reator de combustão foi preenchido com 80% de carvão vegetal cominuído, utilizado como combustível, e 20% de pelotas. Os termopares de números 1 a 7, estão localizados dentro do leito combustível, o termopar 8, é utilizado no experimento número 2, para medir a temperatura interna do fluxo de ar ao sair do reator de combustão, succionado pelo exaustor acoplado no fundo do reator, No experimento 3, utiliza-se o termopar número 8, para medir a temperatura na superfície externa da célula de combustão.

As Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, mostram os resultados para os experimentos 1, 2, 3, e 4 , respectivamente. As figuras estão dispostas em ordem decrescente da granulometria do carvão vegetal utilizado como combustível no reator de combustão. Os dados para os experimentos encontram-se na Tabela. 4.6.

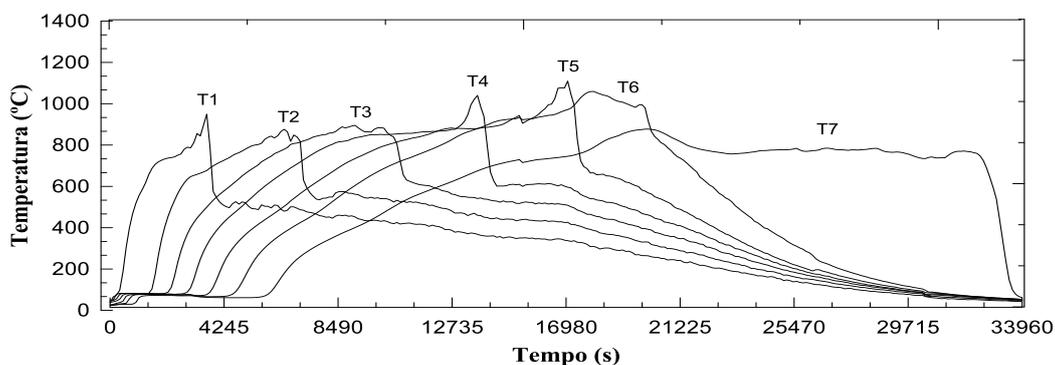


Figura 4.10 - Evolução da frente de combustão para o experimento 2.

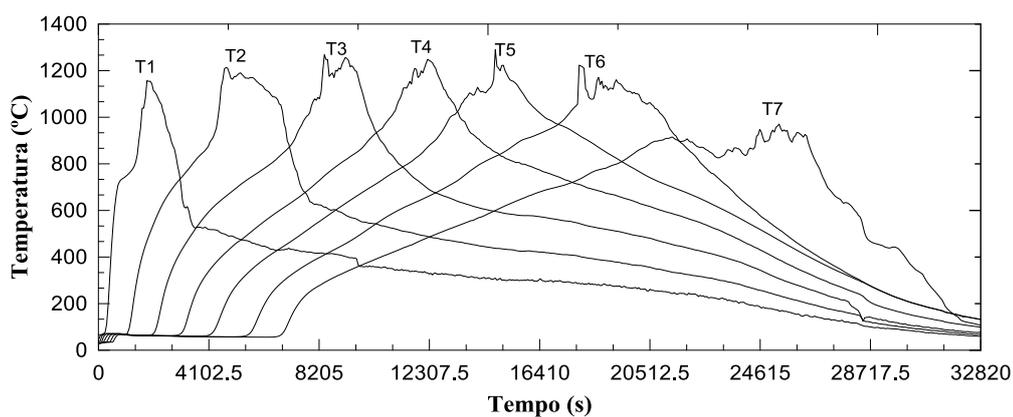


Figura 4.11 - Evolução da frente de combustão para o experimento 3.

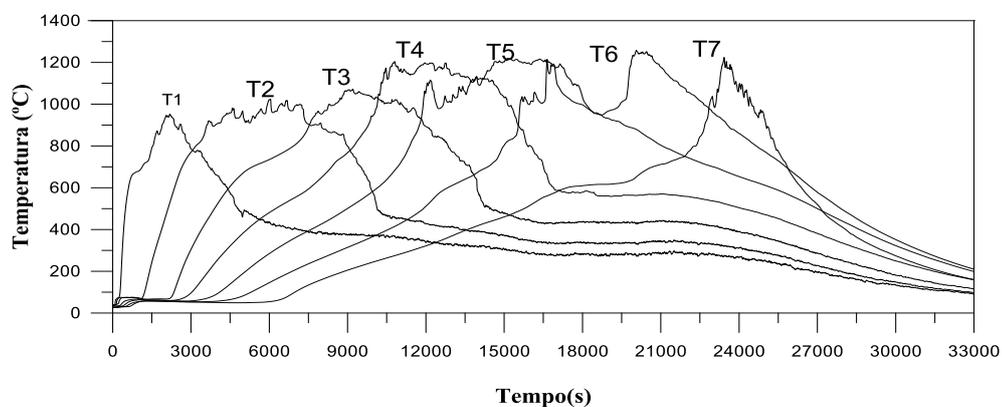


Figura 4.12 - Evolução da frente de combustão para o experimento 4.

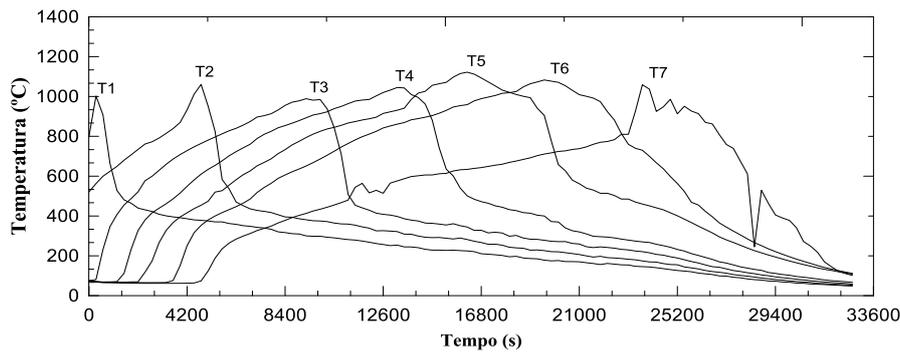


Figura 4.13 - Evolução da frente de combustão para o experimento 1.

A passagem da frente de ignição é determinada pelo histórico de temperaturas. À temperatura de aproximadamente 50 °C é retirada totalmente a umidade de 3,5% das pelotas conforme mostra o patamar de temperaturas nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12. Na Figura 4.13, este patamar de temperaturas não é registrado, mostrando que as pelotas para este experimento não continham umidade.

A granulometria do carvão para o primeiro e para o quarto experimento são iguais, variando na faixa de (1,70 mm a 4,0 mm), porém o diâmetro médio das pelotas são maiores para o quarto experimento, que apresenta um pico de temperatura de 1258 °C. Pode-se concluir, neste caso, que o tamanho dos diâmetros das pelotas influenciou diretamente nas temperaturas máximas no reator de combustão. Para estes experimentos houve um consumo de aproximadamente 74% do total de combustível que reagiu dentro do leito. Observa-se próximo à região de temperatura máxima, durante a reação de combustão, um comportamento instável da temperatura. Esta instabilidade pode ser atribuída ao efeito da acomodação das pelotas de combustíveis à medida que o carvão vegetal é consumido. A partir do ponto máximo de temperatura onde houve uma acomodação do combustível, a estrutura no leito torna-se mais estável e a evolução da temperatura torna-se mais suave.

Para o termopar de número 7, do experimento 1, Figura 4.13, houve uma queda instantânea de temperatura devido, possivelmente, ao entupimento do leito da célula de combustão, após alguns segundos houve um rearranjo do leito e a reação de combustão continuou normal até o término do experimento.

Pode ser observado que a temperatura máxima no reator de combustão permanece praticamente constante no ponto onde temperatura atinge um valor máximo, aproximadamente 1290 °C para o terceiro, Figura 4.11 e 1258 °C para o quarto experimento, Figura 4.12, onde a granulometria média do combustível sólido para estes experimentos é inferior a do experimento dois, Figura 4.10, cuja temperatura máxima registrada foi de 1110 °C, mostrando, neste caso, a influência da granulometria do combustível sólido na temperatura máxima no reator de combustão. Houve um consumo de aproximadamente 74% da massa total de combustível que reagiu dentro do leito para o terceiro experimento e um consumo de aproximadamente 76% da massa total para o quarto experimento, respectivamente. Assim como para os demais experimentos observa-se próximo à região de temperatura máxima, durante a reação de combustão, um comportamento instável da temperatura.

Observa-se que para todos experimentos, após o término da reação, a temperatura decresce rapidamente mostrando que há pouca geração de calor após a frente de reação ter sido realizada. A temperatura máxima permanece praticamente constante ao longo da amostra e somente decresce significativamente quando a frente de reação consome todo combustível. Perda de calor para o fundo da grelha pode ser apontado como a causa principal para o decréscimo desta temperatura. Fenômeno semelhante foi evidenciado por X. ZOU (1995).

Os tempos de máximas temperaturas atingidas para o experimento 3, são mostrados na Figura 4.15. Observa-se que os termopares T2, T3, T4, T5, T6 apresentam temperaturas de valores em torno de 1200 °C. Apenas o termopar de número 7, acusa uma temperatura mais baixa em torno de 900 °C; pode-se interpretar que a temperatura é mais baixa nesse ponto do reator (650 mm), devido o acúmulo de material depositado sobre o sensor do termopar, que agiria como um isolante térmico. Efeito semelhante pode ser observado no experimento 2. Estas análises foram feitas apenas para o experimento 3, devido o perfil de temperatura resultante apresentar-se bem mais definido do que o perfil de temperaturas para os experimentos 1, 2 e 4.

4.9 - Análise dos Fluxos de Velocidades do Fluido

A velocidade de propagação da frente de reação através do combustível é um dos parâmetros de estudo deste trabalho. Os valores das velocidades ajustadas para os experimentos realizados neste trabalho foi baseado em X. ZOU (1995). Uma série de resultados característicos para a propagação da velocidade em função da distância da superfície inicial do combustível é mostrada na Figura 4.14 e Tabela 4.7, para quatro velocidades diferentes de fluxo de ar correspondentes aos experimentos de números 1, 2, 3 e 4. Os valores presentes na Figura 4.14, correspondem a uma temperatura inicial do ar de 27 °C, o carvão vegetal é usado como combustível. A seguinte descrição é baseada nestes resultados específicos, mas concorda muito bem com outros combustíveis. É importante observar que as propagações de velocidades não são constantes ao longo do reator e uma análise das variações dos fluxos dessas velocidades são feitas em seguida.

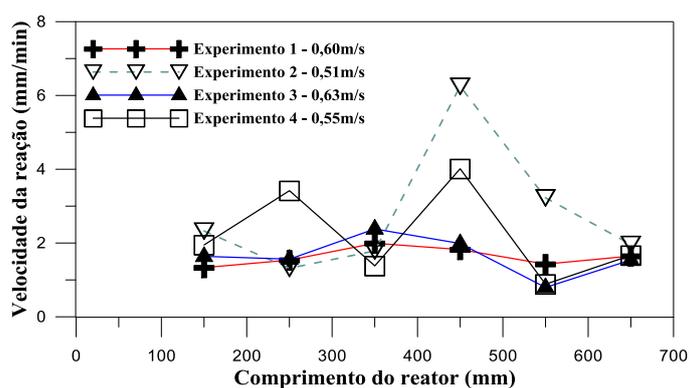


Figura 4.14 - Perfil de velocidades ao longo do reator para os experimentos 1,2,3, 4.

A Tabela 4.7, mostra os picos de tempo e os valores das velocidades da frente de reação de combustão ao longo do leito para os experimentos. Os valores médio das velocidades foram determinadas para os experimentos 1, 2, 3 e 4, levando-se em consideração o momento em que a reação atinge a temperatura máxima no tempo.

Tabela 4.7 - Picos de tempo e velocidades de propagação da reação no reator.

Z (mm)	Tempo 1 (seg)	V1 (mm/min)	Tempo2 (seg)	V2 (mm/min)	Tempo3 (seg)	V3 (mm/min)	Tempo4 (seg)	V4 (mm/min)
150	4800	1,333	6540	2,326	4740	1,639	5965	1,948
250	9300	1,538	9120	1,316	8400	1,563	9045	3,419
350	13200	1,994	13680	1,786	12240	2,381	10800	1,381
450	16209	1,823	17040	6,250	14760	1,987	15145	4,013
550	19500	1,429	18000	3,226	17780	0,796	16640	0,884
650	23700	1,646	19860	1,964	25320	1,540	23425	1,665

Observa-se para o experimento número 2, que a velocidade do fluxo do comburente ao avançar da posição 350 mm para a posição 450 mm ao longo do reator de combustão, apresenta um valor bastante expressivo em relação às velocidades dos experimentos 1, 3 e 4. A ocorrência deste fenômeno pode ser explicado, possivelmente, pela existência de uma menor concentração de carvão vegetal (combustível sólido) neste intervalo em relação à concentração das pelotas, ou ainda, por um rearranjo do combustível dentro do leito. A menor concentração de carvão vegetal neste intervalo provocaria uma reação de combustão rápida e em consequência um aumento da velocidade da reação de combustão no intervalo citado. Como a temperatura registrada do experimento 4, nesta posição do reator de combustão, é de aproximadamente 1216 °C e a temperatura do experimento 2, é de aproximadamente 1109°C, pode-se concluir que a concentração do combustível sólido influencia diretamente na velocidade da frente de combustão.

Os experimentos 1 e 3, apresentam perfis de velocidades bastante semelhantes, mostrando que para estes experimentos houve uma distribuição uniforme do carvão vegetal e das pelotas. Observa-se também que as velocidades dos experimentos 1, 3 e 4 aumentam na saída do reator, pois o ar é succionado pela parte inferior do reator. Exceção é observada para o experimento 2, onde a velocidade do ar diminui na saída do reator de combustão, possivelmente por entupimento do leito devido ao excesso de pelotas que se concentraram no fundo do reator, dificultando o fluxo comburente. Pode-se observar que o experimento 4, apresenta valores de velocidades intermediários entre os experimentos 1, 2, e 3 e uma boa uniformidade na distribuição do combustível dentro do reator.

Das análises expostas acima, pode-se concluir que a distribuição uniforme do carvão vegetal e das pelotas dentro do reator é necessária para que a velocidade do fluxo da frente da reação avance suavemente sem apresentar picos muito elevados dentro do leito. Do gráfico da Figura 4.14, ainda pode-se concluir que a velocidade de propagação da frente decresce com o aumento do fluxo de ar, isto confirma a teoria que o regime do combustível é dominado pela transferência de calor da reação para o combustível que entra e o oxidante (X. ZOU, 1995).

4.10 - Evolução axial da Temperatura ao longo do Reator

4.10.1 - Perfil de Temperaturas ao longo do Reator

Para determinar-se o perfil axial de temperaturas ao longo do reator de combustão, primeiramente gerou-se o gráfico da evolução de temperaturas com o tempo, Figura 4.15. Em seguida para um determinado termopar, mantendo-se o tempo constante, conforme indicam as setas em negrito, encontram-se os valores das temperaturas dos demais termopares, em seguida, gera-se a Tabela 4.8, onde Z, representa a direção axial do reator medidas em milímetros e as temperaturas são dadas em °C. Com os resultados obtidos, o perfil axial de temperaturas ao longo do reator é plotado e ilustrado na Figura 4.16.

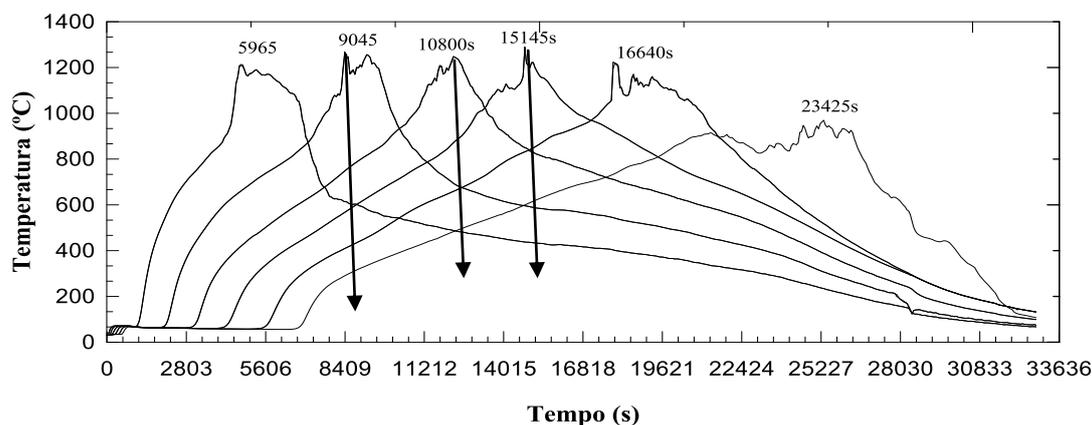


Figura 4.15 - Evolução de temperaturas axiais no reator - experimento 3.

Tabela 4.8 - Dados para geração do perfil axial de temperatura do reator de combustão.

Z (mm)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)
50	495,2	412,1	330,9	308,6	282,4
150	1217,6	617,2	488	438,9	401
250	664	1283,5	698,2	597,5	543
350	425	754,8	1248,3	851,8	711
450	212,6	570,6	868	1296,2	920,3
550	58,5	293,4	659,1	831,2	1264,3
650	58,1	291,9	482,6	599,1	882,2

Conforme a Figura 4.16, observa-se que as temperaturas máximas da frente de reação no local onde os termopares estão colocados apresentam valores praticamente uniformes em torno de 1290 °C, que é uma temperatura suficiente para a sinterização das pelotas.

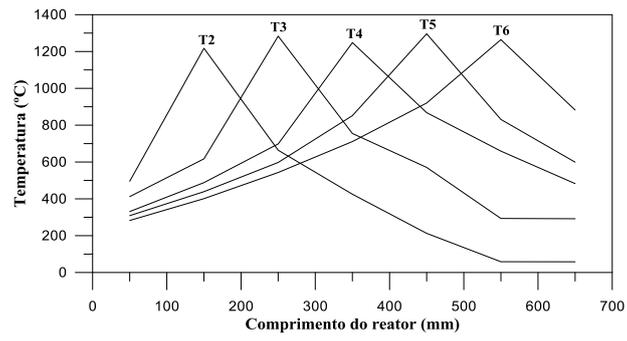


Figura 4.16 - Perfil de temperaturas ao longo do reator.

CAPÍTULO 5

MODELO NUMÉRICO

5.1 - O Princípio do Volume Médio

Um modelo matemático que expressa a transferência de calor em um meio poroso é expresso considerando-se a primeira lei da termodinâmica. Considera-se o meio isotrópico, onde os efeitos radiativos, dissipação viscosa e o trabalho realizado sobre o meio devido às variações de pressão são negligenciadas. Assume-se a hipótese do equilíbrio térmico local onde $T_s = T_f = T$, são as temperatura da fases sólido e fluido respectivamente. Assume-se, também, que a condução de calor nas fases sólidos e fluidos acontecem paralelamente, sendo assim, não há transferência líquida de calor de uma fase para outra. Considerando-se as hipóteses acima as equações que expressam o princípio de conservação da energia para o meio poroso, levando-se em consideração as fases sólida e fluido. podem ser escritas da forma à seguir:

$$(\rho C)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) + h_c (T_s - T_f) + \ddot{q}_s \quad (5.1)$$

$$(\rho C_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + \varepsilon (\rho C_p)_f \bar{V} \cdot \nabla T_f = \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) + h_c (T_f - T_s) + \ddot{q}_f \quad (5.2)$$

Utilizando-se o princípio do volume médio SLATTERRY (1967), BORIES (1989) e WHITAKER (1988), a equação para a fase sólida pode ser escrita na forma abaixo. No anexo I faz-se uma explanação generalizada do método do volume médio local.

$$(1-\varepsilon)(\rho C)_s \frac{\partial \langle T_s \rangle}{\partial t} = (1-\varepsilon) \nabla \cdot (\lambda_s \nabla \langle T_s \rangle) + (1-\varepsilon) \left[\langle \ddot{q}_s \rangle + h_c (\langle T_s \rangle - \langle T_f \rangle) \right] \quad (5.3)$$

e para fase fluido

$$\varepsilon (\rho C_p)_f \frac{\partial \langle T_f \rangle}{\partial t} + \varepsilon (\rho C_p)_f \bar{V} \cdot \nabla \langle T_f \rangle = \varepsilon \nabla \cdot (\lambda_f \nabla \langle T_f \rangle) + \varepsilon \left[\langle \ddot{q}_f \rangle + h_c (\langle T_f \rangle - \langle T_s \rangle) \right] \quad (5.4)$$

Os subscritos s e f se referem às fases sólidas e fluidas, respectivamente, C é o calor específico do sólido, C_p é o calor específico a pressão constante do fluido, λ é a condutividade térmica, e \ddot{q} [W / m³] é a produção de calor por unidade de volume.

Ao escrever as Equações (5.3) e (5.4), assumiu-se que a porosidade da superfície é igual à porosidade ε . Isto é pertinente para os termos de condução. Por exemplo, $\lambda_s \nabla \langle T_s \rangle$ é o fluxo de calor por condução através do sólido, e assim, $\nabla \cdot (\lambda_s \nabla \langle T_s \rangle)$ é a taxa de líquido de condução de calor em uma unidade de volume do sólido. Na Equação (5.3), esta aparece multiplicada pelo factor de $(1-\varepsilon)$ que é a razão entre a área da secção transversal ocupada por sólido em relação a área da secção transversal total do meio.

Os outros dois termos na Equação (5.3), também contêm o factor $(1-\varepsilon)$ porque esta é a razão do volume ocupado pelo sólido e o volume total do elemento. Na Equação (5.4), também aparece um termo convectivo devido à velocidade de percolação. Observa-se que $\bar{V} \cdot \nabla \langle T_f \rangle$ é a taxa de variação da temperatura no volume elementar devido à convecção do fluido dentro dele, de modo que este, multiplicado por $(\rho C_p)_f$, fornece a taxa de variação de energia térmica por unidade de volume de fluido devido à convecção.

Considerando-se uma a existência de um contato perfeito entre a fase sólida e a fase fluida, pode-se considerar a hipótese do equilíbrio térmico local entre as fases, ou seja:

$$\langle T_f \rangle = \langle T_s \rangle = \langle T \rangle \quad (5.5)$$

Adicionando-se as Equações (5.3) e (5.4) e utilizando-se a Equação (5.5), tem-se:

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \varepsilon (\rho C_p)_f \bar{V} \cdot \nabla \langle T \rangle = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla \langle T \rangle) + \langle \ddot{q}_{\text{eff}} \rangle \quad (5.6)$$

onde,

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} = (1-\varepsilon)(\rho C)_s + \varepsilon (\rho C_p)_f \quad (5.7)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = (1-\varepsilon)\lambda_s + \varepsilon \lambda_f \quad (5.8)$$

$$\langle \ddot{q}_{\text{eff}} \rangle = (1-\varepsilon)\langle \ddot{q}_s \rangle + \varepsilon \langle \ddot{q}_f \rangle \quad (5.9)$$

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.

5.2 - Modelo Numérico Unidimensional

O modelo matemático utilizado neste trabalho foi desenvolvido pelo “Institut de Mecanique des Fluides de Toulouse”, (LAPENE, 2007), (DEBENEST *et al.*, 2008). Resumidamente, para resolver as equações de transferência de calor e massa simultaneamente em um meio poroso reativo, neste modelo, utiliza-se a equação de Darcy. O transporte em locais de não equilíbrio térmico admitido pelo modelo leva em consideração duas temperaturas: uma para a fase gás e outra para a fase sólida.

5.2.1 - Formulação Matemática

Três hipóteses são proposta para o modelo:

1. O problema é unidimensional.

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \quad (5.10)$$

2. A porosidade é constante no tempo e no espaço.

$$\frac{\partial \varepsilon_g}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_s}{\partial t} = 0 \quad (5.11)$$

3. Considera-se o gás como gás perfeito.

Esta hipótese é considerada porque a pressão no meio poroso é de valores próximos à pressão atmosférica,então:

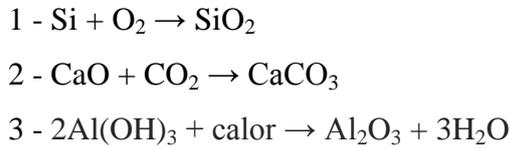
$$P = \rho_g r T, \text{ onde } r = \frac{R}{M_g} \quad (5.12)$$

Utilizando-se as hipótese acima no modelo de não equilíbrio térmico local, pode-se escrever as equações da conservação para o sistema simplificado.

5.2.2 - Equações de Conservação

Neste trabalho, levando-se em consideração Martins (2008), onde foi feita uma modelagem de transporte de calor e massa em um meio reativo poroso usando uma descrição na escala de Darcy. Transporte de calor em local de não equilíbrio foi tratado com dois modelos para o campo de temperaturas, um para a fase gás e um para fase

sólida. As reações de formação de SiO_2 e de CaCO_3 poderiam ser desencadeada durante a sinterização das pelotas. Para geração dos dados numéricos computacionais, levou-se em consideração a reação de carbonatação a qual é contemplada pelo programa. Reações, dentre outras, que poderiam ocorrer durante a sinterização das pelotas:



Composição das fases do meio:

- i) Fase sólida: Pelotas (argila, carvão vegetal e cinza volante); carvão vegetal cominuído utilizado como combustível; matéria inerte (cinza volante e argila).
- ii) Fase fluido: gases N_2 , O_2 , CO , CO_2 .

Levando-se em consideração as hipóteses mencionadas, escreve-se as equações do balanço de massa, energia e momento.

1. Balanço de Massa

- Equação da continuidade para fase gasosa

$$\epsilon_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_g v_g) = \dot{R}_g \quad (5.13)$$

- Transporte das espécies

$$\epsilon_g \frac{\partial \rho_g Y_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_g v_g Y_k) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_g D_k^* \frac{\partial Y_k}{\partial x} \right) = \dot{R}_{g,k} \quad (5.14)$$

2. Equação de Darcy, negligenciando a ação da gravidade

$$v_g = - \frac{k}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (5.15)$$

3. Equações da Energia

- Balanço de energia para fase gás

$$\epsilon_g (\rho C_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + (\rho C_p)_g v_g \frac{\partial T_g}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_g^* \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) + \Gamma_{s,g} (T_g - T_s) + \dot{Q}_g + h(T_{amb} - T_g) \quad (5.16)$$

- Balanço de energia para fase sólido

$$\epsilon_s (\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s^* \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \Gamma_{g,s} (T_s - T_g) + \dot{Q}_g + h(T_{amb} - T_s) \quad (5.17)$$

4. Equação do Gás Perfeito

$$P_g = \rho_g \frac{R}{M_g} T_g \quad (5.18)$$

A equação da pressão é obtida combinando as Eq. (5.17) e (5.18)

$$\frac{\epsilon_g \bar{M}_g}{RT_g} \frac{\partial P_g}{\partial t} - \frac{\epsilon_g \bar{M}_g}{RT_g^2} \frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{\epsilon_g \bar{M}_g}{RT_g} \frac{\partial \bar{M}_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\rho_g \frac{K}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial x} \right) = \dot{R}_g \quad (5.19)$$

Então a equação para os gases perfeitos pode ser escrita como

$$\rho_g = \frac{P_g \bar{M}_g}{RT_g} \quad (5.20)$$

5.2.3 - Condição Inicial e Condições de Contornos

Condições de contornos e iniciais em relação ao reator de combustão são formuladas em seguida.

Para a Equação (5.14)

- Condição inicial

$$\text{Em } t = 0 \text{ e } \forall x, Y_k = Y_k^{\text{amb}} \quad (5.21)$$

- Condições de contornos

Se $|Pe| < 1$ então,

$$Y_k|_{x=0} = Y_k|_{x=L} = Y_k^{\text{amb}} \quad (5.22)$$

Se $|Pe| > 1$ e $v_g > 0$ então,

$$Y_k|_{x=0} = Y_k^{\text{amb}} \text{ em } x = L \quad (5.23)$$

- Condições de Dankwerts.

Se $|\text{Pe}| > 1$ e $v_g < 0$ então,

em $x = 0$, condição Dankwerts

$$Y_k \Big|_{x=L} = Y_k^{\text{amb}} \quad (5.24)$$

com

$$Y_k^{\text{amb}} = Y_{N_2} \text{ no ar ambiente}$$

Y_{O_2} em ar ambiente

Para a Equação (5.15)

- Condição inicial

$$\text{Em } t = 0 \text{ e } \forall x, v_g = 0 \quad (5.25)$$

- Condições de contornos

$$v_g \Big|_{x=0} = v_e^* \quad (5.26)$$

$$v_g \Big|_{x=L} = - \frac{k}{\mu_g} \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=L} \quad (5.27)$$

onde, v_e^* é a velocidade de entrada diretamente ligada com o fluxo de entrada v_{e_g} .

Para a Equação (5.16)

- Condição inicial

Em $t = 0$ e $\forall x$,

$$T_g = T_g^{\text{amb}} \quad (5.28)$$

- Condições de contornos

Se $|\text{Pe}| < 1$ então,

$$T_g|_{x=0} = T_g|_{x=L} = T_g^{\text{amb}} \quad (5.29)$$

Se $|\text{Pe}| > 1$ e $v_g > 0$ então,

$$T_g|_{x=0} = T_g^{\text{amb}} \quad (5.30)$$

em $x = L$, Condições de Dankwerts

$$\text{Se } |\text{Pe}| > 1 \text{ e } v_g < 0 \text{ então,} \quad (5.31)$$

$$\text{em } x = 0, \text{ Condições de Dankwerts} \quad (5.32)$$

e em

$$T_g|_{x=L} = T_g^{\text{amb}} \quad (5.33)$$

Para a Equação (5.17)

- Condição inicial

$$\begin{aligned} \text{Em } t = 0 \text{ e } \forall x, \\ T_s = T_s^{\text{amb}} \end{aligned} \quad (5.34)$$

- Condições de contornos

$$\text{Se } t < t_{ig} \text{ então,} \quad (5.35)$$

$$-\lambda_s^* \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=0} = \Phi_{\text{rad}} \quad (5.36)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (5.37)$$

senão,

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (5.38)$$

t_{ig} é o tempo de duração de ignição

Para a Equação (5.19)

- Condição inicial

$$\text{Em } t = 0 \text{ e } \forall x, P_g = P^{amb} \quad (5.39)$$

- Condições de contornos

$$\left. \frac{\varepsilon_g \bar{M}_g}{RT_g} \frac{\partial P_g}{\partial t} \right|_{x=0} - \left. \frac{\varepsilon_g \bar{M}_g}{RT_g^2} \frac{\partial T_g}{\partial t} \right|_{x=0} \left. \frac{\varepsilon_g \bar{M}_g}{RT_g} \frac{\partial \bar{M}_g}{\partial t} \right|_{x=0} + \left. \frac{\partial}{\partial x} (-\rho_g v_g) \right|_{x=0} = \dot{R}_g \quad (5.40)$$

$$P_g|_{x=L} = P^{amb} \quad (5.41)$$

Para a Equação (5.20)

- Condição inicial

$$\text{Em } t = 0 \text{ e } \forall x, \rho_g = \rho^{amb} \quad (5.42)$$

- Condições de contornos

$$\rho_g|_{x=0} = \frac{P_g|_{x=0} \bar{M}_g}{T_g|_{x=0} R} \quad (5.43)$$

$$\rho_g|_{x=L} = \frac{P_g|_{x=L} \bar{M}_g}{T_g|_{x=L} R} \quad (5.44)$$

ρ^{amb} densidade do ar à temperatura ambiente

5.2.4 - Dados Empíricos

Diversas variáveis físicas foram determinadas por leis empíricas mostradas em seguida.

Viscosidade dinâmica da mistura de gás:

$$\mu_g = \frac{1.458 \times 10^{-6} \times T_g^{3/2}}{110.4 + T_g} \quad (5.45)$$

Capacidade calorífica dos gases:

$$C_{pg,N_2} = 4.1868 \times 16 \times \left(6.76 + 0.606 \times 10^{-3} \times T_g + 0.13 \times 10^{-6} \times T_g^2 \right) \quad (5.46)$$

$$C_{pg,O_2} = 4.1868 \times 36 \times \left(8.27 + 0.258 \times 10^{-3} \times T_g - \frac{1.877 \times 10^5}{T_g^2} \right) \quad (5.47)$$

$$C_{pg,CO} = 4.1868 \times 28 \times \left(6.60 + 1.2 \times 10^{-3} \times T_g \right) \quad (5.48)$$

$$C_{pg,CO_2} = 4.1868 \times 44 \times \left(7.70 + 5.3 \times 10^{-3} \times T_g - 0.83 \times 10^{-6} \times T_g^2 \right) \quad (5.49)$$

Condutividade térmica dos gases:

$$\lambda_{g,N_2} = \frac{3,33143 \times 10^{-4} \times T_g^{0.7722}}{1 + \frac{16.32}{T_g} + \frac{373.72}{T_g^2}} \quad (5.50)$$

$$\lambda_{g,O_2} = \frac{4.4994 \times 10^{-4} \times T_g^{0.7456}}{1 + \frac{56.699}{T_g}} \quad (5.51)$$

$$\lambda_{g,CO} = \frac{5.9882 \times 10^{-4} \times T_g^{0.6863}}{1 + \frac{57.13}{T_g} + \frac{501.92}{T_g^2}} \quad (5.52)$$

$$\lambda_{g,CO_2} = \frac{3.69 \times T_g^{-0.3838}}{1 + \frac{964}{T_g} + \frac{1.86 \times 10^6}{T_g^2}} \quad (5.53)$$

Coeficiente de transmissão de calor:

$$\Gamma_{s,g} = A_{factor} \frac{\lambda_g}{d_p} \left(2 + 1.1 Re^{0.6} Pr^{1/3} \right) = A_{factor} \lambda_g^* \frac{\lambda_g}{d_p} \left(2 + 1.1 \left(\frac{\rho_g v_g d_p}{\mu} \right)^{0.6} \left(\frac{\mu C_{pg}}{\lambda_g} \right)^{1/3} \right) \quad (5.54)$$

Cálculo das variáveis globais calculadas para as espécies:

$$C_{pg} = \sum_k Y_k C_{pg,k} \quad (5.55)$$

$$\lambda_g = \frac{\sum_{i=1}^{nbgas} X_i \lambda_{g,i}}{\sum_j X_j A_{i,j}} \quad (5.56)$$

$$A_{i,j} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\lambda_{g,i}}{\lambda_{g,j}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{g,i}}{M_{g,j}} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[8 \left(1 + \frac{M_{g,i}}{M_{g,j}} \right) \right]^{1/2}} \quad (5.57)$$

Onde $A_{i,j}$ é um factor que tem em conta no cálculo do λ_g , $nbgaz$ é o número de espécies gasosas, X_i representa a fração molar da espécie i . As expressões do coeficiente macroscópico são:

$$\lambda_g^* = \varepsilon_g \lambda_g \quad (5.58)$$

$$\lambda_s^* = \varepsilon_s \lambda_s \quad (5.59)$$

5.2.5 - Integração Numérica Unidimensional

Utilizou-se o método do volume finito ou método do volume de controle para a discretização das equações diferenciais. Primeiramente é resolvido os termos de transporte de massa e energia utilizando-se o esquema de volume finito. A biblioteca do programa LSODES FORTRAN foi utilizado para resolver os sistemas de equações de EDO's (HINDMARSH, 1993).

A Figura 5.1, mostra o esquematicamente o reator de combustão utilizado na simulação numérica. As condições de contornos e iniciais são mostradas no item 5.2.3, conforme MARTINS (2008). Na Figura 5.1, P representa um ponto nodal. N e S representam os pontos nodais ao norte e ao sul de P. Os pontos n e s representam as faces do volume de controle a nordeste e a sudeste respectivamente.

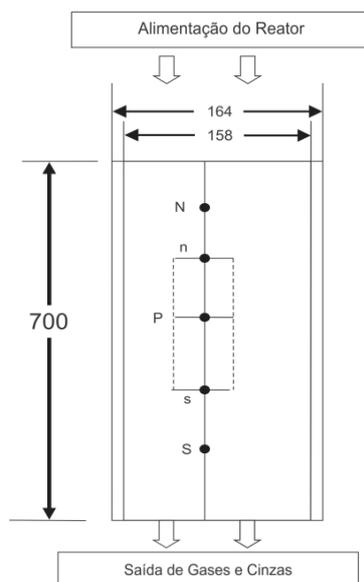


Figura 5.1- Representação esquemática do reator de combustão usado na simulação.

5.3 - Resultado Modelo Numérico

A Figura 5.2, mostra o perfil de temperaturas obtido numericamente com o programa computacional utilizado neste trabalho.

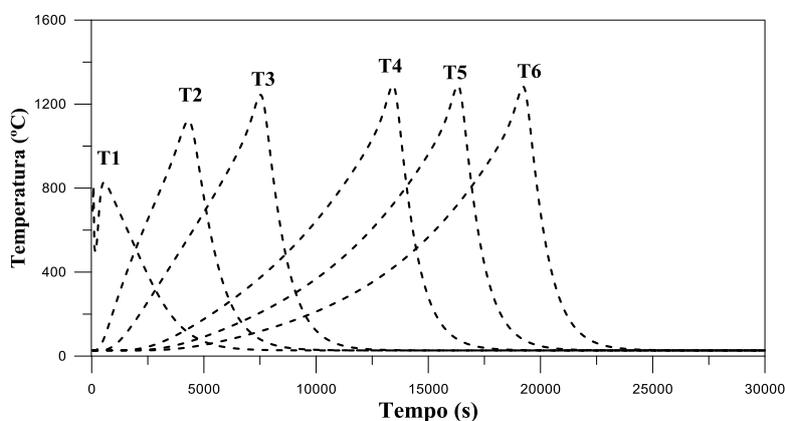


Figura 5.2 - Evolução de temperaturas obtido numericamente.

Os dados de entrada para o código computacional foram apresentados no CILAMCE 2015 por MELO et al. (2015), conforme tabela abaixo:

Tabela 5.1 - Dados de entrada para o modelo computacional.

Temperatura ambiente	300 K
Pressão atmosférica	1.013×10^5 Pa
Comprimento do reator	700 mm
Numero de noz	700
Passo no tempo	0.005 s
Tempo do experimento	33000 s
Massa específica das pelotas	973 Kg/m ³
Velocidade do ar de entrada	0.00101 m/s
Porosidade do leito	0.51
Difusividade Térmica	1.0×10^{-6} m ² /s
Permeabilidade	2.55×10^{-14} m ²
Superfície específica do combustível	3600 m ⁻¹
Diâmetro das Pelotas	9.51×10^{-3} m
Fração mássica inicial do combustível	0.3100
Fração mássica de matéria inerte	0.6550
Fração mássica inicial de vapor de água	0.03500

5.4 - Análise Comparativa entre o Resultado Experimental e o Numérico

Análise comparativa entre o resultado experimental e o numérico é feita levando-se em consideração o experimento três da Figura 4.11. Uma sobreposição gráfica para o resultado numérico e o resultado experimental é mostrada na Figura 5.3.

Observa-se que para o resultado numérico e para o resultado experimental as taxas de aumento da temperatura têm uma boa concordância em grande parte do tempo. Após a frente de combustão atingir o valor máximo nos termopares 1,2,3,4. 5 e 6 , observa-se que a queda de temperatura é mais lenta para o resultado experimental . Uma explicação para que as diferenças nos decréscimos de temperaturas entre o resultado numérico e o experimental aconteçam é que no resultado experimental, no reator de combustão, após a frente atingir um valor máximo, as temperaturas continuam elevadas devido ao calor remanescente da frente de combustão.

Para o termopar 1, verifica-se uma diferença de temperaturas entre o resultado experimental e o resultado numérico, pois, para a realização deste trabalho, o reator de combustão foi completamente preenchido com as pelotas e combustível sólido, ficando, desta forma, o termopar 1, distante 50 mm do topo do reator de combustão onde começa a ignição do combustível a uma temperatura de 700 °C, aproximadamente. A temperatura da frente de reação aumenta gradativamente até atingir um valor de pico em torno de 1190 °C, no instante que alcança o termopar 1, que fica a uma distância de 50mm do topo do reator. Foram ajustados parâmetros como porosidade, difusividade, massa específica, velocidade de propagação da reação e tempo de ignição para entrada no modelo numérico.

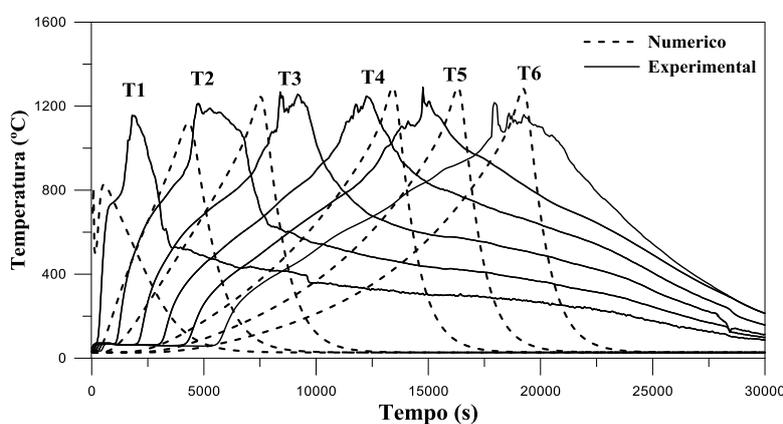
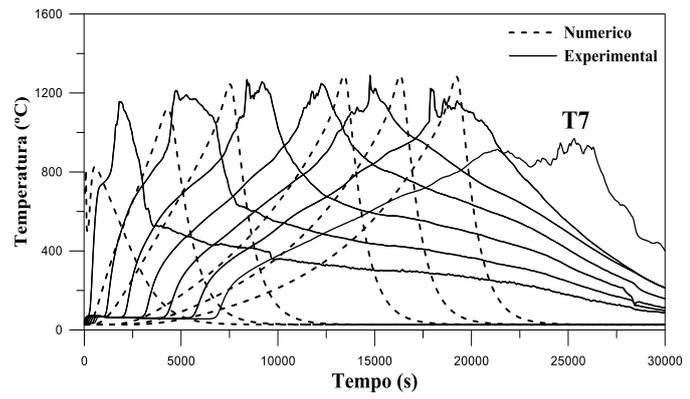


Figura 5.3 - Evolução de temperaturas numérico e experimental.

Para o termopar 7, verifica-se uma maior discrepância entre as temperaturas dos resultados numéricos e as temperaturas dos resultados experimentais, o acúmulo de materiais sobre o sensor do termopar poderia agir como um isolante térmico, mantendo a temperatura em torno de 900 °C, durante, aproximadamente 6000 segundos, para em seguida a temperatura começar a diminuir, (MELO *et al.*, 2015). Conforme mostra a Figura 5.4.



(a)



(b)

Figura 5.4 - (a) Acúmulo de pelotas sobre o termopar 7; (b) Análise da frente de combustão para termopar 7.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 - Conclusões

O experimento quatro com maiores diâmetros das pelotas e uma menor granulometria do carvão, apresentou maiores picos de temperaturas em relação ao experimento um, mostrando, deste modo, a influência da variação dos diâmetros das pelotas para obter-se maiores temperaturas durante a reação de combustão.

O experimento três com menor granulometria do carvão, apresenta uma temperatura superior à temperatura do experimento dois, que apresenta maiores diâmetros das pelotas, mostrando, neste caso, a influência da variação granulométrica do carvão.

Para o experimento três, nos pontos de pico de temperaturas máximas, as oscilações de temperaturas foram bem menos intensa do que as oscilações emitidas pelos demais experimentos. Uma explicação para a verificação destes fenômenos é que, possivelmente, para o experimento três houve uma melhor distribuição do combustível sólido dentro da célula de combustão em relação aos demais experimentos.

Conforme os fluxos de velocidades do fluido, pode-se concluir que a distribuição uniforme do carvão vegetal e das pelotas dentro do reator é necessária para que a velocidade do fluxo da frente da reação avance suavemente sem apresentar picos muitos elevados dentro do leito.

O código computacional utilizado para comparação com os resultados experimentais, apresenta um resultado bastante coerente com os experimentos realizados no reator de combustão, porém após a frente de combustão atingir a temperatura de pico e começar a decrescer, observa-se que existe uma discrepância bastante acentuada entre resultado numérico e o resultado experimental.

6.2 - Sugestões

Aplicar a técnica da transformada integral (GITT) para fazer uma comparação numérica com os resultados obtidos numericamente neste trabalho.

Fazer um incremento no código computacional de tal forma que a temperatura após o pico de combustão diminua de maneira mais suave (lentamente).

Fazer um incremento no código computacional com o objetivo de detectar o período de desumidificação das amostras.

Realizar o experimento num reator de combustão, distribuindo o combustível sólido e as pelotas em camadas bem definidas com a finalidade de obter-se curvas mais bem definidas e menos instáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARCELLOS, D. C., 2007, *Caracterização do Carvão Vegetal Através do Uso de espectroscopia no Infravermelho Próximo*,. 140p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, MG.
- BEAR, J., 2013, *Dynamics of fluids in porous media*. [S.l.]: Courier Corporation.
- BEGONHA, A.J.S., 1997, *Meteorização do granito e Deterioração da Pedra em Monumentos e Edifícios da Cidade de Porto*. Tese de Doutorado. Universidade do Minho.
- BEJAN, A., NIELD A., 2006, *Convection in Porous Media*, Third Edition, New York, Springer.
- BEJAN, ADRIAN., A.NIELD., DONALD., 2013, *Convection in Porous Media*, Fourth Edition, New York, Springer.
- BORIES, SERGE., PRAT, MARC., ca.1989, "Transferts de Chaleur dans les Milieux Poreux", Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse.
- BORMAN, G. L., 1998, *Combustion Engineering*. WCB/McGrawHill.
- BRITO, J. O., 1990, "Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira", *Documentos florestais*, v. 9. p. 1-19.
- CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO, 2008, *Carvão Vegetal. Aspectos Técnicos, Sociais, Ambientais e econômicos*. IEE/USP.
- CLARKE, G. M., 1985, "Argilas Modificadas por Tratamento Químico". *Industrial Minerals*, v. 25.
- CLIFFORD K. HO AND STEPHEN W. WEBB., 2006, *Gas Transport in Porous Media*. Springer.
- DONGHOON, SHIN., SANGMIN, CHOI., 2000, "The Combustion of Simulated Waste Particles in a Fixed Bed". *Combustion and Flame* 121:167–180 . Elsevier Science Inc.
- DOS SANTOS, D. H., 2011, *Utilização do rejeito do processo bayer como matéria-prima na produção de agregados leves*, Dissertação de mestrado , UFPa.
- FERREIRA, O.C., 2000, Emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo do carvão vegetal.

- GUGGENHEIM E MARTIN., 1995, "Comment on: definition of clay and clay mineral: joint report of the AIPEA nomenclature and CMS Nomenclature Committees", *Clays and Clay Minerals*, Vol. 44, No. 5, 710-712, 1996.
- HINDMARSH, A. C., RADHAKRISHNAN, K., 1993, *Description and Use of LSODE, the Livermore Solver for Ordinary Differential Equations*. NASA Ref. Publ. 1327, Report UCRL-ID-113855. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- KAVIANY, M., 1991, *Principles of heat transfer in porous media*. Springer Verlag.
- LAPENE, DEBENEST G., QUINTARD M., MARTINS M.F., SALVADOR, S., 2008, "Numerical Simulation of Combustion in Reactive Porous Media", *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)* Vol.12, ISSN 1970-8734.
- LAPENE, MARTINS, M. F., DEBENEST, G., SALVADOR S., QUINTARD, M., 2007, *Numerical simulation of oil shale combustion in a fixed bed: modelling and chemical aspects*. Seminarios EURO THERM. Reactive Heat Transfer in Porous Media - Ecole des Mines d'Albi (France). N° 81.
- LEPAGE, ENNIO SILVA., *et al.*, 1986, *Manual de preservação de madeiras*. Vol. 1. São Paulo: IPT., 342 p.
- MACÊDO, E. N., 1998, *Simulação Computacional e Estimativa de Propriedades Termofísicas na Combustão de Troncos Cilíndricos de Madeira*. Tese de Doutorado), UFRJ.
- MARTINS, M.F., 2008, *The structure of a combustion front propagating in a fixed bed of crushed oil shale: co-current configuration*. These-Doctorat de L' Université de TOULOUSE.
- MEIRA, J.M.L., 2001, *Argilas: o que são, suas propriedades e classificações*. Comunicações Técnicas. Visa Consultoras.
- Melo, A. O., Macêdo, E.N., Quaresma, D., Sousa, J.A.S., Neves, A., Martins, M.F., 2016, "Sintering of Pellets, Compound by Fly Ash, Clay and Charcoal in a fixed Bed Combustion Reactor", *Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA)*, vol. 6, no 2.
- MELO, A. O., MACÊDO, E. N., MARTINS, M. F., *et al.*, 2015, "Computational and experimental combustion analysis of porous media in a fixed bed combustion reactor". *Proceedings of the XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Paper Code CILAMCE2015-0491, Rio de Janeiro, Brazil, 22-25 November, 2015. ISSN 2178-4949.

- MILLER, G.T., SPOOLMAN, S., 2009, *Living in the environment: principles, connections and solutions*. 16^a ed. Belmont: Brooks/Cole, 353p.
- MONHOL, F., ARTHUR, F., PRETTI, J., 2013, *Concepção e calibração de uma célula de combustão minuciosamente instrumentada para a análise da conversão de resíduos sólidos como fonte alternativa de energia*. Monografia. UFES.
- MOORE, D.M.; REYNOLDS, R.C., 1997, *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. 2 ed. Oxford: Oxford University Press, 3p.
- NIELD, D. A., BEJAN A., 1999, *Convection in Porous Media*, Second Edition, Springer-Verlag NewYork, Inc., New York.
- OLIVEIRA, R., SULLIVAN K., 2012, *Modelagem e simulação do processo de resfriamento de grãos armazenados em silos graneleiros por meio das leis de conservação de energia e massa*. Tese de Doutorado. UFV.
- PLUMB, O., WHITAKER, S., 1988, "Dispersion in heterogeneous porous media : Local volume averaging and large-scale averaging", *Latin American Applied Research* 18: 71-79.
- RANKKA, K., et al., 2004, *Quick clay in Sweden. SGI Report n°45*. Linköping: Swedish Geotechnical Institute.
- REIN, G., 2009, "Smouldering Combustion Phenomena in Science and Technology", *International Review of Chemical Engineering*, Vol 1, pp 3-18,.
- REIN G., N. CLEAVER, C. ASHTON, P. PIRONI, JL. TORERO., 2008, "The Severity of Smouldering Peat Fires and Damage to the Forest Soil", *Catena* 74 (3), pp. 304-309.
- RSHAO, J., CEBECI, T., LAURENDEAU E., F. KAFYEKE., 2005, *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Springer.
- SILVA, M. L. DE G. DA., 2011, *Obtenção e caracterização de argila piauiense paligorsquita (atapulgita) organofilizada para uso em formulações cosméticas*. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Ciências Farmacêuticas, Universidade Federal do Piauí, Teresina.
- SOUZA, J. A. S., 2010, *Estudo e Avaliação do uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria-Prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil*. Tese de Doutorado. UFPA.

- SOUZA, V. M., JUNIOR, A, D., 2008, *Ativos Dermatológicos: Guia de ativos dermatológicos utilizados na farmácia de manipulação para médicos e farmacêuticos*. 5 ed. São Paulo: Pharmabooks, vol. 5.
- TANCREDI, G.A.H., 2010, *Estudos das propriedades do concreto com adição de cinza de carvão mineral de caldeiras de leito fluidizado*. Dissertação de Mestrado. UFPA.
- TORERO, J. L., KITANO, M., FERNANDES PELLO, A.C., 1993, "Opposed Flow Smoldering of Polyurethane Foam", *Combustion Science and Technology*".
- VAGHETTI, O., ALBERTO, M., 1999, *Efeitos da Cinza volante com Cinza de Casca de Arroz ou Sílica Ativa sobre a Carbonatação do Concreto de Cimento Portland*. Dissertação de mestrado., UFSM.
- VITAL, B. R., JESUS, R. M., VALENTE, O. F., 1986, "Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de Eucalyptus grandis na produção de carvão vegetal", *Revista Árvore*, 10 (2): 151-160.
- X. ZOU., J. L, TORERO., Bregon, B., 1995, On the Propagation of a Reaction Front Through a Porous Fuel in the Presence of an Opposed Forced Flow: Application to Mixtures Characteristic of Municipal Waste. Université de Poitiers - UPR. *Combust. Sci. and Tech.* 1995 Vol 110 - 111, pp. 123-146.

ANEXO I

I.1 - O Método da Média Volumétrica

O meio poroso é constituído de uma matriz sólida localmente interrompida por espaços vazios, ou poros, preenchidos por um ou mais fluidos. As propriedades físicas de um meio poroso variam pontualmente, com mudanças bruscas que ocorrem em distâncias muito pequenas. A descrição dessa estrutura é extremamente complexa, mas uma descrição “macroscópica” é possível quando se introduz o conceito de elemento representativo de volume. O método da média volumétrica consiste essencialmente em calcularmos a média das grandezas, de interesse para o sistema estudado, no Volume Elementar Representativo.

Considera-se um Volume Elementar Representativo (VER) como sendo um volume do meio poroso que seja grande o suficiente para conter elementos do meio poroso, que sejam representativos do meio como um todo, e pequeno o suficiente em comparação às dimensões do meio poroso.

O método da média volumétrica consiste em calcular-se a média das grandezas de interesse para o sistema estudado no Volume Elementar Representativo. Pretende-se com este método que as equações macroscópicas fiquem livres das flutuações associadas às pequenas escalas de comprimento, ou seja, flutuações que ocorrem na escala dos poros que espera-se não sejam observáveis macroscopicamente. A Figura I.1, apresenta um meio poroso bifásico e o respectivo volume médio local com suas respectivas dimensões identificadas abaixo:

l_p representa as dimensões dos poros

l_s representa as dimensões da fase sólida

r_0 representa o raio do volume médio local

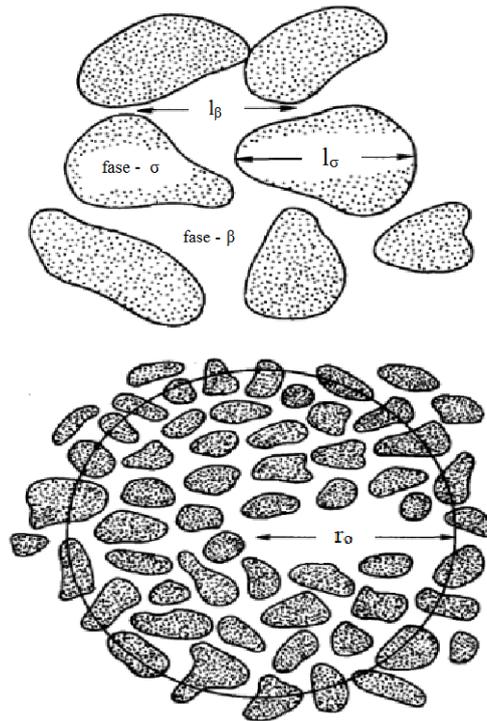


Figura I.1- Volume Médio Local. Fonte: PLUMB (1988).

Considerando-se o caso de um meio poroso bifásico constituído de uma matriz sólida σ e um fluido β define-se a média volumétrica da forma à seguir.

$$\psi_{\beta} = \frac{1}{V} \int_{V_{\beta}} \psi_{\beta} dV \quad \text{I.1}$$

onde V é o volume do VER e ψ_{β} é um a grandeza qualquer da fase sólida (β) da qual deseja-se determinar a média volumétrica. Introduzindo-se a média intrínseca à fase β tem-se,

$$\psi^{\beta} = \frac{1}{V_{\beta}} \int_{V_{\beta}} \psi dV = \frac{1}{\epsilon_{\beta}} \quad \text{I.2}$$

onde, ϵ_{β} é a porosidade ou fração volumétrica da fase β dada por

$$\epsilon_{\beta} = \frac{V_{\beta}}{V} \quad \text{I.3}$$

De acordo com WHITAKER (1968) os resultados obtidos com o processo da média volumétrica apresentam-se válidos quando satisfazem a relação abaixo:

$r_0 \gg l_{\sigma}, l_{\beta}$ e ilustrada na Figura. I.1.

O requisito garante que o tamanho selecionado para o VER remova o efeito da heterogeneidade microscópica sem eliminar o efeito da heterogeneidade macroscópica. Observar que as equações médias obtidas independem da geometria do VER.

APÊNDICE I

ARTIGOS PRODUZIDOS

I.1- Artigos Publicados em Congressos

MELO, ALVINO OLIVEIRA., MACÊDO, EMANUEL NEGRÃO., QUARESMA, DANIELLY *et al.* "Sintering of clay pellets, charcoal and fly ash in a combustion cell in fixed bed: analysis of propagation of a combustion reaction front through a porous material". *Proceedings of 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM-2015*, Paper Code COB 2015-0016, Rio de Janeiro, Brazil, 06-11 December, 2015.

MELO, ALVINO OLIVEIRA., MACÊDO, EMANUEL NEGRÃO., MARTINS, MÁRCIO FERREIRA *et al.* "Computational and experimental combustion analysis of porous media in a fixed bed combustion reactor". *Proceedings of the XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Paper Code CILAMCE2015-0491, Rio de Janeiro, Brazil, 22-25 November, 2015. ISSN 2178-4949.

D. S. QUARESMA, A. S. S. NEVES, A. O. MELO, E. N. MACÊDO, J. A. S. SOUZA, P. T. S. BEZERRA e L. F. S. PEREIRA., "Obtenção de agregado sintético por meio de sinterização em reator de leito fixo". *59º Congresso Brasileiro de Cerâmica*, Código 13-002, Barra do Coqueiro-Se, 17-20 de Maio de 2015.

D. S. QUARESMA, A. S. S. NEVES, E. N. MACÊDO., *et al.*, "Estudos preliminares de obtenção de agregado sintético a partir de biomassa em reator de leito fixo". *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. Florianópolis-SC. 19-22 de Outubro de 2014.

I.2 - Artigo Aceito em Periódico

Melo, A. O., Macêdo, E.N.; Quaresma, D., Sousa, J.A.S.; Neves, A.. Martins, M.F., 2016, "Sintering of Pellets, Compound by Fly Ash, Clay and Charcoal in a fixed Bed Combustion Reactor", *Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA)*, vol. 6, no 2.

I.3 - Artigo Submetido

Melo, Alvino Oliveira., Macêdo, Emanuel Negrão., Quaresma, Danielly *et al.* Computational and Experimental Combustion Analysis of Porous Media in a Combustion Cell.