

Obtenção de Dados Cinéticos e Difusivos para a Queima de Biomassa de Origem Moçambicana

Neli Paula Tomé

Dissertação de Mestrado Integrado

Orientador

Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho

Co-orientador

Nelson Augusto Rangel Moreira



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Porto, Julho de 2011

A distância apenas trouxe saudades, mas nunca o esquecimento. Com amor, dedico este trabalho ao Kiki, meu filho e minha fonte de inspiração.

Resumo

Neste trabalho estudou-se a queima de cargas de partículas de carvões vegetais em leito fluidizado. Foi usado um modelo baseado na teoria de fluidização em duas fases para estimar a resistência global à queima, o número de Sherwood, a constante cinética da reacção à superfície da partícula, bem como determinar a temperatura à superfie da partícula. A linha de trabalho pretendida foi a mesma que já tinha sido executada por outros trabalhos de investigação nesta área mas agora com a particularidade de se utilizar espécies vegetais de origem moçambicana.

Inicialmente foram carbonizadas à temperatura de 850 °C, numa corrente de N₂, amostras de madeira *Afzelia quanzensis* (chanfuta), *Millettia stuhlmannii* (jambirre) e *Pterocarpus angolensis* (umbila). As amostras de carvão vegetal previamente preparadas foram queimadas num leito fluidizado borbulhante. Com a finalidade de obtenção de dados cinéticos e difusivos, foram testados quatro tamanhos médios de partículas, 1,6, 2,2, 2,8 e 3,6 mm; e tamanhos entre 8,37 e 12,66 mm para determinação da temperatura das partículas.

Dos resultados obtidos constata-se que não há fragmentação relevante ao longo da combustão de modo que todas as partículas constituintes da carga apresentam tamanhos idênticos ao longo da queima, terminando de queimar em simultâneo. Dos valores da constante da taxa da reacção em fase heterogénea e da temperatura das partículas, obteve-se uma equação de Arrhenius geral para estes tipos de carvão vegetal. Observou-se que a temperatura da partícula, medida com um termopar dentro da amostra, está próxima dos valores obtidos analiticamente por recurso a um balanço energético à superfície da partícula.

Abstract

This work presents the study of particle batches combustion of wood chars in a fluidized bed. The overall combustion resistance was determined by a model based on a two-phase theory of fluidization. Sherwood number and the kinetic constant of the chemical reaction at particle surface are also determined, as well as the temperature of burning particles. The work is inserted in a line of research in biomass combustion but now with the particularity of using plant species of Mozambican origin.

Wood samples of *Azelia quanzensis*, *Millettia stuhlmannii* and *Pterocarpus angolensis* were carbonized in a flow of nitrogen at temperature of 850 °C. Thereafter the samples of vegetable chars were burned in a bubbling fluidized bed to obtain the kinetic and diffusive data. Particles with average diameters of 1.6, 2.2, 2.8 e 3.6 mm were tested in combustion experiments; in experiments to determine the temperature of burning particles, equivalent diameters of 8.37 to 12.66 mm are used.

The results show that the fragmentation phenomena are not relevant, so the number of particles is constant along de combustion process and all particles end up burning at the same time. A general Arrhenius equation for these types of charcoal was obtained based on the values of the kinetic constant and particle temperature. The temperature of particle measured with a thermocouple is close to the values obtained analytically using an energy balance at particle surface.

Agradecimentos

Não há palavras que possam exprimir a minha gratidão que dedico ao Professor Carlos Pinho pela imprescindível disponibilidade, motivação, paciência e pelas muitas horas que gastou a trabalhar comigo durante a fase dos ensaios e escrita da dissertação. Agradeço também pela sua interacção que me fez crescer a nível pessoal contribuindo de certa forma para o meu sucesso académico.

Ao Doutor Nelson Rangel agradeço pela total disponibilidade e boa disposição que teve comigo quando mais precisei e, pela sua experiência sempre apoiou e prontificou-se a dar sugestões, não deixando de perder muitas horas do seu tempo comigo quer na fase dos ensaios como na escrita da dissertação.

Agradeço também ao Professor Francisco Vasques, director do MIEM, pelo apoio prestado principalmente na fase de integração e sugestões para soluções de grande parte de problemas pessoais.

Agradeço o acolhimento proporcionado pelos colaboradores do Laboratório de combustão, em especial o Engenheiro Victor Ferreira que sempre se mostrou pronto a ajudar durante a minha estadia no Laboratório de Combustão. Ao Laboratório de Fluidos e Calor agradeço a cedência do equipamento de medição de temperatura sem se esquecer do Engenheiro Mário Guindeira que bem se destacou.

Ao Leonel Aires que com a sua vontade indomável sempre esteve presente para ajudar e dar força.

Este esforço tornou-se no que é hoje devido a duas pessoas especiais, os meus pais, e gostaria de lhes agradecer pelo apoio paternal prestado no sentido de eu conseguir alcançar os meus objectivos.

A todos digo “*Kanimambo*”.

Índice de Conteúdos

1	Propósito e Estruturação do Trabalho	1
2	Introdução	3
2.1	Situação Global de Energia.....	3
2.2	Avaliação dos Recursos de Biomassa	3
2.3	Importância da Biomassa em Moçambique	5
2.4	Caracterização de Moçambique e da Província de Maputo	8
2.5	Avaliação Potencial de Resíduos Florestais na Província de Maputo	9
2.6	Avaliação da Sustentabilidade	12
2.7	Seleção das Espécies Estudadas	13
3	Tecnologia de Aglomerados de Madeira	15
3.1	Estilhas de Madeira.....	19
3.2	Aspectos Socioeconómicos da Produção e Utilização de Peletes	20
3.3	Processos de Fabrico de Peletes de Madeira	20
4	Leito Fluidizado	23
4.1	Queima de Carvão em Leito Fluidizado	25
4.2	Mecanismos de Combustão e de Controlo da Reacção	25
4.3	Determinação da Resistência Global de Combustão pela Teoria de Fluidização em Duas Fases	28
5	Descrição Experimental	29
5.1	Descrição da Instalação	29
5.3	Separação Granulométrica	38
5.4	Caracterização das Partículas de Carvão Vegetal	38
5.5	Caracterização do Leito	39
5.7	Procedimento Experimental para os Ensaios de Queima de Partículas	41
6	Resultados dos Ensaios de Combustão	42
6.1	Ensaios de Queima de Partículas	42
6.2	Evolução da Concentração Volumica de CO ₂ nos Gases Queimados.....	43
6.3	Taxa de Recuperação de Carbono	45
6.4	Resistência à Queima	46
6.5	Dados Cinéticos e Difusivos para os Três Tipos de Carvões.....	50
7	Comparação e Avaliação dos Resultados	54
7.1	Parâmetros Cinéticos	54
7.2	Temperatura das Partículas	54
7.3	Determinação Semi-Analítica da Temperatura das Partículas.....	55
7.4	Obtenção de Parâmetros Cinéticos para os Carvões Estudados	57
7.5	Correlações Individuais.....	60
7.6	Temperatura da Partícula Obtida Experimentalmente	63
7.6.1	Procedimento Experimental para os Ensaios de Determinação da Temperatura da Partícula	63
7.6.2	Evolução da Temperatura das Partículas em Função do Tempo	65
8	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	72
	Referências	73

ANEXO A: Determinação da Resistência Global de Combustão pela Teoria de Fluidização em Duas fases	76
ANEXO B: Análise dos Carvões Estudados	79

Índice de Figuras

Figura 3.1 Peletes de madeira	15
Figura 3.2 Estilhas de madeira de uma plaina (GREENPRO, 2004).	16
Figura 3.3 Síntese da produção, consumo e comércio de peletes em 2007, (Oberberger e Thek, 2010).	17
Figura 4.1 Principais tipos de combustão de biomassa na indústria (Beça, 2011).	23
Figura 4.2 Fases de transição do leito à medida que a velocidade do fluido aumenta.	24
Figura 4.3 Partícula de carvão de diâmetro d a queimar na fase densa do leito fluidizado, Avedesian e Davidson (1973).	26
Figura 5.1 Esquema da instalação. Esquema adaptado de Marques (2007).	30
Figura 5.2 Imagem do leito fluidizado.	31
Figura 5.3 Imagem do distribuidor	32
Figura 5.4 Alimentação do gás ao leito	32
Figura 5.5 Imagem da tubeira convergente	32
Figura 5.6 Medidor de caudal de placa de orifício	33
Figura 5.7 Controlador de temperatura Eurotherm, modelo 2116	33
Figura 5.8 Leito fluidizado envolto num isolamento de fibra cerâmica	34
Figura 5.9 Termopar tipo K, em aço inoxidável AISI 316.....	35
Figura 5.10 Analisador de CO ₂	35
Figura 5.11 Analisador de O ₂	35
Figura 5.12 Placas de aquisição de dados A) PCI 1710, B) NI USB-9211	36
Figura 5.13 Amostras de: a) Umbila b) Jambirre e c) Chanfuta	37
Figura 5.14 Crivo vibratório.....	38
Figura 6.1 Evolução da concentração volúmica seca de CO ₂ ao longo da queima de partículas de carvão de chanfuta.	43
Figura 6.2 Evolução da concentração volúmica seca de CO ₂ ao longo da queima de partículas de carvão de jambirre.	44
Figura 6.3 Evolução da concentração volúmica seca de CO ₂ ao longo da queima de partículas de carvão de umbila.	45
Figura 6.4 Evolução da resistência global à queima com o diâmetro para a temperatura de 750, 820 e 900 °C, para carvão de chanfuta.	47
Figura 6.5 Evolução da resistência global à queima com o diâmetro para a temperatura de 750, 820 e 900 °C, para carvão de jambirre.	48
Figura 6.6 Evolução da resistência global à queima com o diâmetro para a temperatura de 750, 820 e 900 °C, para carvão de umbila.	49
Figura 6.7 Recta de ajuste dos valores médios instantâneos da resistência global a 50 % de queima para partículas de carvão de chanfuta.	50

Figura 6.8 Recta de ajuste dos valores médios instantâneos da resistência global a 50 % de queima para partículas de carvão de Jambirre.....	51
Figura 7.1 Transferência de energia à superfície de uma partícula de carbono a queimar em combustão incompleta à superfície.	56
Figura 7.2 Representação de Arrhenius para os três carvões	59
Figura 7.3 Representação de Arrhenius para os Carvões de Chanfuta.....	60
Figura 7.4 Representação de Arrhenius para os Carvões de Jambirre.	60
Figura 7.5 Representação de Arrhenius para Carvões de Umbila.....	61
Figura 7.6 Comparação dos valores de k_c calculados pelas correlações 7.8, 7.9, e 7.10 e experimentais para os carvões de chanfuta, jambirre e umbila.	62
Figura 7.7 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima.	66
Figura 7.8 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima.	67
Figura 7.9 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima	67
Figura 7.10 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima	68
Figura 7.12 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima	69
Figura 7.11 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima	69
Figura 7.13 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima.	70
Figura 7.14 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima.	70

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 População com acesso a electricidade em Moçambique.....	7
Tabela 2.2 Avaliação da electricidade na província de Maputo em 2004	8
Tabela 2.3 Área total ocupada por diversos tipos de vegetação na província de Maputo.	10
Tabela 2.4 Índice de valor de importância (IVI) para as maiores espécies da província de Maputo.	11
Tabela 2.5 Área total ocupada, taxas de crescimento de biomassa, resíduos florestais e do potencial de energia por tipo de floresta na província de Maputo	11
Tabela 2.6 Potencial energético por distrito na província de Maputo (Vasco e Costa, 2009)	13
Tabela 3.1 Resumo dos aspectos socioeconómicos associados à produção de peletes e sua utilização, (Oberberger e Thek, 2010)	20
Tabela 5.1 Perda de massa de duas das três espécies estudadas durante a pirólise.....	38
Tabela 5.2 Resultados obtidos na caracterização das partículas de carvão vegetal	39
Tabela 6.1 Valores do caudal volumétrico, caudal mássico e velocidade mínima de fluidização.	42
Tabela 6.2 Valores da constante cinética e número de Sherwood.	53
Tabela 7.1 Inverso da temperatura da partícula e $\ln k_c$	58
Tabela 7.2 Energia de activação e factor pré-exponencial para as três espécies no geral.	59
Tabela 7.3 Valores de desvio médio para as três amostras de carvão vegetal	63
Tabela 7.4 Massa e volume das partículas.....	64
Tabela 7.5 Valores de temperatura das partículas medidos e valores de temperaturas das partículas semi-analíticos.....	71
Tabela B.1 Análise imediata da amostra de carvão de chanfuta.	79
Tabela B.2 Propriedades físicas da amostra de carvão de chanfuta.	79
Tabela B.3 Análise imediata da amostra de carvão de jambirre.....	79
Tabela B.4 Propriedades físicas da amostra de carvão de chanfuta	79
Tabela B.5 Análise imediata da amostra de carvão de umbila	80
Tabela B.6 Propriedades físicas da amostra de carvão de chanfuta	80

Lista de Símbolos

A	Factor pré-exponencial da equação de Arrhenius, m/s
A_0	Razão entre área do distribuidor e o número de furos, m ²
$A_{sup,e}$	Área superficial da esfera, m ²
$A_{sup,p}$	Área superficial da partícula, m ²
A_t	Área da secção recta do leito, m ²
c_b	Concentração molar de oxigénio na fase de bolhas do leito, kmol/m ³
c_s	Concentração molar de oxigénio na superfície da partícula, kmol/m ³
c_O	Concentração molar de O ₂ à entrada do leito, kmol/m ³
c_{O_2}	Concentração molar de oxigénio, kmol/m ³
c_{CO_2}	Concentração molar de CO ₂ , kmol/m ³
c_H	Concentração molar de O ₂ à saída do leito, kmol/m ³
c_p	Concentração molar de O ₂ fase densa do leito, kmol/m ³
D	Diâmetro do leito, m
d	Diâmetro das partículas de carvão num determinado instante, m
d_{eb}	Diâmetro equivalente das bolhas, m
D_{ep}	Diâmetro equivalente da partícula de carvão, m
D_G	Difusividade de um gás no ar, m ² /s
d_i	Diâmetro inicial das partículas de carvão, m
d_p	Diâmetro médio das partículas de areia, m
E_a	Energia de activação, J/kmol
f	Fracção queimada
f_c	Fracção mássica de carbono numa carga
g	Aceleração da gravidade, m/s ²
H	Altura do leito, m
h	Altura no leito acima do distribuidor, m
H_{mf}	Altura do leito no regime de fluidização incipiente, m
k	Constante da taxa de consumo de O ₂ na fase densa do leito, s ⁻¹
K	Constante global da taxa de reacção, m/s
k'	Constante adimensionalizada da taxa de consumo de O ₂
k_c	Constante da taxa de reacção em fase heterogénea, m/s
k_{ci}	Constante da taxa de reacção em fase heterogénea para o ponto i , m/s
m	Massa de uma carga de carvão, kg

m_c	Massa de carbono numa carga de carvão, kg
m_{cf}	Massa de carbono consumido na fracção f , kg
$\tilde{n}$	Inverso do volume molar padrão de um gás perfeito, kmol/m ³
N	Número total de partículas presentes no leito
n	Ordem da reacção
N_c	Número de partículas de carbono/ carvão numa carga
R_o	Taxa instantânea de consumo de carbono, kmol/s
R_{o_2}	Taxa de consumo de oxigénio por unidade de volume da fase densa, kmol/m ³ s
$\bar{R}$	Constante universal dos gases perfeitos (=8314), J/kmol K
Re_p	Número de Reynolds da partícula (adimensional)
Sh	Número de Sherwood da partícula (adimensional)
T	Temperatura, °C, K
t	Tempo, s
t_f	Tempo de queima da fracção f da carga, s
T_{leito}	Temperatura do leito, °C, K
T_p	Temperatura da partícula de carvão, °C, K
t_q	Tempo de queima completa da carga, s
U	Velocidade de aproximação do ar, m/s
U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização, m/s
V	Volume da amostra de carvão, m ³
$\dot{V}_{ar}$	Caudal volúmico de ar, m ³ /s
X	Número de vezes que o volume de uma bolha é renovado durante a sua subida no leito

Letras gregas

β	Parâmetro $(1 - U_{mf}/U)$
ε	Porosidade média do leito borbulhante
ε_{mf}	Porosidade do leito nas condições mínimas de fluidização
$\emptyset$	Esfericidade das partículas de areia
$\emptyset_c$	Esfericidade das partículas de carvão
μ	Viscosidade de ar de fluidização, Pa s
ρ	Massa volúmica do ar de fluidização, kg/m ³
ρ_b	Massa volúmica do leito borbulhante, kg/m ³
ρ_c	Massa de carbono por unidade de volume da partícula, kg/m ³
$\rho_{carvão}$	Massa volúmica da partícula de carvão, kg/m ³

ρ_p	Massa volúmica das partículas de inertes, kg/m ³
ϑCO_2	Fracção molar ou volúmica de CO ₂ nos gases queimados

Abreviaturas

CLF	Combustão em Leito Fluidizado
C	Carbono
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
EUA	Estados Unidos da América
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
H	Hidrogénio
IEA	International Energy Agency
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
IVI	Índice de Valor de Importância
LFB	Leito fluidizado de regime borbulhante
LFC	Leito fluidizado circulante
MICOA	Ministry for Co-ordination of Environmental Affairs
N ₂	Azoto
O ₂	Oxigénio
PIB	Produto Interno Bruto
SO ₂	Dióxido de Enxofre
WEC	World Energy Council

1 Propósito e Estruturação do Trabalho

O propósito deste trabalho é estudar a fase da queima do resíduo sólido carbonoso de biomassa em leito fluidizado borbulhante, com vista à análise dos mecanismos de queima que ocorrem nesta fase e à obtenção de dados cinéticos e difusivos. Para efeito são usadas amostras de três espécies de biomassa de origem moçambicana. Estas espécies são as mais comercializadas em Moçambique, sendo assim, pode haver um grande interesse em aproveitar os seus subprodutos resultantes da serragem e dos ramos cortados, para fabrico de peletes, nesse caso é importante conhecer os dados cinéticos e difusivos destas espécies, pois os respectivos resíduos podem ser aproveitados para fins energéticos. Interessará certamente a Moçambique exportar estas madeiras, preferivelmente já com alguma transformação (mobiliário, por exemplo), para aumentar o seu valor comercial e será por isso expectável que a médio prazo aumente o número e a dimensão das serrações e carpintarias que as utilizem para a elaboração de produtos manufacturados. Deste modo será de esperar um aumento do serrim, serradura e aparas, que também poderão ter uma comercialização através da produção de peletes para exportação.

O estudo de vários tipos de carvões fundamenta-se na experiência adquirida ao longo de mais de 200 anos, que demonstra claramente que as características da combustão dependem fortemente do tipo de carvão usado (Field *et al.*, 1967; Oka, 2004). Assim sendo, é de todo o interesse possuir estudos sobre a queima da maior variedade possível de partículas de carbono, no sentido de se poder vir a quantificar essa variedade.

Geralmente a combustão de carvões em leito fluidizado ocorre entre os 800 e 900 °C, no presente estudo trabalhou-se com uma gama de temperaturas de (750-900 °C), cobrindo-se assim uma gama de temperaturas mais ampla de modo a permitir que os dados experimentais obtidos tivessem uma maior validade.

Numa primeira fase, efectuaram-se ensaios de queima de carvão para temperatura de 750, 820, 900 °C, com um caudal de ar de $U/U_{mf} = 1,5$, foi testada apenas uma massa de carga de 1,5 g para as quatro granulometrias das partículas ($3,15 \text{ mm} < dp < 4,00 \text{ mm}$; $2,50 \text{ mm} < dp < 3,15 \text{ mm}$; $2,00 \text{ mm} < dp < 2,50 \text{ mm}$; $1,60 \text{ mm} < dp < 2,00 \text{ mm}$). Numa fase posterior, efectuaram-se ensaios de queima de carvão para as mesmas condições de temperatura e caudal de fluidização com vista à determinação da temperatura das partículas a queimar, usando partículas isoladas com um termopar inserido.

O estudo está estruturado em 8 capítulos. Neste Capítulo 1 mostra-se o propósito e a estruturação do trabalho. No Capítulo 2 é feita uma introdução onde para além da situação global da energia fala-se da importância da biomassa em Moçambique. No Capítulo 3 descreve-se de forma resumida a tecnologia de aglomerados de madeira. Seguidamente, no Capítulo 4 é feita uma introdução ao leito fluidizado e também refere-se a teoria da fluidização em duas fases aplicada à determinação da resistência global à queima de partículas. No Capítulo 5 descreve-se a instalação experimental que serviu de base aos ensaios laboratoriais, faz-se a descrição do processo de obtenção de carvão e do procedimento experimental adoptado, seguidamente, no Capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados da queima de cargas de partículas dos três tipos de carvões, carvão de “chanfuta”, “jambirre” e “umbila”. Estas três designações adoptadas da língua Changana e Ronga, língua local de Maputo serão doravante utilizadas neste texto para se referir às espécies *Afzelia quanzensis* (chanfuta), *Millettia stuhlmannii* (jambirre) e *Pterocarpus angolensis* (umbila), estudadas neste trabalho, em jeito de homenagem à terra natal da autora do texto. Saliente-se

que dois dos nomes científicos citados, concretamente o primeiro e o terceiro, se podem constatar a grande dispersão geográfica destas espécies vegetais, pois que numa das designações aparece o termo *quanzensis*, referente ao rio Quanza ou Kuanza, que desagua no Oceano Atlântico na costa de Angola, cerca de 70 km ao sul de Luanda e a outra o termo *angolensis*, este por demais evidente quanto à indicação do território onde primeiramente a planta foi estudada e classificada. No Capítulo 7 é feita a comparação dos valores das energias de activação obtidos com os publicados na literatura. Para além das expressões que correlacionam os valores da constante cinética da reacção em fase heterogénea com a temperatura da partícula obtida pelo balanço energético para os carvões testados, faz-se a descrição experimental dos ensaios de determinação da temperatura da partícula, apresentando-se e discutindo-se os resultados obtidos neste segundo conjunto de testes. As conclusões e sugestões para futuros trabalhos são apresentadas no Capítulo 8.

2 Introdução

2.1 Situação Global de Energia

A necessidade do consumo de energia e consequentemente do acesso aos combustíveis é um dos tópicos comuns a toda a história e está relacionada a quase tudo que o Homem faz ou pretende fazer. A energia na forma útil é um elemento fundamental que influencia e limita o padrão de vida e progresso tecnológico. É sabido que os países desenvolvidos consomem mais energia *per capita* do que os países em desenvolvimento, existindo uma correlação entre padrões de vida de um país e consumo de energia, de um modo geral à medida que aumenta o consumo de energia *per capita* melhor é o padrão de vida, (Klass, 1998).

Em análise global, o fornecimento e consumo de energia apresentam um padrão irregular muito interessante que, obviamente, é mais favorável a certas regiões do mundo. Todas as fontes adequadas para produção de electricidade ocorrem naturalmente na Terra e não são equitativamente distribuídas entre as nações do mundo. Esta situação implica que os países desenvolvidos estão em melhor posição para adquirir todas as suas necessidades de energia, mesmo que estes não sejam naturalmente dotados com muitos desses recursos. Os países em desenvolvimento têm apenas duas opções: o desenvolvimento de tecnologias de conversão energéticas disponíveis localmente e a aquisição de recursos energéticos e materiais de outras nações. A realização de uma ou ambas as opções requer combinação de boa gestão de recursos e economia forte, que são escassas nos países em desenvolvimento. Como resultado disto, mais de dois mil milhões de pessoas no mundo não tem acesso a electricidade e a maior parte está nos países em desenvolvimento (Otieno e Awange, 2006).

Estima-se que o continente Africano é habitado por mais de 700 milhões de pessoas que constituem 12 % da população mundial, mas que apenas 2 % consome a electricidade produzida no mundo. Quase todos os combustíveis fósseis ou fontes renováveis de energia em África são subutilizados, devido a problemas económicos, restrições técnicas e ambientais (WEC, 2010).

Porque a energia vai de mãos dadas com o desenvolvimento (WEC, 2010), em geral e em termos globais, o nível de desenvolvimento industrial e económico de um país determinam a fonte predominante da energia consumida. Grande parte da energia utilizada no mundo hoje provém de fontes esgotáveis que gradualmente se tornam escassas, enquanto a taxa de consumo energético está a aumentar. Mais de 50 % da energia consumida nos últimos 2000 anos, foi consumida apenas nos últimos 100 anos. Durante este período houve uma mudança significativa a partir das fontes primárias clássicas, para outras que hoje em dia já se chamam “convencionais”, em particular nos países que beneficiaram da revolução industrial. Por exemplo, em 1950 o carvão foi a principal fonte de energia mundial enquanto o petróleo ocupava o segundo lugar. Quase 20 anos depois, a contribuição do petróleo aumentou substancialmente, enquanto o carvão caiu por uma grande margem (Otieno e Awange, 2006).

2.2 Avaliação dos Recursos de Biomassa

Há muitos anos que a sobrevivência básica dos seres humanos dependia, num todo ou em parte, da disponibilidade da biomassa como fonte de produtos alimentares, alimentação de animais, materiais de construção e de energia para aquecimento e para cozinhar. Nos países em desenvolvimento muita coisa não mudou nesse sentido, mas as sociedades industriais têm

modificado e adicionado a esta lista de necessidades, especialmente para a categoria de energia, a utilização da biomassa florestal em sistemas de cogeração de calor e electricidade. Para os países industrializados a biomassa é uma fonte primária de energia de segunda classe, a biomassa foi substituída pelos combustíveis fósseis que se tornaram a fonte primária de energia de escolha para suporte de todos os seus processos de fabrico e produção. A era dos combustíveis fósseis teve um grande impacto nas civilizações, no seu desenvolvimento industrial e social. Mas como as reservas dos combustíveis fósseis se esgotarão mais cedo ou mais tarde uma vez que vão sendo consumidos, as questões ambientais relacionadas com a qualidade do ar foram sendo percebidas por cientistas e posteriormente pela sociedade como um todo, e vêm sendo directamente relacionadas com o consumo de combustíveis fósseis, perspectiva-se uma mudança a médio prazo no paradigma energético mundial. A biomassa é um dos poucos recursos naturais que pode ser utilizado para reduzir a quantidade dos gases de efeito de estufa emitida durante os processos de combustão (Klass, 1998).

Segundo El Bassam (2010), afastando-se das culturas de alimentos, a energia da biomassa tem-se tornado um dos aspectos mais dinâmicos do mercado global moderno da energia com os governos ao redor do mundo em busca da adaptação da política renovável existente e estruturas regulamentares para incentivar o desenvolvimento da biomassa para projectos de energia.

Uma das principais formas de uso de biomassa pelo homem para obtenção de energia iniciou-se com a utilização do fogo para confecção de alimentos e iluminação. O domínio do fogo permitiu ao homem a exploração dos metais, marcando novo período antropológico. A madeira foi por muito tempo a principal fonte energética para siderurgia e cerâmica. Óleos vegetais e animais também eram usados em menor escala. O grande salto no consumo de biomassa deu-se com a utilização de lenha na siderurgia, no período da revolução industrial (Mello, 2001).

Segundo IEA (2010), a energia da biomassa é produzida a partir de materiais orgânicos cultivados e colhidos para uso energético. Actualmente, a biomassa é a única fonte renovável de energia que pode ser usada por via da queima para produção de electricidade, calor e transporte, sendo que a gama de tecnologias que exploram os recursos de biomassa é muito grande e a escolha da tecnologia depende não apenas da utilização final mas também da natureza da matéria-prima da biomassa.

Quando se fala em biomassa, refere-se à energia obtida a partir da combustão directa de qualquer forma de vegetação (madeira, resíduos agrícolas, bagaço de cana, etc.). A biomassa tem uma característica única em comparação com outras fontes de energia renovável, ela pode assumir diversas formas, tais como, gases, líquidos e sólidos. Se a biomassa pode ser convertida em energia útil, o consumo dos combustíveis fósseis e a emissão dos gases de efeito de estufa seriam reduzidos. Para além disso, a utilização da biomassa poderia levar à criação de uma nova indústria da biomassa, o que ajudaria a revitalizar a agricultura e silvicultura, levando à estabilidade social, bem como ao estímulo económico (Demirbas, 2009).

Embora as autoridades do Leste de África não tenham mostrado o reconhecimento que a biomassa merece, em geral aceita-se que a biomassa desempenha um papel importante nos países em desenvolvimento, e que o seu uso não é por escolha, mas um meio de sobrevivência para as comunidades rurais pobres. Apesar da sua importância, a biomassa tem sido geralmente ignorada nas estratégias de planeamento oficial de energia e o seu uso ainda está associado a problemas ambientais, cujo impacto afecta as nações. A energia da biomassa deve assegurar que os recursos são utilizados sem consequências negativas a nível social, económico e ambiental, isto requer equilíbrio da oferta e procura da energia da biomassa. Há

no entanto uma série de opções na resolução dos problemas associados ao uso da biomassa. Desenvolvimento de uma cultura energética sensível em que a conservação de energia e os riscos de aplicação são bem compreendidos pela sociedade. Paralelamente a este desenvolvimento deve implementar-se a introdução de métodos eficientes de conversão de energia da biomassa de uma forma para outra, bem como promover a utilização de fogões melhorados (Otieno e Awange, 2006).

2.3 Importância da Biomassa em Moçambique

A biomassa é a opção de bioenergia mais importante da actualidade e deverá manter essa posição durante a primeira metade do século XXI (Demirbas (2009).

Moçambique possui abundantes recursos naturais, tais como água, terra arável cobrindo 10 diferentes zonas agroecológicas (sendo cultivadas apenas 12 %), potencial de energia hidroeléctrica (incluindo Cahora Bassa, a segunda maior barragem em África), gás e outras riquezas do subsolo. O potencial da silvicultura do País tem sido certamente subaproveitado, ao qual se adiciona um grande desperdício com as actuais práticas insustentáveis

As principais fontes de energia no País são a hidroeléctrica, biomassa, energia solar, combustíveis fósseis líquidos (gasóleo e petróleo) e o gás natural. Para reduzir a dependência dos combustíveis importados, tem sido dada grande atenção aos biocombustíveis líquidos nos últimos anos. Além disso acredita-se que os biocombustíveis podem contribuir para o desenvolvimento das zonas rurais através da utilização e comercialização dos recursos disponíveis localmente, oferecendo oportunidades de trabalho e ajudando a combater a pobreza.

Moçambique é considerado um dos Países mais pobres do mundo, apesar de ter alcançado um alto crescimento económico durante os últimos anos, cerca de 54 % da população vive abaixo da linha de pobreza. A população é estimada em cerca de 20,4 milhões com 63 % vivendo em zonas rurais (Cuvilas *et al.*, 2010). Segundo Batidzirai *et al.*, (2006) aproximadamente 80 % da força de trabalho está empregue no sector agrícola, que corresponde a cerca de 20 % do PIB. A agricultura é também a actividade principal para 95 % dos domicílios em zonas rurais.

De acordo com Brown (1997), torna-se útil estimar a biomassa para avaliar as mudanças que ocorrem na estrutura da floresta, pois mudanças da densidade de biomassa são levadas a cabo por sucessões naturais, actividades humanas e impactos naturais devido às mudanças climáticas e queimadas descontroladas. Vasco e Costa (2009) referem que umas das principais causas da degradação da floresta são os incêndios incontroláveis, apresentando estimativas indicando que 6 a 10 milhões de hectares de floresta são queimados anualmente em Moçambique. Afirmam que cerca de 90 % dos incêndios são devido às actividades humanas e os restantes 10 % a causas naturais. Neste contexto, o aproveitamento dos resíduos florestais para fins energéticos deve ser encarado não apenas como uma forma poderosa para evitar os incêndios florestais e reduzir as emissões dos gases causadores do efeito de estufa, mas também como um factor positivo que pode gerar negócios, e assim favorecer o desenvolvimento e a criação de empregos nas zonas rurais. No entanto o aproveitamento destes resíduos tem de ser feito de forma cautelosa e controlada pois a maioria dos resíduos deverão ficar na floresta dada a sua riqueza em nutrientes minerais e orgânicos. De um modo geral só se podem extrair cerca de 20 % dos resíduos. Os restantes 80 % deverão ser deixados no solo sob pena de estes empobrecerem e ficarem limitados na sua produtividade.

O consumo de energia nos países em desenvolvimento não está claramente documentado uma vez que há a tendência das pessoas em usar o que podem obter facilmente

e a baixo custo. Tanto o custo como a fonte são por isso fundamentais, tornam-se as considerações mais importantes para quem procura uma fonte energética (Otieno e Awange, 2006).

Moçambique é rico em recursos energéticos, como é o caso da energia hidroeléctrica, do gás natural e do carvão. Contudo, a exploração desses recursos para uso nacional é limitada (Cuvilas *et al.*, 2010). Essa limitação pode ser ilustrada pelo factor dominante no consumo da energia primária, que é a biomassa lenhosa, sendo esta a fonte de energia tradicional nos países em desenvolvimento, geralmente usada como fonte directa de calor para cozinhar, não fugindo Moçambique ao padrão tradicional. Segundo Siteo e Tchaúque (2007), estima-se que cerca de 80 % da energia consumida em Moçambique provém da biomassa lenhosa. A procura anual desta fonte energética foi estimada em 16 milhões de m³ por ano, o equivalente a cerca de 706 milhões de dólares anuais que o PIB não tem contabilizado.

Ao contrário de outras fontes de energia, o uso da biomassa lenhosa não requer tecnologias sofisticadas. Há vários anos e até hoje que se usam fogões a lenha não especializados, o chamado três lareiras de pedra, denominado em Maputo por *chitimi* é ainda o método de cozinhar na maioria dos domicílios rurais de África oriental. A moderna combustão da biomassa para produzir calor é uma tecnologia madura e em muitos casos competitiva com os combustíveis fósseis. Moçambique tem vindo a implementar projectos para melhorar a eficiência de produção de carvão vegetal e consumo de lenha através da introdução de fornos e fogões melhorados, conforme demonstrado na Figura 2.1.



Figura 2.1 A) Fogões melhorados (Cuvilas *et al.*, 2010) e B) Fogões melhorados (MICOA, 2003)

A electrificação em Moçambique tem-se concentrado apenas em hospitais, escolas e habitações de classe alta, sendo o acesso a energia eléctrica no País, dados de 2010, de cerca de 16 % da população, a maioria destes consumidores está na parte sul do país, segundo dados fornecidos pela Electricidade de Moçambique (Unidade de Desempenho e Gestão Empresarial). Esta percentagem mostra o grande desafio que Moçambique terá de vencer para garantir o aumento da acessibilidade à energia eléctrica da maioria da população.

Tabela 2.1 População com acesso a electricidade em Moçambique.

Indicadores de Desempenho					
	2006	2007	2008	2009	2010
Indicadores de Desempenho Energético (GWh)	2,382	2,622	3,032	3,193	3,553
Energia total facturada (GWh)	1,873	2,029	2,404	2,449	2,777
Energia total facturada	75 %	77 %	79 %	77 %	78 %
Energia facturada no território nacional (GWh)	1,375	1,506	1,734	1,934	2,197
Energia facturada território nacional	58 %	57 %	57 %	61 %	62 %
População com acesso a energia	8 %	10 %	12 %	14,3 %	16 %

Vasco e Costa (2009) referem um aumento exponencial da população mundial face aos recursos do planeta; assim tem-se realizado um intenso debate centralizado na utilização de recursos energéticos de uma maneira sustentável. Neste contexto, as florestas podem desempenhar um papel importante, podendo fornecer resíduos de biomassa que podem constituir uma importante fonte de energia. Moçambique é um País com consideráveis recursos florestais que são de especial importância para os dados sociais, económicos e ambientais do País. Cuvilas *et al.*, (2010) estimam que cerca de 78 % do território moçambicano está coberto por árvores ou outras vegetações lenhosas.

Moçambique foi identificada como umas das regiões promissoras para produção de biomassa na África Austral, devido à abundância relativa dos recursos de terra, condições ambientais favoráveis e baixa densidade populacional, e tem sido estimado numa capacidade de produzir até 6,7 EJ/ano de energia da biomassa, preenchendo os critérios básicos de sustentabilidade, tais como protecção das florestas e atender às necessidades básicas dos alimentos (Batidzirai *et al.*, 2006).

A capacidade de produção de lenha e carvão é estimada em 22 milhões de toneladas por ano. Sendo 14,8 milhões de toneladas por ano a necessidade actual de energia, constata-se um saldo positivo de 7,2 milhões de toneladas por ano (GRNB, 2008), que poderá ser exportado.

A necessidade de aumentar a segurança energética e promover o desenvolvimento, especialmente em zonas rurais, tem levado muitos países em desenvolvimento, como é o caso de Moçambique, a tomar diversas acções para desenvolvimento das infra-estruturas, bem como legislação para produção e exploração de biocombustível, devido à sua proximidade em relação ao oceano (Cuvilas *et al.*, 2010).

No entanto, há muito poucos estudos que se concentram na utilização de resíduos florestais de biomassa, ou mesmo no cultivo de biomassa dedicada, para geração de energia em Moçambique. De acordo com Vasco e Costa (2009), a província de Maputo em Moçambique foi escolhida para o estudo da avaliação de biomassa florestal para fins energéticos, por ser a região mais industrializada do país, apresentando a maior densidade

populacional, maiores necessidades energéticas, mas possuindo poucos recursos energéticos, depende em grande medida da electricidade importada da África do Sul, conforma mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Avaliação da electricidade na província de Maputo em 2004

	Energia (MWh)
Electricidade produzida na província de Maputo	10.720
Electricidade importada da África do Sul	1.364.980
Electricidade consumida na província de Maputo	739.806

O objectivo da realização deste estudo da quantificação dos resíduos florestais numa região importante de Moçambique, a província de Maputo, foi para posteriormente se fazer uma análise do potencial energético e procurar soluções para geração de energia.

2.4 Caracterização de Moçambique e da Província de Maputo

Moçambique está localizado na costa oriental da África Austral sobre o oceano Índico, com latitude entre $10^{\circ} 27' S$ e $26^{\circ} 52' S$ e longitude entre $30^{\circ} 12' E$ e $40^{\circ} 51' E$. O país tem uma área total de $799\,380\text{ km}^2$ dos quais 1,6 % são águas subterrâneas (MICOA, 2003). O clima varia entre tropical e subtropical, formado pelo Inverno seco, estação de Abril e Setembro e uma estação chuvosa de Verão entre Outubro e Março (Cuvilas *et al.*, 2010).

Moçambique faz fronteira com África do Sul, Tanzânia, Malawi, Zâmbia, Zimbabwe e Suazilândia, Figura 2.2. Em 2006, a população da província de Maputo era de 2.316.316 habitantes, o que correspondia a cerca de 11 % da população de Moçambique. Cerca de 6 % da população vivia na cidade de Maputo, e os restantes 5 % nos outros 8 municípios. Dados de 2005 indicam que a cidade de Maputo, com área de 347 km^2 , tinha uma densidade populacional de $3172\text{ habitantes/km}^2$, enquanto os restantes oito distritos apresentam uma densidade populacional média de $312\text{ habitantes/km}^2$. A procura de energia, nomeadamente a procura de electricidade, vem crescendo rapidamente, como resultado do desenvolvimento social e económico.

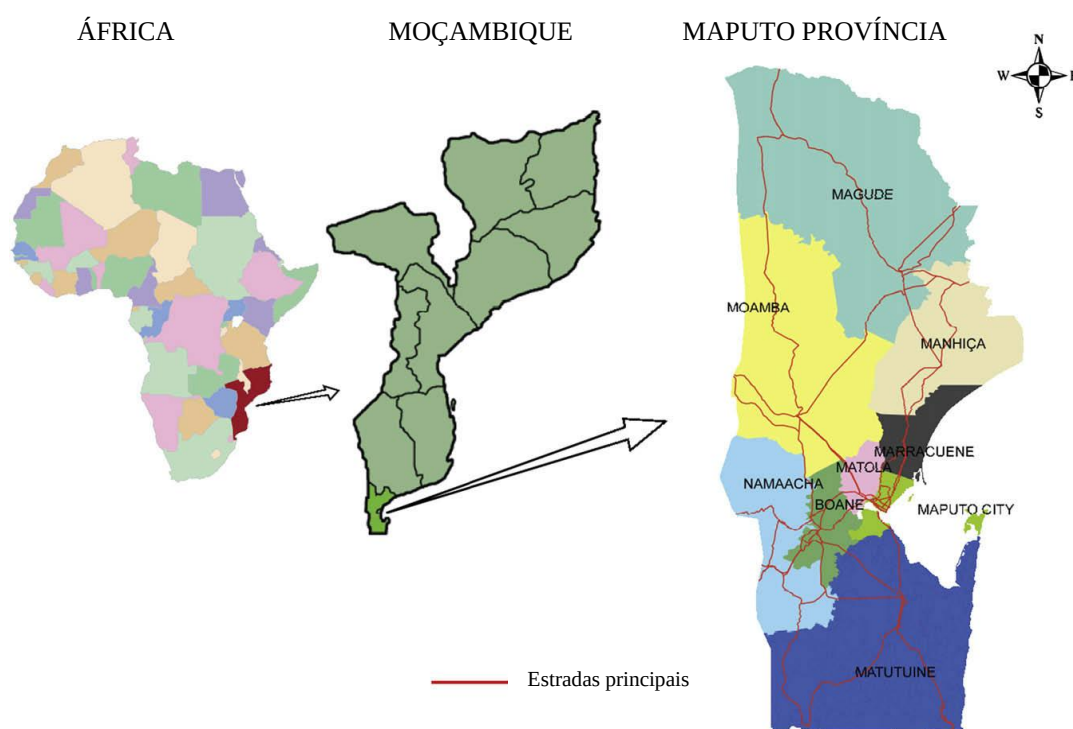


Figura 2.2 Localização geográfica de Moçambique no continente Africano e da província de Maputo, bem como a distribuição geográfica dos nove distritos da província de Maputo.

2.5 Avaliação Potencial de Resíduos Florestais na Província de Maputo

Segundo Vasco e Costa (2009), em Moçambique e particularmente na província de Maputo, podem ser encontrados diferentes tipos de florestas, assim sendo interessa conhecer as taxas de crescimento de biomassa e a área total ocupada por esses diversos tipos de florestas, Tabela 2.3, e ainda as taxas de crescimento de biomassa, Tabela 2.5.

Tabela 2.3 Área total ocupada por diversos tipos de vegetação na província de Maputo.

Tipo de vegetação	Área ocupada [ha]	[%]
Floresta densa	268.000	11,3
Floresta aberta	516.400	21,9
Mangues	5.400	0,2
Florestas aquáticas e regularmente submersas	30.600	1,3
Sub-total das florestas	820.400	34,7
Arbustos	58.800	2,5
Matos	285.400	12,1
Florestas com rotação de culturas	94.900	4,0
Sub-total de outras formações lenhosas	439.100	18,6
Pradaria	699.600	29,6
Áreas de cultivo	309.300	13,1
Áreas descampadas	50.200	2,1
Águas	43.500	1,8
Total	2.362.100	100

Da análise da Tabela 2.4 observa-se que o *Azelia quanzensis* é a espécie que apresenta o maior valor de Índice de Valor de Importância – IVI - nas florestas decíduas da província de Maputo visto estar na lista das espécies mais comercializadas em Moçambique, espécie esta que será estudada posteriormente noutra secção do trabalho presente.

Relativamente às taxas de crescimento das florestas, os dados disponíveis na literatura são escassos. Na sequência de trabalhos realizados por alguns autores, foram estimadas taxas de crescimento de florestas entre 0,1 e 2,5 m³/ha/ano para países da África Austral.

Tabela 2.4 Índice de valor de importância (IVI) para as maiores espécies da província de Maputo.

Nome da espécie	Abundância	Predomínio	Frequência	IVI
<i>Azelia quanzensis</i>	10,4	15,9	0,5	26,8
<i>Dialium schlechteri</i>	13,7	9,8	0,7	24,2
<i>Spirostachys africana</i>	3,8	4,8	0,2	8,8
<i>Albizia versicolor</i>	3,9	4,3	0,3	8,5

Tabela 2.5 Área total ocupada, taxas de crescimento de biomassa, resíduos florestais e do potencial de energia por tipo de floresta na província de Maputo

Tipo de floresta	Área (ha)	Taxa de crescimento (t/ha/ano)	Resíduos florestais (t/ano)	Potencial energético (GJ/ano)
Cultivo alternado em clareiras das florestas	28.173	0,7	19.721	276.094
Plantações de árvores e florestas	24.220	0,7	16.954	237.356
Floresta semi-decídua	115.368	1,045	120.560	1.687.840
Floresta aberta semi-decídua (cobertura de 15-65%)	451.300	1,045	471.609	6.602.526
Floresta semi-persistente	110.058	1,16	127.667	1.787.338
Áreas florestais abertas e fechadas com mudança de cultivo	87.493	1	87.493	1.224.902
Floresta de folha persistente (cobertura de 15-65 %)	32.317	1	32.317	452.438
Florestas abertas aquáticas ou regularmente alagadas	33.053	1	33.053	462.742
Matos	219.558	0,93	204.189	2.858.646
Matagais (Alturas de 2-5 m)	50.607	0,93	47.065	658.910
Mangal denso	5.007	0,98	4.907	68.698
Zonas herbáceas aquáticas ou regularmente alagadas	68.854	0,93	64.034	896.476
Zonas arbustivas aquáticas ou regularmente alagadas	4.129	0,93	3.840	53.760
Total	1.230.137		1.233.413	17.267.771

2.6 Avaliação da Sustentabilidade

O desenvolvimento sustentável pode ser definido como sendo o processo de manter a riqueza para as futuras gerações, sendo assim, cada geração deverá à posteridade, pelo menos, os mesmos recursos que herdou. El Bassam (2010) referiu que as fontes renováveis de energia oferecem ao planeta a possibilidade de reduzir as emissões de carbono, garantindo às civilizações um desenvolvimento sustentável e protecção climática.

Segundo Batidzirai *et al.*, (2006), dois critérios básicos da sustentabilidade devem ser fornecidos como pontos de partida:

- Primeiro, a concorrência entre produção de alimentos e bioenergia deve ser evitada e, portanto a produção de alimentos tem prioridade acima da produção de bioenergia;
- Segundo, a produção dedicada de espécies bioenergéticas em terrenos provenientes da desflorestação também não é sustentável devido à necessidade de grandes quantidades de fertilizantes. O suposto aumento da eficiência da produção de alimentos terá de ser realizado pela aplicação de sistema de produção agrícolas mais eficientes, com optimização geográfica da produção agrícola, ou seja, otimizar a aplicação dos solos tendo em atenção o tipo de cultura a realizar.

De acordo com WEC (2010), deverá ter-se em conta a mudança climática e a protecção ambiental, que são responsáveis por 60 % das emissões dos gases causadores do efeito de estufa e grande parte da poluição do ar urbano e regional.

De acordo com Vasco e Costa (2009), a escolha do local de plantação de biomassa devesse ter em linha de conta os seguintes requisitos:

- Preferência por áreas com alta produção de resíduos florestais;
- Preferência por áreas com boas infra-estruturas de transporte;
- Preferência por áreas com florestas desprotegidas;
- Preferência por áreas com rede eléctrica nacional.

Moçambique, tal como a maioria dos países de África, é uma vítima de queimadas descontroladas, que são geralmente causadas por práticas tradicionais amplamente utilizadas pela população rural, principalmente na época seca do ano, a fim de estabelecer novas áreas agrícolas, para obter caça e para proteger as colheitas, entre outros. As áreas com alto risco de incêndios florestais são geralmente as que se situam longe dos centros urbanos. Em 2003, Moçambique tinha cerca de 58.393 incêndios florestais, dos quais 561 ocorreram na província de Maputo, particularmente nos distritos de Magude, Moamba e Manhiça. Da mesma forma, as áreas com poucos consumidores de resíduos florestais também são as localizadas longe dos centros urbanos, nomeadamente Magude, Moamba e Matituíne. Em relação às áreas com elevada produção de resíduos florestais, verificou-se que os distritos de Moamba, Magude e Matituíne são as que melhor se adaptam a este critério, conforme mostra a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 Potencial energético por distrito na província de Maputo (Vasco e Costa, 2009)

Distritos	Resíduos florestais [t/ano]	Potencial energético [GJ/ano]
Boane	18.444	258.209
Maputo cidade	8.971	125.599
Magude	450.416	6.305.825
Manhiça	135.048	1.890.667
Marracuene	20.139	281.942
Matituíne	325.126	4.551.767
Matola	4.110	57.546
Moamba	225.936	3.163.099
Namaacha	45.223	633.116
Total	1.233.412	17.267.771

2.7 Selecção das Espécies Estudadas

Entre 120 espécies diferentes, a exploração da madeira em Moçambique é concentrada principalmente em três delas, Jambirre (*Millettia stuhlmannii*), Chanfuta (*Afzelia quanzensis*) e Umbila (*Pterocarpus angolensis*), que representam 78 % do volume total comercializado (Cuvilas *et al.*, 2010). O critério da escolha das espécies para estudo foi baseado nas três espécies acima, visto serem as mais comercializadas no país, sendo assim, pode haver um grande interesse em aproveitar os seus subprodutos resultantes da serragem e dos ramos cortados, para fabrico de peletes. Nesse caso é importante conhecer os dados cinéticos das espécies, pois os respectivos resíduos podem ser aproveitados para fins energéticos. Interessará certamente a Moçambique exportar estas madeiras, preferivelmente já com alguma transformação (mobiliário, por exemplo), para aumentar o seu valor comercial e será por isso expectável que a médio prazo aumente o número e a dimensão das serrações e carpintarias que as utilizem para a elaboração de produtos manufacturados. Deste modo será de esperar um aumento do serrim, serradura e aparas, que também poderão ter uma comercialização através da produção de peletes para exportação.

Tal como a vizinha África do Sul já pratica, pode ser interessante que Moçambique exporte peletes para países europeus, que as usam para aquecimento doméstico e alimentação de centrais térmicas. As peletes para aquecimento doméstico devem ter teores de cinzas muito baixos, inferiores ou iguais a 0,5 %, e por isso os resíduos destas madeiras de qualidade são indicados para a produção de peletes de topo de gama.

Em Portugal também se estudam as cinéticas da queima de carvalho e sobreiro, por exemplo, que são no caso do carvalho uma madeira utilizada na fabricação de mobiliário, na construção civil (pavimentos, por exemplo) e pipas e tonéis para estágio e envelhecimento de vinhos e por isso ninguém tem como primeiro objectivo a queima do carvalho. No caso do

sobreiro é deste que se tira a cortiça e novamente ninguém queima sobreiro para a produção de energia. Contudo há sempre tanto num caso como no outro a produção de resíduos lenhosos que poderão ter fins térmicos via combustão.

3 Tecnologia de Aglomerados de Madeira

As peletes, aglomerados cilíndricos de biomassa lenhosa, são consideradas combustíveis novos e robustos, usados para aquecimento central, produção de água quente sanitária e em grande escala na geração de energia eléctrica. Actualmente são os combustíveis mais negociados de biomassa sólida, são um produto à base de madeira projectado para competir com os combustíveis fósseis no que respeita o desempenho, a conveniência e o preço. As peletes constituem uma fonte inovadora de energia renovável. Se a biomassa provier de florestas geridas de forma sustentável ou de resíduos de madeira limpa, as peletes terão a particularidade de ser um combustível praticamente neutro em carbono. As peletes têm muito a oferecer à comunidade no século XXI, com o petróleo cada vez mais escasso, mais caro e mais vulnerável em termos de rede de fornecimento global, um combustível mais barato que pode ser fabricado com matéria-prima natural fornecendo uma alternativa energética muito atraente (Jenkins, 2010).

A tecnologia de peletes de madeira tem evoluído rapidamente desde o início de 1980, quando foi desenvolvida na Suécia uma forma prática e eficiente de aproveitamento de resíduos de madeira das indústrias madeiras e resíduos florestais das florestas do país. As peletes têm forma cilíndrica, geralmente entre 6-12 mm de diâmetro e 10-30 mm de comprimento, têm cor castanho-esverdeado dependendo da natureza do material constituinte conforme demonstra a Figura 3.1 (Jenkins, 2010).



Figura 3.1 Peletes de madeira

São fáceis de inflamar e em princípio produzem menor cinza quando comparadas a outros combustíveis sólidos, embora este aspecto dependa do teor em cinza da biomassa lenhosa original. Devido à forma e tamanho permitem um fluxo ideal de ar que é importante para maximizar as taxas de combustão e de consequente libertação de calor, além do que permitem um carregamento facilitado através dos mecanismos automatizados de alimentação das caldeiras. Podem ser fabricadas a partir de um grande número de diferentes materiais orgânicos e sintéticos, garantindo o controlo de qualidade sobre a fonte de combustível, teor de humidade, aditivos e os níveis de contaminação. Essas garantias são essenciais pois mantêm a confiança na qualidade das peletes, garantindo a longevidade dos equipamentos de combustão e claro estimula a satisfação dos utilizadores finais e conquista o mercado pela sua excelente tecnologia. A maioria das peletes são feitas a partir de madeira ou de resíduos de

floresta limpa, como do aproveitamento dos subprodutos das fábricas de marcenarias, serrarias e desbastes florestais bem geridos (Jenkins, 2010). A figura abaixo mostra o serrim de madeira que pode ser aproveitado das fábricas de marcenarias.



Figura 3.2 Estilhas de madeira de uma plaina (GREENPRO, 2004).

Tal como acontece com a queima de biomassa, as peletes são responsáveis pela emissão de dióxido de carbono na combustão. Quando se queima peletes os níveis de emissão de CO_2 são semelhantes às do carvão e quase o dobro das do gás natural, no entanto o balanço global das emissões de CO_2 é nulo pois este é recapturado durante o crescimento de mais biomassa que dará origem a novas peletes. Reconhecidas e respeitadas como um combustível renovável, as peletes apresentam níveis elevados de criação de emprego e a tendência é de manter em circulação a economia local, (Jenkins, 2010).

Em relação às normas técnicas de aglomerados de madeira comercializados internacionalmente, actualmente nenhuma técnica padrão é amplamente utilizada. Em geral, os aglomerados de madeira usados industrialmente para combustão combinada ou em centrais de aquecimento têm menos exigências de qualidade do que aglomerados de madeira usados em salamandras ou caldeiras domésticas. O teor de cinzas é menos crítico, as caldeiras são constituídas para lidar com grandes quantidades de cinzas, neste contexto o que mais interessa para uso em grande escala é o valor do poder calorífico inferior (Oberberger e Thek, 2010).

O fornecimento de peletes para a utilização final já está empregue em vários níveis, em muitas regiões da Europa e América do Norte. Uma visão quantitativa do consumo e produção de peletes e dos fluxos de comércio para os mercados em 2007 é mostrada na Figura 3.3. Suécia, Canadá, EUA e Alemanha produzem anualmente mais de um milhão de toneladas de peletes de madeira.

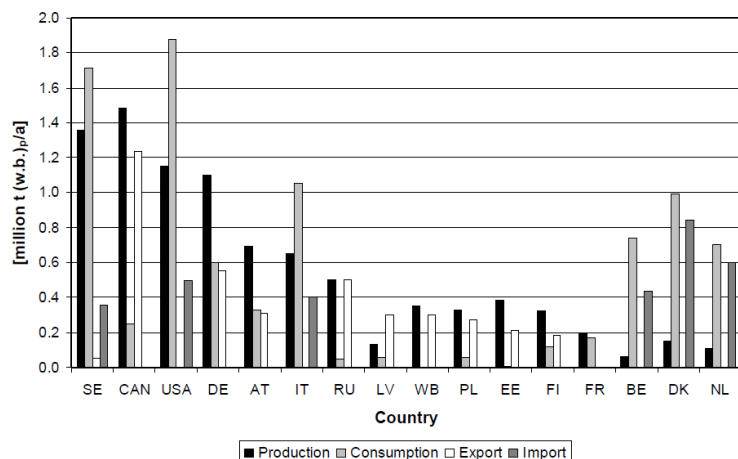


Figura 3.3 Síntese da produção, consumo e comércio de peletes em 2007, (Oberberger e Thek, 2010).

Em 2007 os maiores consumidores de peletes foram a Suécia, a Bélgica, os EUA, a Dinamarca, a Itália e a Holanda, consumindo cerca de dois terços da produção mundial de peletes. A Figura 3.4 fornece uma visão geral das rotas principais de comercialização de peletes para os períodos de 2006 a 2008. Com base na Figura 3.4, pode ser visto que as peletes são importadas ou exportadas em quase todos países da União Europeia e fora dela. Em geral, pode-se afirmar que a maior parte do comércio internacional de peletes é realizado por meio de embarcações oceânicas, de cabotagem e barcas fluviais.



Figura 3.4 Síntese das principais rotas de comercialização de pellets para Europa entre 2006 e 2008, (Obernberger e Thek, 2010).

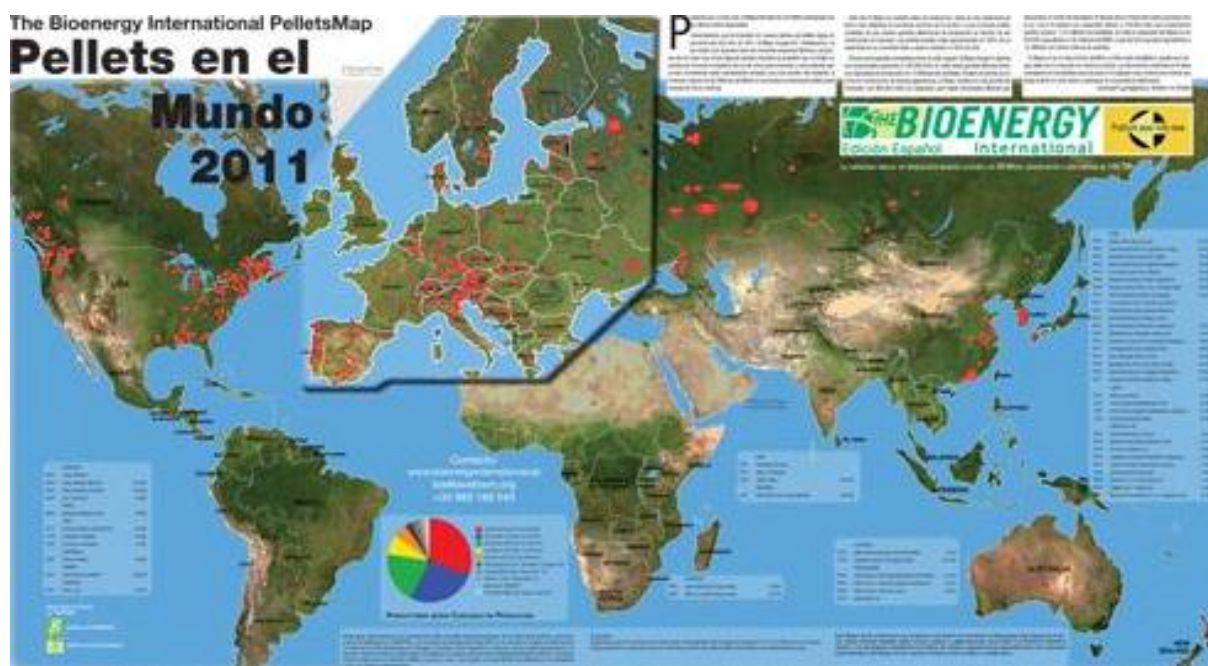


Figura 3.5 Mapa pellets (www.bioenergyinternational.es).

O mapa da Figura 3.5 apresenta os locais do mundo onde se produzem pellets. Apesar da imagem não ser muito nítida é possível observar pelos pontos a vermelho que a África do Sul exporta pellets pelo porto de Maputo, em Moçambique, para países da Europa.

3.1 Estilhas de Madeira

Teores baixos em água e grande uniformidade do tamanho nas estilhas de madeira são os requisitos essenciais para uma utilização eficaz, em sistemas de aquecimento automatizado. Em geral nas estilhas de madeira não devem existir impurezas, tais como pedras, objectos de metal ou outros materiais estranhos. Para além disso, as estilhas de madeira não devem estar muito húmidas, para que possa obter uma combustão limpa. A madeira fresca tem teor de água de 50 %, este nível é suficiente para causar problemas técnicos de combustão.

Se o teor de água das estilhas estiver abaixo dos 40 %, são classificadas como húmidas e requerem uma secagem posterior. Pode ser usado um método de secagem ao ar livre, conseguindo-se atingir um teor em água de cerca 20 % depois de várias semanas de exposição.

Considera-se estilhas de madeira de elevada qualidade, para uso em sistemas de combustão automatizados, as que não contêm ou contêm uma quantidade mínima de casca de árvore. Isto torna possível assegurar que exista uma combustão óptima, com um teor mínimo de cinzas inferior a 0,5 %.

Se as estilhas de madeira tiverem os mesmos comprimentos e não houver sobredimensionamento no comprimento do material cortado, os sistemas de combustão automatizados garantem uma operação correcta. Por outro lado, os bloqueios e a formação de aglomerados no armazenamento podem causar paragens no sistemas de combustão (GREENPRO, 2004).



Figura 3.6 Estilhas de madeira de alta qualidade.

3.2 Aspectos Socioeconómicos da Produção e Utilização de Peletes

Estudos de impactos socioeconómicos são comumente usados para avaliar os impactos locais, regionais ou nacionais da execução de decisões de desenvolvimento específico. Normalmente esses impactos são medidos em termos de variáveis económicas, tais como receitas, emprego e impostos, mas uma análise completa deve incluir também aspectos sociais, culturais e ambientais. Na realidade os estudos de impactos socioeconómicos do local são diversificados e variam de acordo com factores como a natureza da tecnologia, as estruturas económicas dos locais, os perfis sociais e processo de produção. A utilização de peletes de madeira como combustível em todas as áreas de geração de energia a partir de fogões domésticos e caldeiras para combustão combinada em centrais térmicas tem sido uma incrível história de sucesso ao longo dos últimos 20 anos. Actualmente as peletes são os mais avançados combustíveis de biomassa no que diz respeito a utilização, a Tabela 3.1 apresenta um resumo dos aspectos socioeconómicos associados à produção.

Tabela 3.1 Resumo dos aspectos socioeconómicos associados à produção de peletes e sua utilização, (Oberberger e Thek, 2010)

Dimensão	Aspecto
Aspectos sociais	• Aumento da qualidade de vida ○ Ambiente ○ Saúde ○ Educação • A coesão e a estabilidade social ○ Migrações rurais contrariando o despovoamento rural ○ Desenvolvimento regional ○ Diversificação rural ○ Redução da pobreza
Nível macro	• Redução do défice da balança comercial regional • O potencial de exportação
Do lado da procura	• Aumento da produtividade • Aumento da competitividade • Trabalho e da mobilidade da população (efeito induzido) • Melhoria da infra-estrutura
Do lado da oferta	• Emprego • Renda e riqueza • Investimento induzido • Suporte de relação das indústrias

3.3 Processos de Fabrico de Peletes de Madeira

As peletes de madeira são geralmente fabricadas a partir de subprodutos da indústria madeireira, ou seja serrações e oficinas de marcenaria, embora outras fontes, tais como recortes de espécies arbóreas e florestais sustentáveis também são viáveis. A disponibilidade das fontes variam de acordo com a região e com o país, no entanto, as serrações continuam a ser o principal fornecedor de matéria-prima para fabrico de peletes. Idealmente, a matéria-

prima deve ser adquirida localmente de forma a evitar o custo adicional e emissões de carbono associados com o transporte a longas distâncias. A matéria-prima deve ter um teor de humidade de 10 a 20 % (m/m), se a madeira for muito húmida pode proceder-se à secagem antes da peletização, enquanto o vapor de água ou até água podem ser adicionados se a madeira estiver demasiado seca para ajudar na ligação.

De acordo com Jenkins (2010), há oito etapas chaves no processo de fabrico de aglomerados de madeira:

- Armazenamento;
- Limpeza;
- Secagem;
- Moagem;
- Peletização;
- Refrigeração,
- Triagem;
- Distribuição.

Armazenamento

A matéria-prima é entregue em lotes, sendo que o processo de produção de peletes opera continuamente, por isso é essencial um sistema de armazenamento de matéria-prima para mantê-la limpa e seca.

Limpeza

A limpeza é particularmente importante para uma central de peletes que utiliza madeiras recicladas ou estilha de madeira como matéria-prima. Uma vez que é impossível remover alguns contaminantes, tais como metais pesados de madeira tratada, somente madeira limpa pode ser reciclada para produção de peletes destinadas ao uso doméstico de médio e pequena escala.

Secagem

Nem toda matéria-prima requer secagem, por exemplo a aparas pode ser usada para fabrico de peletes matéria-prima com teores de humidade até 20 %, porém o nível ideal de humidade é de cerca de 12 % ou inferior. Geralmente usam-se secadores de tambores alimentados a gás ou então usa-se cada vez mais resíduos de madeira para secagem. A secagem consome uma quantidade elevada de energia e portanto, os resíduos de madeira representam um grande desafio para a poupança no consumo energético. A utilização de resíduos de madeira como combustível não tem apenas a vantagem de ser mais barato face ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis, mas também melhora as credenciais ecológicas da produção das peletes, o que é de extrema importância quando estas são vendidas para os mercados europeus que levam em conta normas ambientais exigentes.

Moagem

Deve ser dada à matéria-prima uma consistência homogénea antes de ser introduzida na extrusora. Essa consistência pode ser obtida por diversas máquinas apropriadas, como é o caso do moinho de martelos.

Peletização

As peletes são fabricadas com base num material granulado através de uma extrusora, que é uma máquina que pressiona a matéria-prima dando às peletes a forma cilíndrica através da passagem do granulado numa matriz perfurada.

Arrefecimento e Triagem

As peletes deixam a máquina de peletização macias e quentes, sendo assim há necessidade de serem arrefecidas de forma a permitir que as resinas naturais ou outros agentes de ligação dêem a consistência mecânica adequadas às peletes recém-extrudidas. Uma vez arrefecidas, as peletes são peneiradas para retirar todas as partículas finas e desta forma garantir que o produto final está limpo e livre de poeiras.

4 Leito Fluidizado

A fluidização baseia-se fundamentalmente na circulação de sólidos juntamente com um fluido (gás ou líquido) impedindo a existência de gradientes de temperatura, de pontos muito activos ou de regiões estagnadas no leito o que proporciona também um maior contacto superficial entre sólido e fluido, favorecendo a transferência de massa e calor (Kunii e Levenspiel, 1991). A eficiência na utilização de um leito fluidizado depende em primeiro lugar do conhecimento da velocidade mínima de fluidização. Abaixo desta velocidade o leito não fluidiza e muito acima dela, os sólidos são descarregados para fora do leito.

A tecnologia de queima em leito fluidizado é considerada uma tecnologia limpa, pois as emissões poluentes são mantidas dentro dos valores aceitáveis. Esta tecnologia teve um forte desenvolvimento com as duas crises energéticas da década de 1970 (Oka, 2004), sobretudo devido às baixas temperaturas de operação (800-900 °C) e à possibilidade de retenção de SO₂, através de uso de adsorventes directamente no leito, evitando a necessidade de dispendiosos equipamentos de dessulfurização dos gases de exaustão. Trata-se de uma técnica que permite queimar combustíveis ditos de menor qualidade (por possuírem poluentes) com elevada eficiência e baixo nível de emissões poluentes.

As tecnologias de combustão de combustíveis sólidos, utilizadas à escala industrial, encontram-se genericamente distribuídas em três grandes grupos: combustão em leito fixo, combustão de sólidos circulantes e combustão em leito fluidizado (CLF).

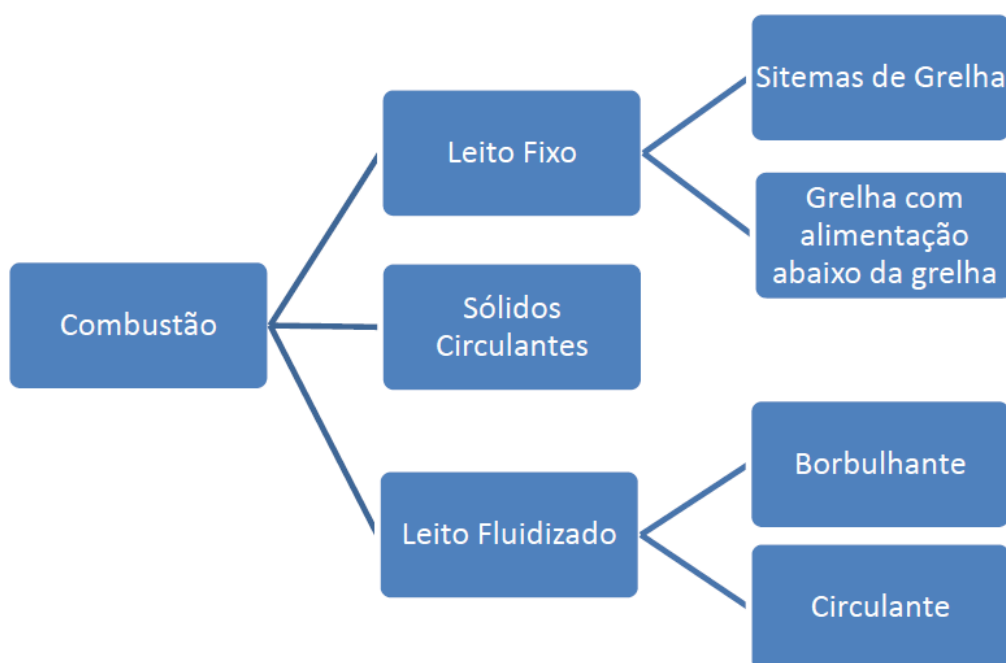


Figura 4.1 Principais tipos de combustão de biomassa na indústria (Beça, 2011).

Os sistemas de CLF baseiam-se na passagem ascendente de um fluido (gasoso) através de um leito de partículas sólidas inertes (areia), a uma velocidade que promova a sua separação e sustentação. Essa velocidade mínima a que ocorre este fenómeno chama-se

velocidade de fluidização. O tipo de partículas, a formação de fases distintas e a ordem de grandeza a que o gás é introduzido em diferentes sistemas, confere aos respectivos regimes de fluidização características próprias. Estes regimes em leitos de partículas inertes, de um modo geral são caracterizados por diferentes relações entre a velocidade superficial do ar de fluidização (U) e a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}). Para o leito fluidizado de regime borbulhante (LFB) a relação $U/U_{mf} < 2$ segundo Saxena e Jotshi (1994).

A queima de carvão em leito fluidizado é por norma realizada em leito de um material inerte (areia ou cinzas, normalmente de 0,5 a 1 mm de diâmetro) que se encontram a temperatura entre (700 a 1000 °C), em que as partículas combustíveis (coque, carvão) são lançadas para o interior do leito.

Na Figura 4.2 a) está esquematizado um recipiente, com fundo perfurado, onde é colocado no seu interior areia. A quantidade total de areia é tal que o recipiente esteja cheio até à altura L_m . Quando é insuflado um fluido líquido ou gasoso através do distribuidor podem ocorrer as seguintes situações (Ribeiro, 1996):

- Quando o caudal de fluido é reduzido, as partículas constitutivas do leito permanecem fixas e o fluido escoar pelos espaços entre as partículas, ver Figura 4.2 a); a altura do leito permanece igual a L_m , isto é, igual a altura inicial;

- Quando o caudal de ar aumenta, nessa situação as partículas de areia começam a agitar-se em redor de um ponto médio, e com um aumento ainda maior de caudal de fluido, as partículas do leito ficam a levitar suspensas na corrente ascendente de fluido, atinge-se assim um estado de fluidização dito incipiente, ver Figura 4.2 b), a altura do leito nesta situação aumenta para L_{mf} , a superfície do leito permanece plana;

- Em caso de o fluido ser líquido, Figura 4.2 c) acontece que ao subir o seu caudal para além do correspondente à fluidização incipiente, o leito expande-se suavemente (verifica-se um aumento da altura do leito) até que se atinge um caudal tal que as partículas são arrastadas pela corrente líquida;

- Se o fluido for gasoso, acontece que o caudal de gás, acima do caudal correspondente à fluidização incipiente, passa pelo leito na forma de bolhas, Davidson e Harrison (1963), como se representa na Figura 4.2 d). Quando as bolhas surgem à superfície do leito arrebentam, e por isso a superfície livre do leito fluidizado com gás (acima do ponto de fluidização incipiente) assemelha-se à superfície livre de um líquido em ebulição.

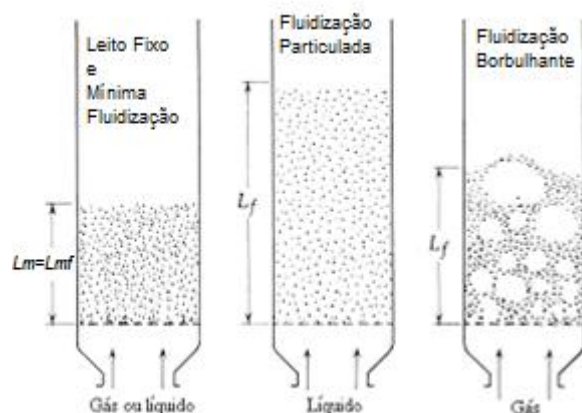


Figura 4.2 Fases de transição do leito à medida que a velocidade do fluido aumenta.

Num queimador em leito fluidizado borbulhante, o ar primário de combustão vai escoar através de um leito de partículas suportadas por um distribuidor, cuja função é, igualmente, a de provocar uma distribuição uniforme do caudal de ar por toda a secção do queimador. As partículas vão permanecer suspensas no caudal de ar de combustão devido ao balanço que se estabelece entre a força de arrasto que esta provoca e a força de gravidade. Sendo que parte desse caudal de ar atravessa o leito em forma de bolhas, o que justifica a designação de borbulhante, e estas provocam uma mistura significativa no interior do leito. O combustível a queimar é fornecido ao interior do leito, quer acima, quer abaixo do seu nível ou superfície superior, designada por superfície livre, sendo rapidamente aquecido até à temperatura existente no meio difásico, o que provoca uma rápida desvolatilização. A maior parte dos voláteis queima acima da superfície, enquanto a matéria sólida carbonosa queima no interior do leito (Marques, 2007).

4.1 Queima de Carvão em Leito Fluidizado

Os ensaios de queima em leito fluidizado podem ser feitos em dois modos: a queima em cargas individuais e a queima em contínuo. No presente trabalho estuda-se a queima de cargas individuais, para se determinar os parâmetros controladores da queima de partículas de carvão de chanfuta, jambirre e umbila. Em que se tem um leito de areia de pequenas dimensões tipicamente 80 a 150 mm de diâmetro fluidizado com ar. Utilizam-se resistências eléctricas para manter o leito à temperatura pretendida, e estando o leito à temperatura desejada é lançada uma determinada carga seguindo-se assim a evolução da queima.

Segundo (Pinho, 1984) existem quatro métodos essenciais para o estudo da evolução da queima em leito fluidizado:

- I. Medida da composição dos gases de combustão;
- II. Medida da variação do peso da partícula com o tempo;
- III. Medida da taxa de regressão da superfície da partícula;
- IV. Determinação do tempo de queima, que por ser um método integral engloba uma grande variação de parâmetros.

Pelos diversos factores, o trabalho realizado tem por finalidade estudar como se efectua a queima de carvão em leito fluidizado, assim como conhecer os parâmetros que controlam a combustão, que segundo Pinho (1984) são quatro:

- I. A transferência de O_2 das bolhas para a fase densa;
- II. A difusão do reagente gasoso na fase densa em torno da partícula combustível;
- III. A cinética da reacção, dependendo não só da temperatura a que se processa a queima mas também da reactividade do combustível;
- IV. Nos casos em que o carvão tem teores elevados de cinza não facilmente desagregáveis a difusão dos reagentes através da camada de cinza envolvente do núcleo não queimado. Na biomassa este aspecto não se coloca, pois o teor de cinzas é muito baixo.

4.2 Mecanismos de Combustão e de Controlo da Reacção

Avedesian e Davidson (1973) publicaram a primeira teoria da combustão de partículas de carbono em leito fluidizado. Segundo Moreira (2007), desde a publicação destes autores tem havido grande discussão no que respeita ao modelo de combustão que descreve com fidelidade os fenómenos físicos e químicos que têm lugar no interior do leito aquando da combustão das partículas de carbono, bem como na contabilização dos efeitos cinéticos e

difusivos na taxa de reacção. Os autores referidos desenvolveram um modelo de queima, Figura 4.3, onde ignoravam os efeitos cinéticos, considerando a reacção à superfície da partícula muito rápida, em que de um modo geral, seguem o princípio em que inicialmente o O_2 se difunde da fase densa para a superfície da partícula de coque onde reage e forma CO. O CO produzido difunde-se para o exterior da partícula e reage por sua vez com O_2 que se desloca no sentido da partícula formando CO_2 . Do CO_2 produzido nesta reacção metade difunde-se para o exterior e a outra metade difunde-se para a partícula.

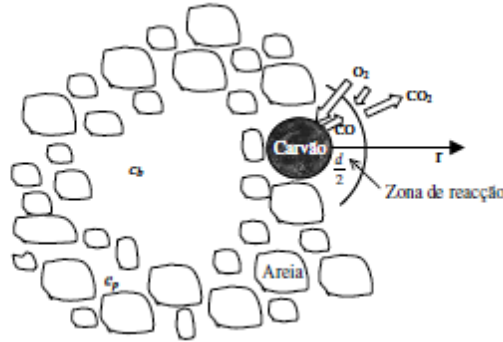


Figura 4.3 Partícula de carvão de diâmetro d a queimar na fase densa do leito fluidizado, Avedesian e Davidson (1973).

O modelo utilizado considera que o efeito convectivo é desprezável face ao efeito difusivo. Apesar do modelo destes autores se basear nesta teoria, que negligencia a convecção devida à passagem do gás em torno das partículas, incorpora um termo convectivo para contabilizar as trocas gasosas entre a fase densa e a fase de bolhas. Os autores assumem que a resistência à transferência de massa está concentrada na fase densa e que as reacções químicas homogéneas que têm lugar na fase densa possam afectar o coeficiente de transferência de massa.

Basu *et al.*, (1975) aprofundaram o estudo do mecanismo de queima do carbono em leito fluidizado, suprimindo a reacção homogénea de oxidação de CO, no sentido de determinar qual o modelo de reacção na superfície das partículas de carbono. Concluíram que o oxigénio chega à superfície da partícula e reage com o carbono formando CO e CO_2 , sendo que o CO formado queima junto à partícula.

Ross (1979) contesta o controlo cinético para partículas daquele tamanho, pois com efeito, o número de Sherwood não pode ser considerado constante num leito pouco profundo como tinha sido feito e refere que para essa gama de tamanho o O_2 reage directamente à superfície da partícula, não existindo redução heterogénea do CO_2 , sendo assim o autor mostra que na realidade o controle é difusivo.

Segundo Pinho (2009 a) a reacção entre o C e O_2 à superfície de uma partícula de carbono tem como primeiro produto o CO, segundo a equação (4.1), seguindo-se posteriormente a oxidação do CO a CO_2 , equação (4.2)



Desta forma e de um modo geral há duas possibilidades a considerar:

- i. A queima do CO dá-se quase instantaneamente após a sua formação, junto à superfície da partícula e segundo a reacção,



Esta reacção verifica-se segundo dados experimentais, para partículas superiores a 1 mm de diâmetro;

- ii. A queima do CO terá lugar na fase gasosa longe da partícula, segundo a Equação (4.3) e para partículas com diâmetros iguais ou inferiores a 1 mm. No caso do leito fluidizado, onde as partículas evoluem no seio de um leito de inertes suportado por uma corrente de ar e produtos gasosos de combustão, os inertes actuam como inibidores da reacção de oxidação do CO, acabando este por queimar longe das partículas mesmo quando estas tem grandes diâmetros.

Ross (1979) afirma que a reacção $CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$ é responsável por 72 % do calor total gerado quando se queima uma mole de carbono. Sendo assim, é importante localizar esta reacção: se é próxima da partícula, irá aumentar a temperatura da superfície da partícula e consequentemente a taxa de reacção à superfície; se for distante da partícula, a temperatura da superfície da partícula estará mais próxima da do leito e a reacção será mais lenta. O autor concluiu que, mesmo para baixas concentrações de oxigénio no leito, 90 % do CO gerado à superfície é consumido numa zona correspondente a um diâmetro de partícula, para partículas com diâmetros acima de 1 mm. Pinho e Guedes de Carvalho *et al.*, (1984) também estudaram o mesmo assunto.

Porém, de acordo com Guedes de Carvalho *et al.*, (1991), em leito fluidizado as partículas evoluem no seio de um leito de inertes suportado por uma corrente de ar e produtos gasosos de combustão, os inertes actuam como inibidores da reacção de oxidação do CO, acabando este por queimar longe das partículas mesmo quando estas têm grandes diâmetros.

Em consequência do modelo de Avedesian, apenas se considera a transferência de massa por difusão na camada limite em torno da partícula a queimar. Em que a combustão da partícula de coque é acompanhada de altas temperaturas. O oxigénio difunde-se até junto à superfície da partícula onde reagirá directamente com o sólido (reacção heterogénea gás/sólido) libertando-se grande quantidade de calor. Muito desse calor perde-se para o exterior da partícula por radiação. Para o controlo da velocidade a que se desenvolve a reacção de combustão existirá uma competição entre a cinética da reacção heterogénea (carbono + oxigénio) e a difusão do O_2 para a superfície da partícula. Basicamente, a reacção de queima de uma partícula de coque compõe-se de dois passos em série:

- I. Difusão de O_2 para a superfície da partícula;
- II. Reacção heterogénea do oxigénio com o carbono.

O mais lento destes dois processos controlará a taxa da queima. No caso da queima em suspensão ou em leito fixo, quando a temperatura da partícula é baixa (inferior a 800 °C) ou a partícula é de pequenas dimensões ($\leq 100 \mu m$), a queima é controlada pela cinética e por isso a taxa de reacção será função exponencial da temperatura. Sendo a difusão irrelevante nestas condições, a velocidade da reacção será independentemente do tamanho das partículas e do perfil de concentrações de O_2 que a envolve. No caso da combustão em leitos fluidizados industriais de um modo geral os dois mecanismos, cinética e difusão, competem entre si para o controlo da combustão, sendo as dimensões das partículas a queimar da ordem das dezenas de milímetros (Pinho, 2009).

4.3 Determinação da Resistência Global de Combustão pela Teoria de Fluidização em Duas Fases

A teoria da fluidização em duas fases apresentada por Davidson e Harrison (1963) considera que o leito fluidizado se divide em duas fases: fase densa (emulsão de sólidos e gás) e fase de bolhas. Na fase densa, as condições são semelhantes às verificadas no regime de fluidização incipiente. O excesso de gás relativamente à fluidização incipiente passa através do leito sob a forma de bolhas.

Avedesian e Davidson (1973), Ross (1979), entre outros, assumiram que a taxa de queima de partículas de carbono em leito fluidizado é controlada por dois processos difusivos:

- I. Transferência de oxigénio das bolhas de gás para a fase densa;
- II. Difusão do oxigénio através da fase densa até à superfície das partículas a queimar.

Para além destas duas resistências difusivas, há ainda a considerar a resistência cinética devida à taxa da reacção química à superfície da partícula entre o oxigénio e o carbono, que poderá ter importância relevante em certas condições de funcionamento do leito, particularmente a baixa temperatura, e ainda quando o material que constitui as partículas a queimar é pouco reactivo.

Para dar continuidade com a aplicação da teoria da fluidização em duas fases na determinação da resistência de combustão, admite-se que a queima das partículas se dá na fase densa, que a concentração de oxigénio na fase densa é a mesma em todos os pontos desta, que o tamanho das bolhas é invariável durante a subida, e que a concentração do reagente (O_2) nas bolhas é constante a ascensão no leito (Moreira, 2007).

O procedimento para a determinação da resistência global à queima foi aplicado por Moreira (2007), entre outros autores, e pode ser consultado no Anexo A. A Equação (4.4), que consta do Anexo A, permite obter o valor da resistência global $1/K$ a partir dos dados experimentais,

$$\frac{1}{K} = \frac{12d^2m_c}{\rho_c d_i^3 A_t U k'} \quad (4.4)$$

É ainda possível obter o valor da resistência global de combustão pela Equação (4.5), Moreira (2007)

$$\frac{1}{K} = \frac{2}{k_c} + \frac{d}{Sh D_G} \quad (4.5)$$

Analisando a Equação (4.5) verifica-se que a resistência global à reacção de combustão de uma partícula no leito fluidizado é função linear do seu diâmetro, sendo o declive da recta dependente do número de Sherwood Sh e da difusividade D_G , e a ordenada na origem dependente da constante da taxa de reacção em fase heterogénea ($C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$) k_c .

Será então possível, como se verá adiante, representar os valores de $1/K$ em função do diâmetro d e daí obter os dados difusivos e cinéticos, respectivamente, números de Sherwood e valores da constante cinética k_c . Para essa representação gráfica, o valor de $1/K$ é calculado pela Equação (4.4) e o diâmetro d é calculado pela Equação (A.14).

5 Descrição Experimental

Neste capítulo é feita a descrição da instalação de leito fluidizado que já se encontrava montada nas instalações do INEGI. Apresenta-se a caracterização do leito e do regime de fluidização em que opera, assim como das partículas de carvão estudadas e o procedimento experimental.

5.1 Descrição da Instalação

A instalação experimental utilizada consta de um reactor em leito fluidizado aquecido por uma resistência eléctrica, um analisador de CO_2 por infra-vermelhos e um analisador paramagnético para O_2 . Tendo em conta que a concentração de CO nos gases queimados nas condições ensaiadas é nula, para o presente trabalho foi apenas utilizado o analisador de CO_2 , de maneira sistemática, e só ocasionalmente se recorreu ao analisador de O_2 . Um medidor de caudal de placa-orifício ou diafragma foi usado para medir o caudal de ar de fluidização. Os gases provenientes da combustão eram aspirados pela bomba do analisador através de uma sonda em aço inoxidável e filtrados antes de serem detectados no analisador de CO_2 . O sistema de aquisição de dados instalado num computador pessoal era responsável pela recolha dos dados da temperatura e teor de CO_2 e de O_2 . A Figura 5.1 representa o esquema da instalação laboratorial utilizada no trabalho.

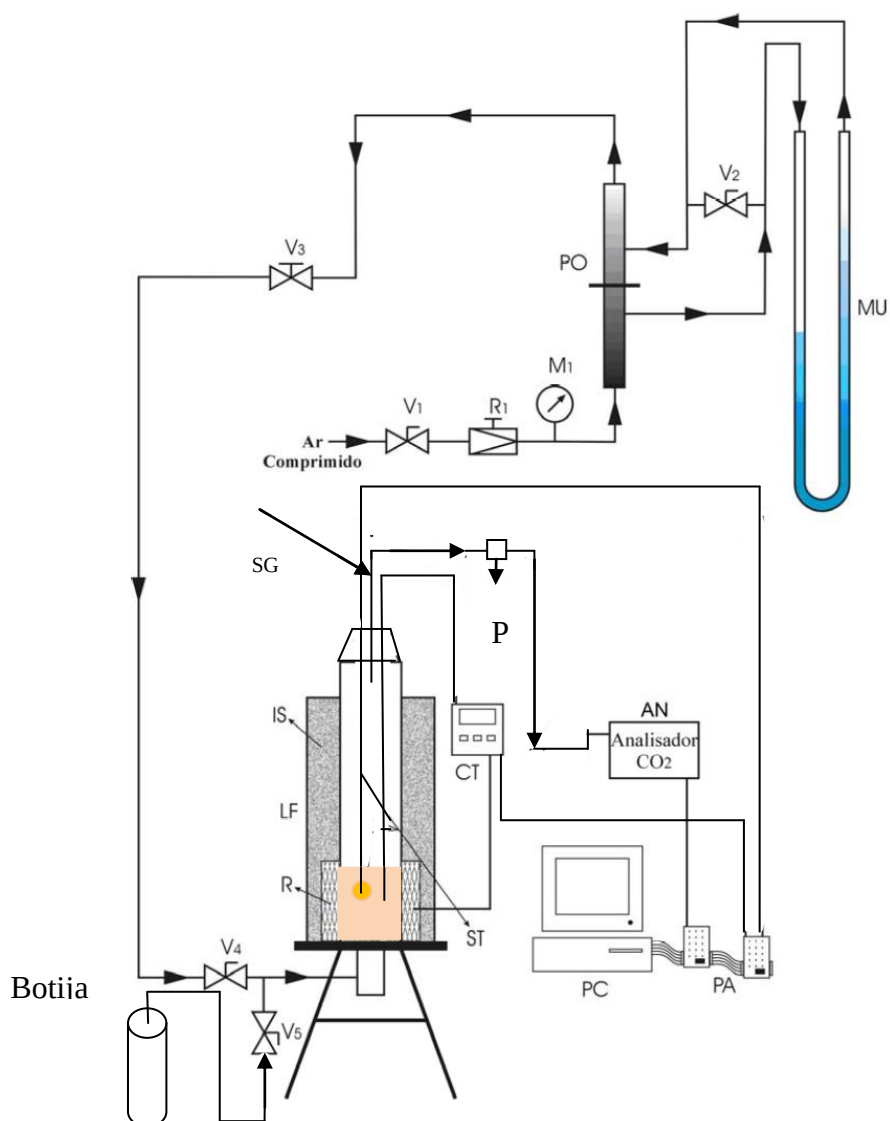


Figura 5.1 Esquema da instalação. Esquema adaptado de Marques (2007).

Legenda:

LF – Leito Fluidizado

IS – Material isolante

ST – Sondas térmicas

SG – Sonda de gás

PO – Medidor de caudal de placa de orifício

MU – Manómetro de coluna de água para medir a perda de carga na placa de orifício

R – Resistência eléctrica

AN – Analisador de CO₂

CT – Controlador de temperatura

B – Bomba de aspiração

PA – Placa de aquisição de dados

V₁, V₂, V₄, V₅ – Válvulas de corte

V₃ – Válvula de regulação de caudal de ar comprimido

R₁ – Regulação de pressão de ar comprimido

M₁ – Manómetro para linha de ar comprimido

5.1.1 Leito fluidizado

O leito fluidizado contido num tubo de aço refractário com 80,8 mm de diâmetro interno e 500 mm de comprimento é demonstrado na Figura 5.2, antes de ser montada a resistência eléctrica de aquecimento. Na base do leito estava instalado um distribuidor em aço inox de 4 mm de espessura com 101 furos de 0,3 mm de diâmetro, que permite a obtenção de uma distribuição uniforme do ar através do leito, garantindo a fluidização adequada deste. Para facilidade de execução de furos nesta placa em aço inoxidável AISI 316, estes tinham um diâmetro de 0,6 mm até 3 mm de profundidade sendo apenas o milímetro final furado com um diâmetro de 0,3 mm, Figura 5.3. A face do distribuidor com os furos de 0,3 mm foi montada voltada para o reactor. A alimentação da corrente gasosa era efectuada na parte inferior do leito conforme é mostrada na Figura 5.4.



Figura 5.2 Imagem do leito fluidizado.



Figura 5.3 Imagem do distribuidor



Figura 5.4 Alimentação do gás ao leito

A tubeira convergente em latão, Figura 5.5, encontrava-se instalada no topo do tubo refractário, de modo a promover uma boa mistura dos gases de queima à saída do leito, melhorando assim a reprodutibilidade das leituras das concentrações dos gases.



Figura 5.5 Imagem da tubeira convergente

O leito é fluidizado com ar comprimido, previamente filtrado e purgado, cuja pressão a montante do medidor de orifício, Figura 5.6, foi regulado em 1,8 bar relativos. O caudal de fluidização era determinado pelo medidor de placa orifício, previamente calibrado pelo método do deslocamento positivo (Moreira, 2007). A queda de pressão era medida através de um manómetro em U contendo água como fluido manométrico. Em alguns tipos de ensaios é necessário fluidizar o leito com um gás inerte, daí estar prevista a possibilidade de alimentar a instalação com azoto.



Figura 5.6 Medidor de caudal de placa de orifício

5.1.2 Resistência Eléctrica

O leito estava rodeado numa altura de 160 mm a seguir ao distribuidor por uma resistência eléctrica feita em fio de Kanthal de 1,2 mm de diâmetro, com potência de 4,2 kW, enrolada em espiral e inserida em peças de cerâmica refractária. Esta resistência tinha como objectivo aquecer o leito de partículas e também atenuar as variações com o tempo, da temperatura do leito.

5.1.3 Controlador de Temperatura

Controlador de temperatura é de marca Eurotherm, modelo 2116.

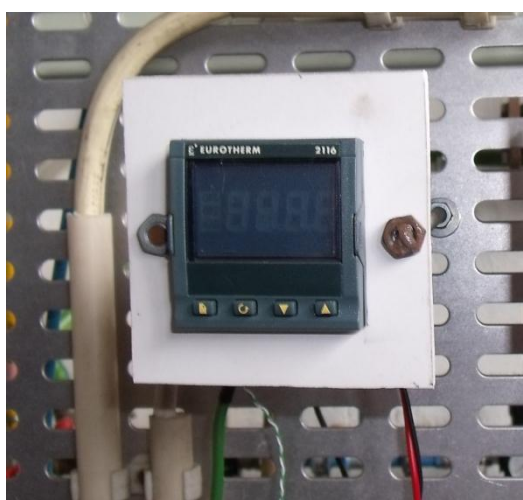


Figura 5.7 Controlador de temperatura Eurotherm, modelo 2116

5.1.4 Isolamento Térmico

A Figura 5.8 apresenta o conjunto do leito e resistência eléctrica de aquecimento estava envolvido por um isolamento térmico de fibra cerâmica, da marca Kaowool, que resiste a temperaturas até 1260 °C.



Figura 5.8 Leito fluidizado envolto num isolamento de fibra cerâmica.

5.1.4 Termopares

O termopar que fazia a monitorização da temperatura do leito era do tipo K (*Cromel-Alumel*), e dava o sinal ao controlador de temperatura. O termopar é revestido por manga de aço inoxidável com 3 mm de diâmetro externo. A gama de temperaturas de funcionamento é de -200 a 1250 °C. O termopar é introduzido no leito pela parte superior e está ligado ao controlador de temperatura do tipo proporcional diferencial integral (PID), e também ao sistema de aquisição de dados, sendo por via do sistema de aquisição de dados que se monitoriza e registava-se a temperatura no interior do leito.

O termopar em aço inoxidável AISI 316 tipo K com 0,5 mm de diâmetro fazia a monitorização da temperatura da partícula, este era colocado no centro da partícula de forma a garantir que não se soltasse ao longo da queima.

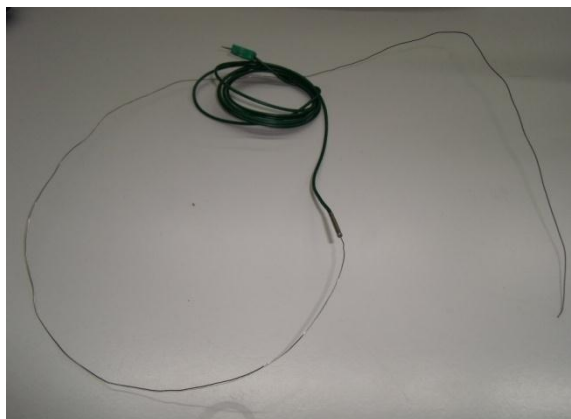


Figura 5.9 Termopar tipo K, em aço inoxidável AISI 316

5.1.6 Analisador

Para os ensaios experimentais foi utilizado o analisador de CO_2 da marca Signal Instruments modelo 7000 FM GFC, do tipo infra-vermelho não dispersivo, com detector de estado sólido e com bomba interna de aspiração. O analisador foi sempre calibrado de acordo com as instruções do fabricante antes da realização dos ensaios experimentais. O analisador de O_2 é da marca *Signal Instruments*, modelo 8000M, do tipo paramagnético.



Figura 5.10 Analisador de CO_2



Figura 5.11 Analisador de O_2

5.1.7 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados, Figura 5.12, fazia a leitura dos dados da concentração volúmica de CO₂, era composto por duas placas de aquisição de marca *Advantech*, sendo uma interna e outra externa, a placa interna, modelo PCI 1710, tem oito entradas diferenciais analógicas e uma resolução de 12 bit. O software utilizado foi o *LabView*. Os analisadores de gás estavam conectados à placa externa modelo PCLD-8116. A placa B fazia a aquisição de dados da temperatura do leito e da temperatura da partícula, é da marca *National Instruments*, NI USB-9211, com 4 entradas diferenciais analógicas e uma resolução de 24 bit, é compactável com termopares do tipo J, K, R, S, T, N, E e B.

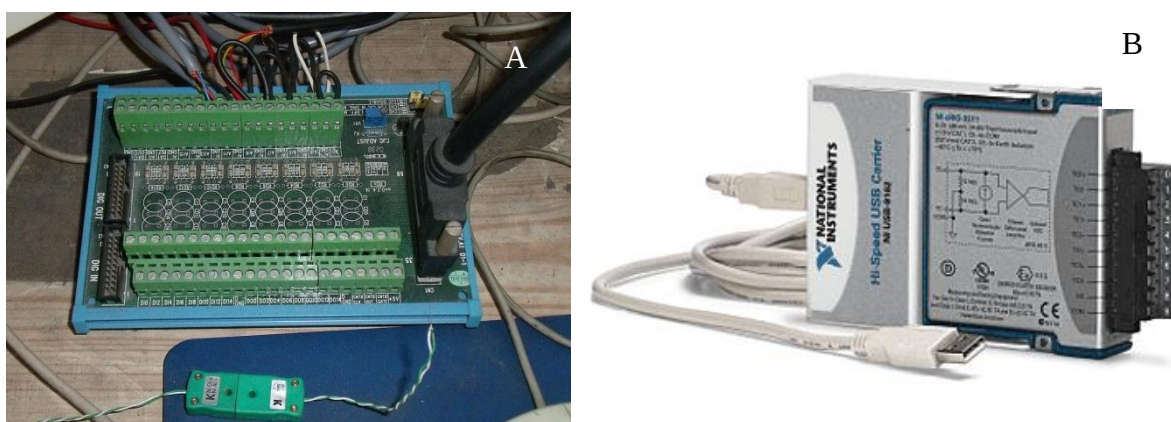


Figura 5.12 Placas de aquisição de dados A) PCI 1710, B) NI USB-9211

5.2 Descrição do Processo de Obtenção de Carvão

Os ensaios de combustão foram efectuados com carvões de chanfuta, jambirre e umbila. Para obtenção do carvão destas espécies procedeu-se inicialmente a pirólise das amostras de madeira (Figura 5.13) na mesma instalação laboratorial que posteriormente seria usada para os ensaios de combustão.

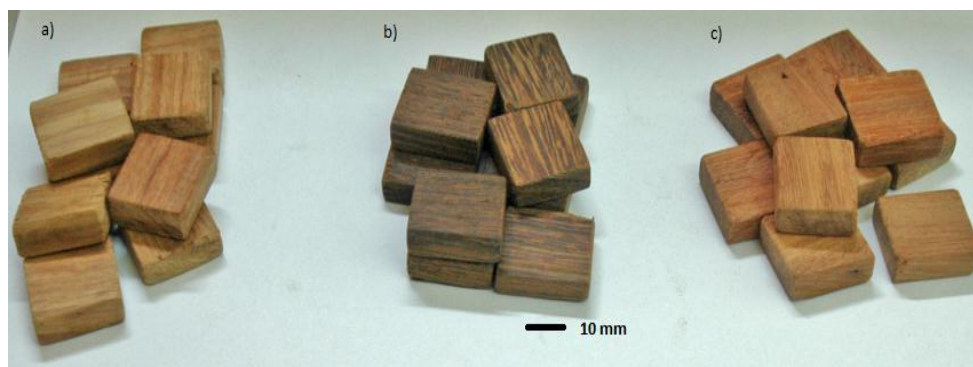


Figura 5.13 Amostras de: a) Umbila b) Jambirre e c) Chanfuta

Antes de pirolisar a biomassa, foi retirada do reactor todo leito de areia contido e a biomassa a pirolisar era colocada num copo metálico que por sua vez era introduzido no reactor. O procedimento seguido é descrito de seguida.

Para se ter uma ideia da quantidade de material que se perde na pirólise, inicialmente foi feita uma pesagem das diferentes espécies numa balança *Techilab* modelo EW 6000-1M. Depois de pesadas as diferentes espécies, procedeu-se à preparação da instalação levando o reactor sem areia a uma temperatura de 850 °C. Temperatura esta que era lida pelo termopar introduzido no reactor, devendo-se sempre ter o cuidado de garantir que o termopar não entrasse em contacto com a parede ou com o distribuidor de forma a garantir uma leitura adequada da temperatura daquela região do reactor. Nesta fase, ar escoava pelo reactor. De salientar que durante a pirólise era necessário ligar a exaustão do laboratório pois o procedimento libertava muitos voláteis.

Antes de ser colocado o copo com as amostras dentro do reactor de leito, era regulado um caudal de azoto no rotâmetro para 2 L/min, desligando então o caudal de ar e ligando o de azoto, após o que se introduzia o copo metálico com as amostras que se pretendia carbonizar. O ar era desligado para garantir que não se dava a queima da carga de madeira a carbonizar; sendo o azoto um gás inerte garantia-se dessa forma que não se dava qualquer oxidação do carbono, que era o produto final que se pretendia neste processo.

Deve-se garantir que o termopar esteja dentro do copo com a madeira quando este é colocado dentro do queimador, pois o que se pretende é o conhecimento da evolução da temperatura da pirólise da madeira. Depois de efectuada a colocação do copo, deve-se tapar a parte superior da fornalha para que não se dê a queima da carga, pois assim evita-se a passagem de oxigénio que poderia entrar para o reactor mesmo em contra corrente ao escoamento de azoto, tendo em conta que o caudal de azoto utilizado era baixo. Esperavam-se 15 minutos, tempo necessário para que se atingisse a temperatura de pirólise de 850 °C, visto que ao ser colocado o copo com a madeira no reactor havia um decréscimo elevado da temperatura associado à grande massa fria do copo e da madeira nele contida.

No final do processo de pirólise retirava-se o copo, tapando-se logo que possível este para evitar a queima espontânea do carvão em contacto com o ar, deixando-se assim por volta de 15 minutos. Após esse tempo, retirava-se o carvão para um recipiente e fazia-se a sua pesagem para se poder determinar a quantidade de massa perdida durante a pirólise.

Tabela 5.1 Perda de massa de duas das três espécies estudadas durante a pirólise

Espécie	Antes da pirólise [g]	Após pirólise [g]	Perda de massa [%]
Jambirre	59,5	16,5	72
	91,2	24,9	73
	72,2	19,8	73
Umbila	74,6	16,4	78
	79,5	17,3	78
	82,7	18,3	78

Da Tabela 5.1 verifica-se que a percentagem de perda de massa da jambirre é em média aproximadamente igual a 72 % enquanto a percentagem de perda de massa da umbila é de 78 %. Para a espécie chanfuta os dados ficaram indisponíveis acidentalmente

5.3 Separação Granulométrica

A separação por granulometria foi realizada antes de se efectuarem os ensaios, utilizando para o efeito um crivo vibratório da marca RETSCH, Figura 5.14, o qual foi usado no método de peneiração. Para o processo de peneiração para obtenção dos quatro diâmetros utilizou-se um tempo de peneiração de cerca de dois minutos e uma amplitude de 1,5 mm. As partículas foram separadas em 4 lotes com diâmetros compreendidos entre:

- 3,15 mm < dp < 4,00 mm;
- 2,50 mm < dp < 3,15 mm;
- 2,00 mm < dp < 2,50 mm;
- 1,60 mm < dp < 2,00 mm.

**Figura 5.14** Crivo vibratório

5.4 Caracterização das Partículas de Carvão Vegetal

A massa volúmica das partículas foi determinada no Departamento de Engenharia Química da FEUP utilizando a técnica de porosimetria de mercúrio.

Efectuou-se a análise imediata do carvão para obtenção dos valores referentes à percentagem de carbono fixo, humidade, voláteis e cinzas. Estas análises foram efectuadas

separadamente para cada tipo de carvão no Laboratório de Caracterização de Combustíveis do LNEG.

Na Tabela 5.2 estão apresentados de forma resumida os resultados obtidos nas análises e referentes à percentagem de carbono fixo, voláteis e cinzas, na base seca e húmida. A massa volúmica também se encontra na mesma tabela, para as diferentes espécies usadas em estudo. No Anexo B encontra-se uma informação mais completa das análises, incluindo as normas utilizadas.

Tabela 5.2 Resultados obtidos na caracterização das partículas de carvão vegetal

Resultado	Chanfuta		Jambirre		Umbila	
	Base Húmida	Base Seca	Base Húmida	Base Seca	Base Húmida	Base Seca
Humidade Total [% m/m]	0,8	-	3,0	-	3,0	-
Matérias Voláteis [% m/m]	10,7	10,8	5,6	5,8	4,5	4,6
Cinzas [% m/m]	14,0	14,1	3,9	4,0	2,6	2,7
Carbono Fixo [% m/m]	74,5	75,1	87,5	90,2	89,9	92,7
Massa Volúmica [g/cm ³]	0,7351		0,6072		0,4645	

5.5 Caracterização do Leito

As propriedades do leito de inertes (areia de sílica) usadas para os cálculos são apresentadas a seguir:

- **Diâmetro médio**

O diâmetro médio das partículas foi obtido pela média aritmética das dimensões das malhas dos peneiros sucessivos de norma DIN entre os quais as partículas ficaram retidas na peneiração. Foram usadas partículas retidas entre peneiros com malhas de 250 e 315 μm , sendo então o diâmetro médio d_p , de 283 μm .

Segundo a classificação proposta por Geldart (1986) a areia usada em estudo pertence ao grupo B. Para esta classificação foi usada um diagrama de Geldart, que relaciona o diâmetro médio das partículas com a diferença de massa volúmica da areia e do gás de fluidização, ver Geldart (1986).

- **Esfericidade**

A esfericidade foi obtida de Kunii e Levenspiel (1991), é um valor intermédio entre os valores para as partículas de areia arredondadas e agudas, $\phi = 0,77$.

- **Porosidade**

Para a porosidade do leito nas condições mínimas de fluidização, $\varepsilon = 0,52$, foi seguida uma sugestão dos mesmos autores, Kunii e Levenspiel (1991).

- **Massa volúmica**

A massa volúmica das partículas constituintes do leito, $\rho_p = 2990 \text{ kg/m}^3$, foi obtida do trabalho de Ribeiro (2002), que fez a determinação experimental desta propriedade, tal como

sugerem Kunii e Levenspiel (1991), para partículas de areia com características idênticas às aqui utilizadas, de igual granulometria.

5.6 Velocidade Mínima de Fluidização

A eficiência na utilização de um leito fluidizado depende inicialmente do conhecimento da velocidade mínima de fluidização. Abaixo desta velocidade o leito não fluidiza e muito acima dela os sólidos são descarregados para fora do leito. Para o cálculo da velocidade de fluidização utilizou-se a equação apresentada por Kunii e Levenspiel (1991),

$$U_{mf} = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho)g}{150\mu} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (5.1)$$

em que:

U_{mf} é a velocidade de fluidização incipiente;

ε_{mf} é a fração de vazios no leito no estado de fluidização incipiente;

ρ é a massa volúmica do gás de fluidização;

ρ_p é a massa volúmica das partículas constituintes do leito;

μ é a viscosidade dinâmica do gás e fluidização;

d_p é o diâmetro das partículas do leito;

ϕ é a esfericidade das partículas (valor entre 0 a 1);

g é a aceleração de gravidade.

A expressão tem uma condição de aplicabilidade que é o número de Reynolds da partícula nas condições mínimas de fluidização, $Re_{p,mf}$, ser inferior a 20. Abaixo apresenta-se a equação que determina a viscosidade do ar de fluidização μ , a lei de potência de White (1991), que para o ar relaciona a sua viscosidade com a respectiva temperatura absoluta.

$$\mu = 4,092 \times 10^{-7} T^{0,666} \quad (5.2)$$

Para a determinação da massa específica ρ do ar de fluidização, para as diferentes temperaturas do leito T , foi utilizada a equação dos gases perfeitos,

$$\rho = \frac{p}{R \times T} \quad (5.3)$$

Onde R é a constante particular do ar, p é a pressão atmosférica e T é a temperatura absoluta do leito.

5.7 Procedimento Experimental para os Ensaios de Queima de Partículas

Os ensaios de queima foram efectuados para temperaturas de 750 °C, 820 °C e 900 °C. O caudal de ar utilizado foi $U/U_{mf}=1,5$, foi testada apenas uma massa de carga de 1,5 g para as quatro granulometrias das partículas.

O procedimento experimental consistiu na queima de cargas de partículas de carvão com registo da evolução da concentração molar de CO₂ nos gases queimados, com vista a obterem-se os parâmetros controladores da reacção de combustão.

Previamente ao lançamento da carga de carvão no leito fixava-se um caudal de ar e aquecia-se o leito. De forma resumida, estes ensaios experimentais consistiam em fixar um caudal de ar, aquecer o leito até à temperatura pretendida, lançar a carga de carvão vegetal no leito, registar a evolução da temperatura do leito e da composição dos gases de combustão ao longo do tempo de queima.

Foram efectuados 8 ensaios para cada temperatura cobrindo todos os tamanhos, totalizando em 24 ensaios para cada espécie. Uma vez que se dispunha de três diferentes espécies de madeira e consequentemente dos respectivos carvões, foram no total realizados 72 ensaios. A altura do leito de areia foi em todos os casos de aproximadamente igual a 150 mm. A quantidade de areia a colocar no leito foi determinada com base no cálculo do volume para a altura considerada e com um balão de Erlenmeyer obteve-se o volume de areia calculado, que foi aproximadamente de 750 ml. Repetiram-se uma vez os ensaios para aumentar a representatividade dos resultados obtidos.

A seguir apresentam-se os passos necessários para a realização dos ensaios, cuja simbologia consta na Figura 5.1.

1. Ligou-se o analisador de CO₂ no mínimo uma hora antes de se iniciar os ensaios;
2. Realizou-se a calibração do analisador de CO₂ conforme recomendações do fabricante;
3. Para o fornecimento do ar comprimido foi aberta a válvula de corte V₁;
4. Abriu-se a válvula de corte V₂ de forma a equalizar a pressão no manómetro MU;
5. Fez-se a regulação da pressão no redutor M1 para 1,8 bar relativos, que é a pressão de calibração da placa-orifício;
6. Fechou-se a válvula de corte V₂;
7. Fez-se o ajusto da válvula de regulação V₃ até se obter o desnível pretendido no manómetro;
8. No controlador de temperatura foi seleccionada a temperatura desejada (o leito leva cerca de 3 horas para atingir a temperatura desejada);
9. Iniciou-se a aquisição de dados no computador;
10. Adicionou-se a carga de partículas previamente pesadas ao leito. O ensaio termina quando o nível de CO₂ era constante e próximo do valor nulo;
11. Repetiu-se o procedimento anterior para diferentes condições experimentais;

6 Resultados dos Ensaios de Combustão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de queima de cargas dos carvões das diferentes espécies estudadas. O principal objectivo passa por obter parâmetros de queima em leito fluidizado associados aos três tipos de carvões vegetais. Foram usadas amostras de 1,5 gramas de carvão de tamanhos de 1,8, 2,2, 2,8 e 3,6 mm, realizaram-se ensaios para temperaturas do leito de 750, 820 e 900 °C, com velocidade de fluidização de 1,5 vezes a velocidade mínima de fluidização.

6.1 Ensaios de Queima de Partículas

Pode conhecer-se a evolução da resistência global da reacção, $1/K$, com o tamanho das partículas, ou seja, com o tempo, através do registo de valores da concentração de CO_2 nos gases de combustão e recorrendo à teoria de fluidização em duas fases de Davidson e Harrison (1963).

A Equação (6.1) define teoricamente a resistência da queima $1/K$ para uma partícula. Quando se traçam os gráficos dos resultados experimentais de $1/K$ em função de d espera-se uma dependência linear cujo declive permite obter Sh e a ordenada na origem k_c .

Neste trabalho e de acordo com Guedes de Carvalho *et al.*, (1991), que considera que o O_2 atinge a superfície das partículas e reage com o carbono formando CO (reacção heterogénea), e que a oxidação do CO dá-se longe da partícula que se encontra na fase densa, ou no interior das bolhas ou mesmo acima da superfície livre do leito. O material inerte do leito inibe a queima do CO formado junto à superfície da partícula. A dimensão dos interstícios é inferior ao limite mínimo que garante o não congelamento da reacção homogénea da queima do CO a CO_2 .

$$\frac{1}{K} = \frac{2}{k_c} + \frac{d}{ShD_G} \quad (6.1)$$

Os ensaios foram realizados para vários caudais de ar de fluidização que se indicam na Tabela 6.1 para as temperaturas do leito de 750, 820, 900 °C.

Tabela 6.1 Valores do caudal volumétrico, caudal mássico e velocidade mínima de fluidização.

Temperatura [°C]	μ_{mist} [Pa.s]	ρ_{mist} [kg/m ³]	u/u_{mf} -	u_{mf} [mm/s]	$\dot{m}_{total}$ [kg/h]	$\dot{V}_{ar}$ [L/min]
750	4,14E-5	0,341	1,5	65,69	0,619	8,70
820	4,32E-5	0,319		62,86	0,555	7,84
900	4,53E-5	0,297		60,00	0,493	6,97

Nos ensaios foram usados quatro tamanhos de partículas compreendidos entre os seguintes diâmetros, obtidos em peneiros vibratórios:

- 3,15 mm $< d_p < 4,00$ mm, a que corresponde o diâmetro médio de 3,6 mm;
- 2,50 mm $< d_p < 3,15$ mm, a que corresponde o diâmetro médio de 2,8 mm;

- $2,00 \text{ mm} < d_p < 2,50 \text{ mm}$, a que corresponde o diâmetro médio de 2,2 mm;
- $1,60 \text{ mm} < d_p < 2,00 \text{ mm}$, a que corresponde o diâmetro médio de 1,8 mm.

6.2 Evolução da Concentração Volúmica de CO_2 nos Gases Queimados

As curvas de evolução da concentração volúmica na base seca de CO_2 nos gases da combustão em função do tempo, tipicamente designadas por curvas de CO_2 estão representadas nas Figuras 6.1, 6.2 e 6.3, para o mesmo diâmetro, diferenciando apenas na temperatura.

Para se ter uma ideia das tendências globais do processo de combustão, foram representadas curvas para cada diâmetro inicial e para cada espécie.

Chanfuta

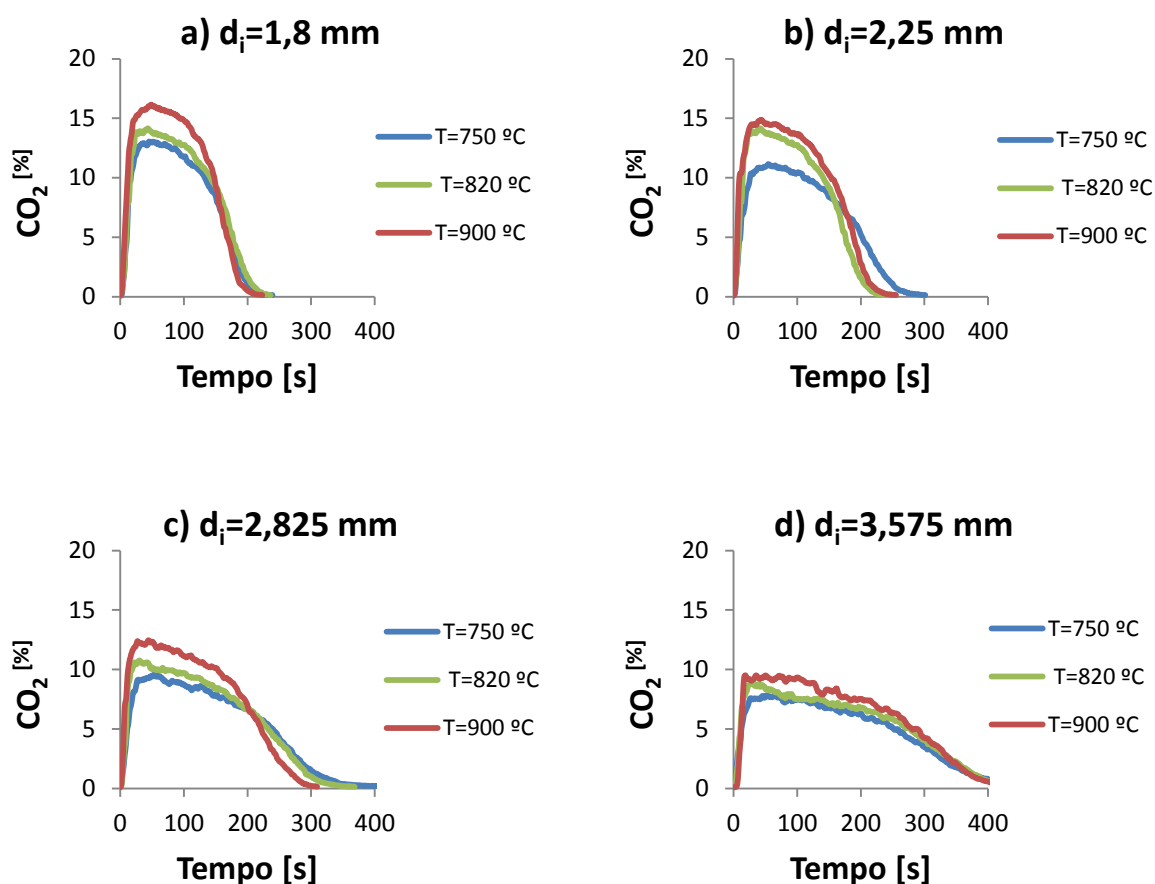


Figura 6.1 Evolução da concentração volúmica seca de CO_2 ao longo da queima de partículas de carvão de chanfuta.

Jambirre

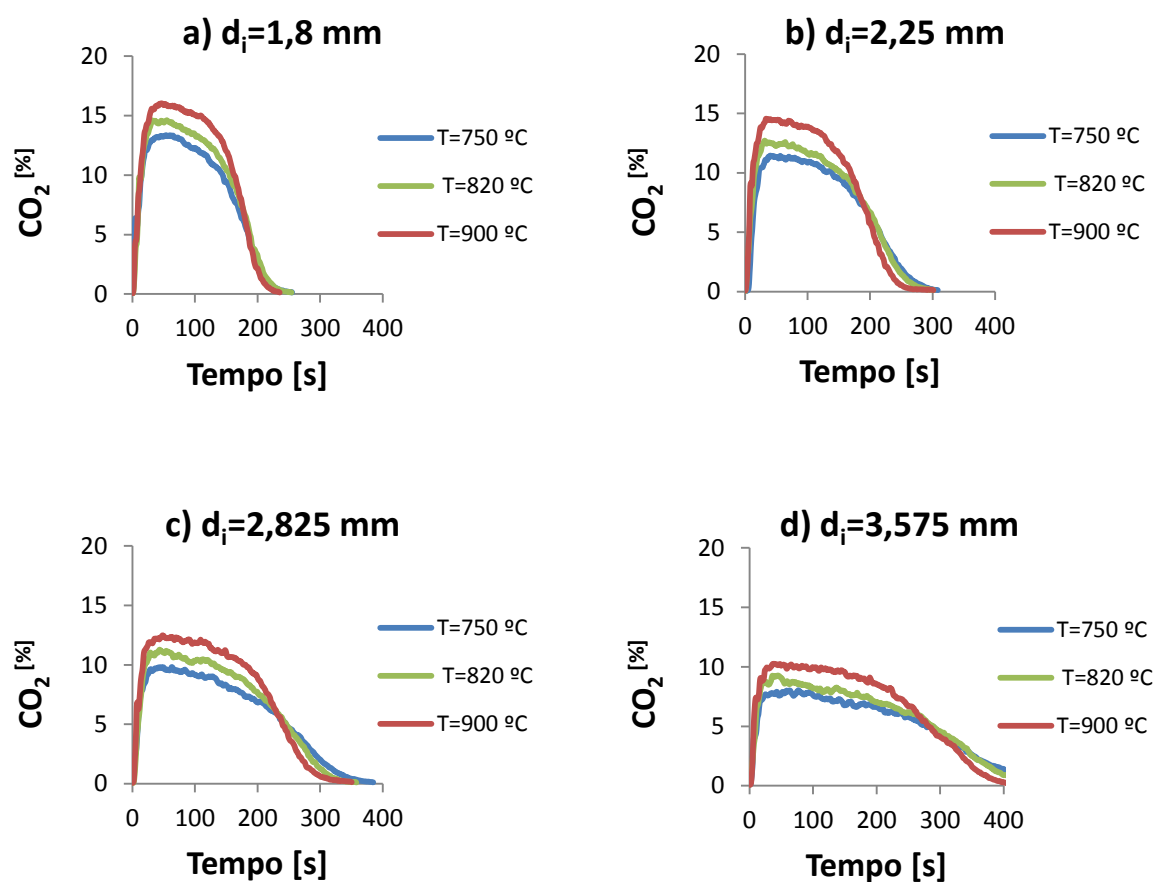


Figura 6.2 Evolução da concentração volúmica seca de CO_2 ao longo da queima de partículas de carvão de jambirre.

Umbila

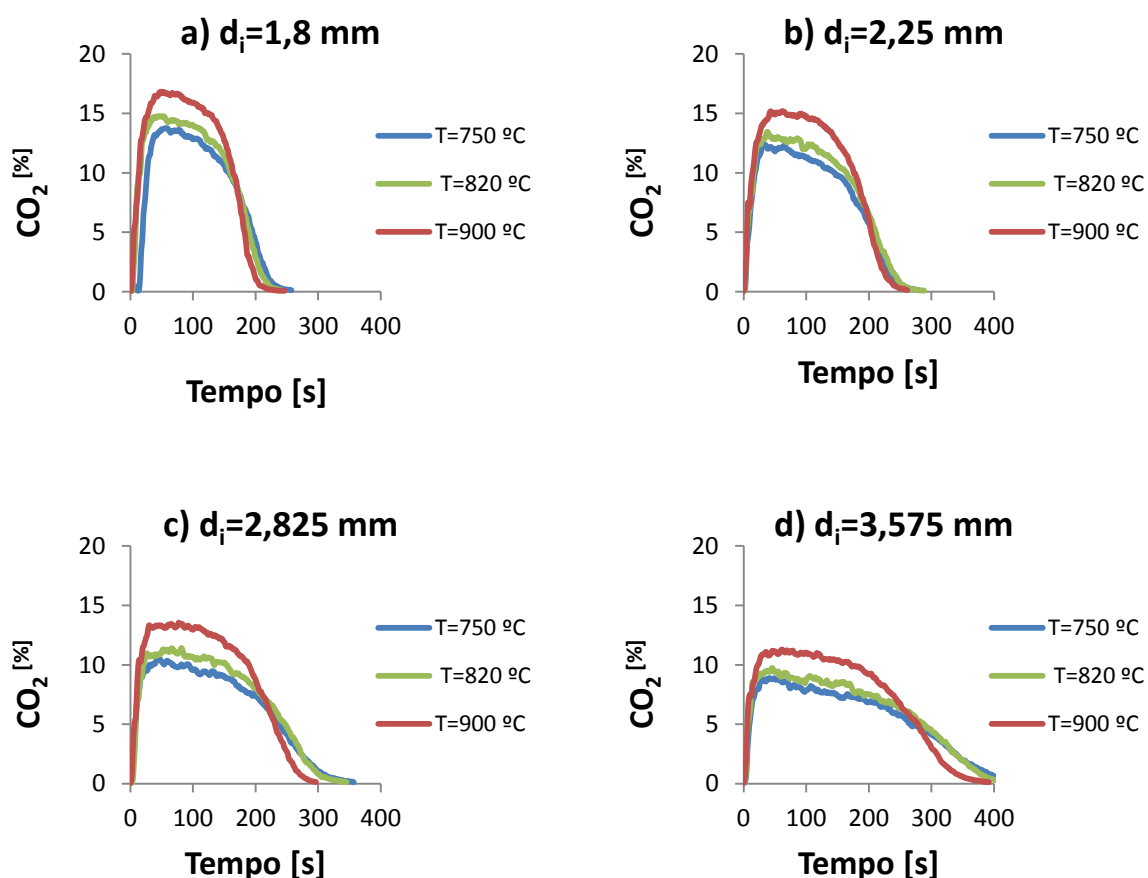


Figura 6.3 Evolução da concentração volúmica seca de CO_2 ao longo da queima de partículas de carvão de umbila.

Analisando as evoluções das curvas de CO_2 para as três espécies constata-se que a temperatura do leito tem influência na concentração de CO_2 , observando-se desta forma um pico mais elevado na concentração de CO_2 à medida que aumenta a temperatura do leito.

Observa-se também que o tempo de queima depende de certa forma do diâmetro da partícula, verificando-se que à medida que aumenta o diâmetro da partícula mais tempo leva a partícula a queimar, isto pode ser observado claramente pela abertura das curvas à medida que se aumenta o tamanho das partículas a testar. Verifica-se ainda que para as temperaturas mais elevadas menor é o tempo de queima.

6.3 Taxa de Recuperação de Carbono

A taxa de recuperação de carbono é definida como sendo o valor que resulta da divisão da massa de carbono captada nos gases queimados, obtida da integração da curva de CO_2 , Equação (A.2) que pode ser consultada no Anexo A, pela massa de carbono presente na carga inicial de partículas, que se assume ser a quantidade de carbono fixo presente na carga.

Em teoria, o valor da taxa de recuperação deverá ser próximo de cem por cento, o que significa que o carbono fixo presente inicialmente na amostra deverá queimar a CO_2 . No entanto, experimentalmente verificou-se que a taxa de recuperação de carbono em alguns casos é ligeiramente inferior a cem por cento para algumas das espécies estudadas, o que não

deixa de fazer sentido pois há sempre uma pequena fracção de CO nos instantes iniciais da combustão que não queima a CO₂ e existirão ainda pequenas perdas devidas a fragmentos sólidos não queimados; noutros casos a taxa de recuperação foi próxima de 100 % conforme a teoria.

6.4 Resistência à Queima

Nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 pode ver-se a representação da resistência à queima $1/K$ em função do diâmetro d das partículas para as três temperaturas do leito, tanto para o carvão de chanfuta e jambirre, como para o carvão de umbila. Na Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 representam-se as evoluções da resistência global à combustão com o diâmetro das partículas para as temperaturas de 750, 820 e 900 °C, e velocidade de $1,5U_{mf}$.

Da análise das evoluções apresentadas constata-se que para os quatro diâmetros ensaiados, em todas as condições de temperatura, a representação de $1/K$ em função do d , de acordo com o modelo proposto, Equação A.7 para o cálculo de $1/K$ e Equação A.14 para o cálculo do diâmetro d , resulta numa curva em que há uma descida inicial muito intensa, e que se deve ao regime transitório de aquecimento da partícula, seguindo-se uma parte em declive perfeitamente definido. A linha termina abruptamente o que é um claro indício de que não há grande fragmentação ao longo da combustão de modo que todas as partículas constituintes da carga apresentam tamanhos idênticos sendo por isso que a respectiva combustão termina em simultâneo. Havendo fragmentação, iriam aparecer partículas de diversos tamanhos e o resultado seria uma linha em forma de U, motivada pela ponta final com o desaparecimento dos fragmentos de menor diâmetro. As evoluções em U foram ser observadas por Pinho (1984), Moreira (2007) e Marques (2007). Teoricamente a evolução da resistência global $1/K$ com o diâmetro deve seguir uma linha de declive positivo ou nulo. Sendo que a linha de declive positivo, com a ordenada na origem maior ou igual a zero, acontece nos casos em que a difusão tem importância na reacção, enquanto o declive nulo verifica-se para reacção de controlo cinético puro. Se a ordenada na origem for nula o controlo é puramente difusivo, ver Equação (6.1).

Existindo o fenómeno de fragmentação das partículas, a forma das curvas tem como causas principais a diminuição do número de partículas no final da queima, bem como o aquecimento e o aumento das partículas nos primeiros instantes após a sua introdução no leito. A fragmentação das partículas constituintes da carga aquando do seu lançamento no leito, devido ao choque térmico, dá origem ao aumento do número de partículas, com o consequente aumento da área de queima, contribuindo desta forma para a diminuição da resistência global. Esta situação ajuda a explicar a diminuição muito rápida da resistência à combustão observada nos primeiros instantes da queima da carga, fenómeno que só é explicado pelo aquecimento das partículas nos casos em que não há fragmentação, como acontece com as partículas aqui estudadas. O desaparecimento de partículas no final da queima deve-se à queima total das partículas de menor tamanho presentes na carga, o que faz com que a área superficial de queima diminua, contribuindo assim para o aumento da resistência à combustão. De acordo com Moreira (2007) este fenómeno explica o rápido aumento da resistência global no final da queima. No presente trabalho não foi feita a avaliação do impacto da fragmentação inicial das partículas e consequente alteração do número de partículas que constituíam as cargas a queimar, o tratamento dos resultados experimentais foi realizado assumindo que a fragmentação não era significativa. Esta suposição faz sentido ao se analisar a evolução de $1/K$ com o diâmetro das partículas pois a descida inicial é perfeitamente justificada com o aquecimento das partículas após a sua

introdução no leito e a ausência de subida do $1/K$ no final é uma evidência clara da ausência de fragmentação, para os carvões vegetais agora estudados.

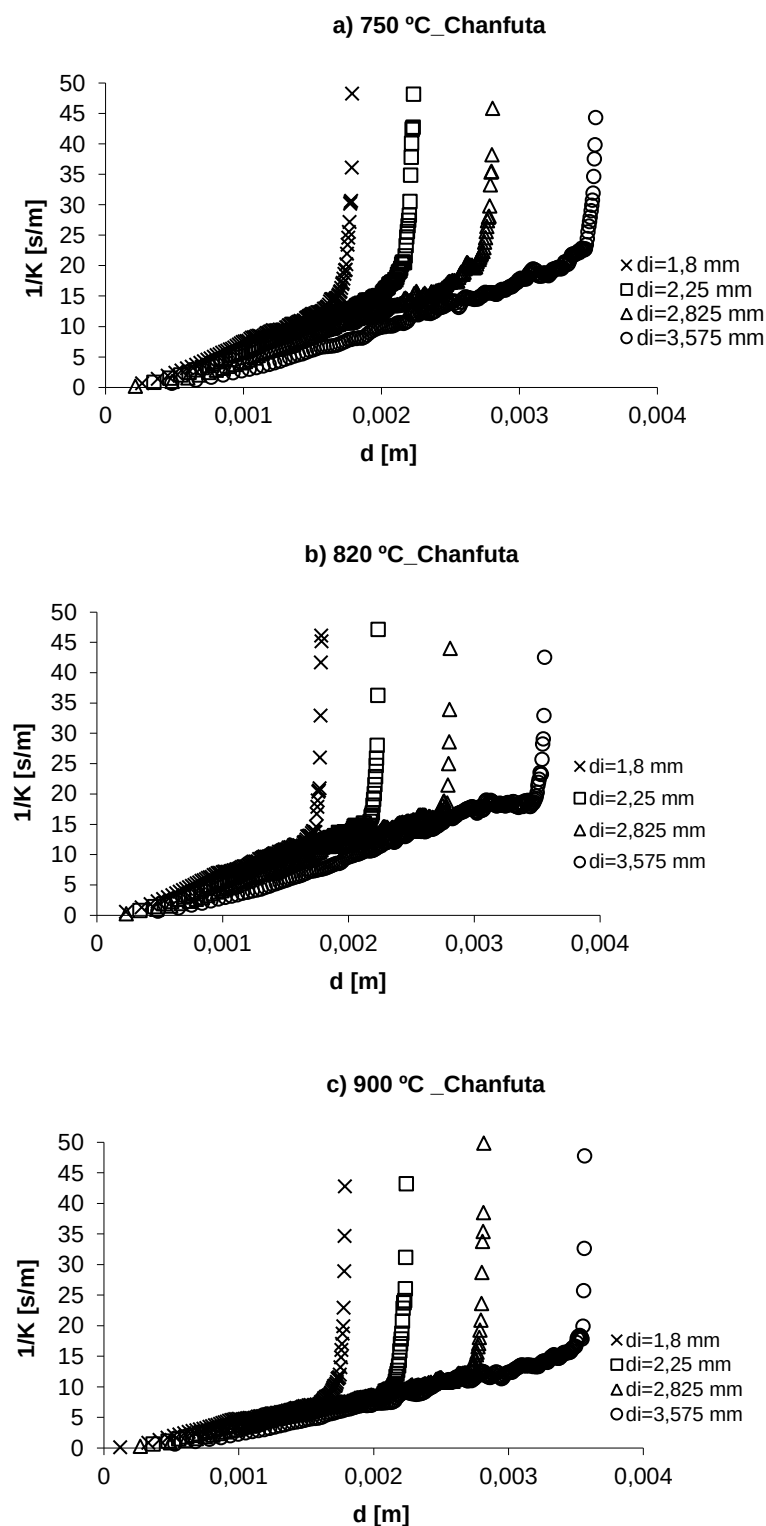


Figura 6.4 Evolução da resistência global à queima com o diâmetro para a temperatura de 750, 820 e 900 °C, para carvão de chanfuta.

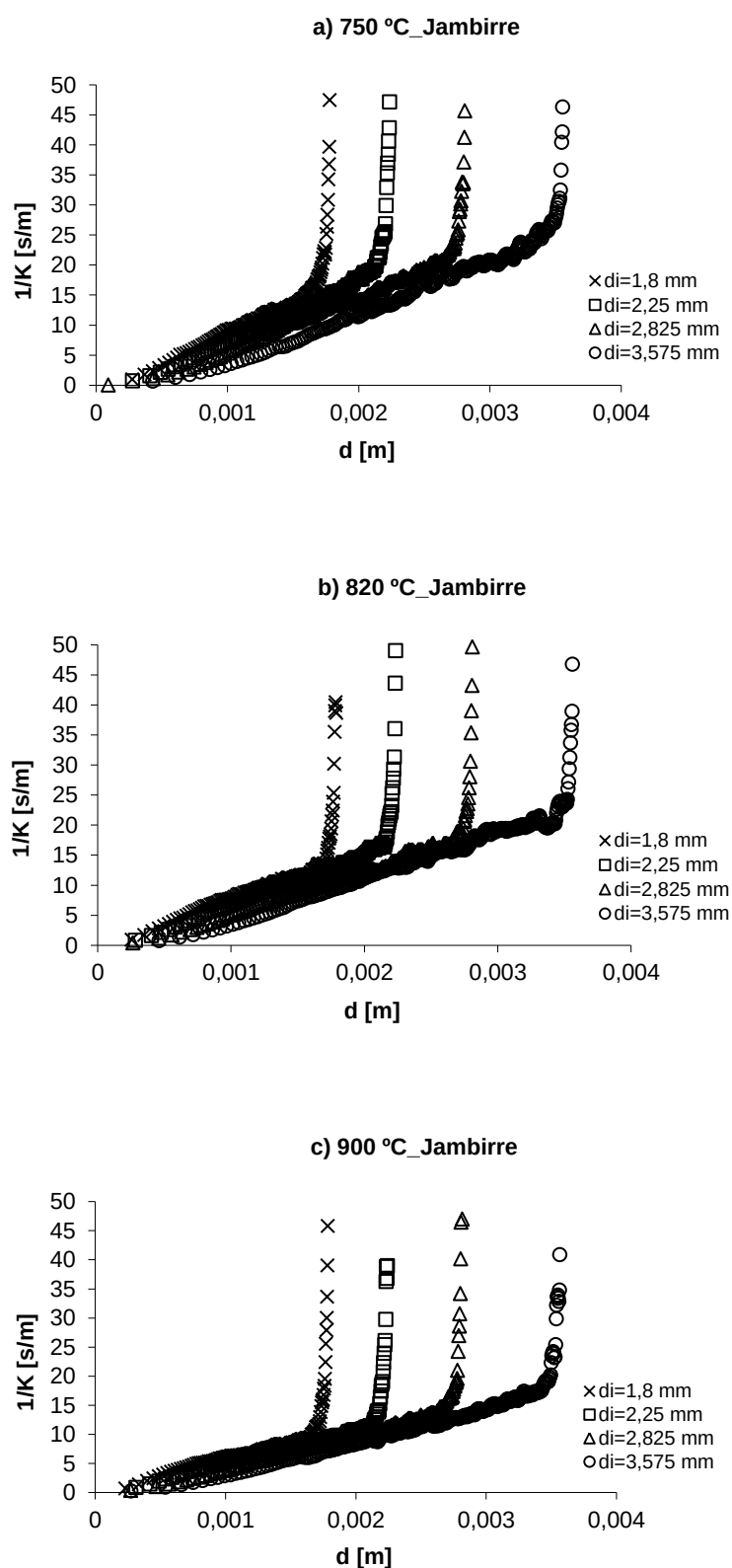


Figura 6.5 Evolução da resistência global à queima com o diâmetro para a temperatura de 750, 820 e 900 °C, para carvão de jambirre.

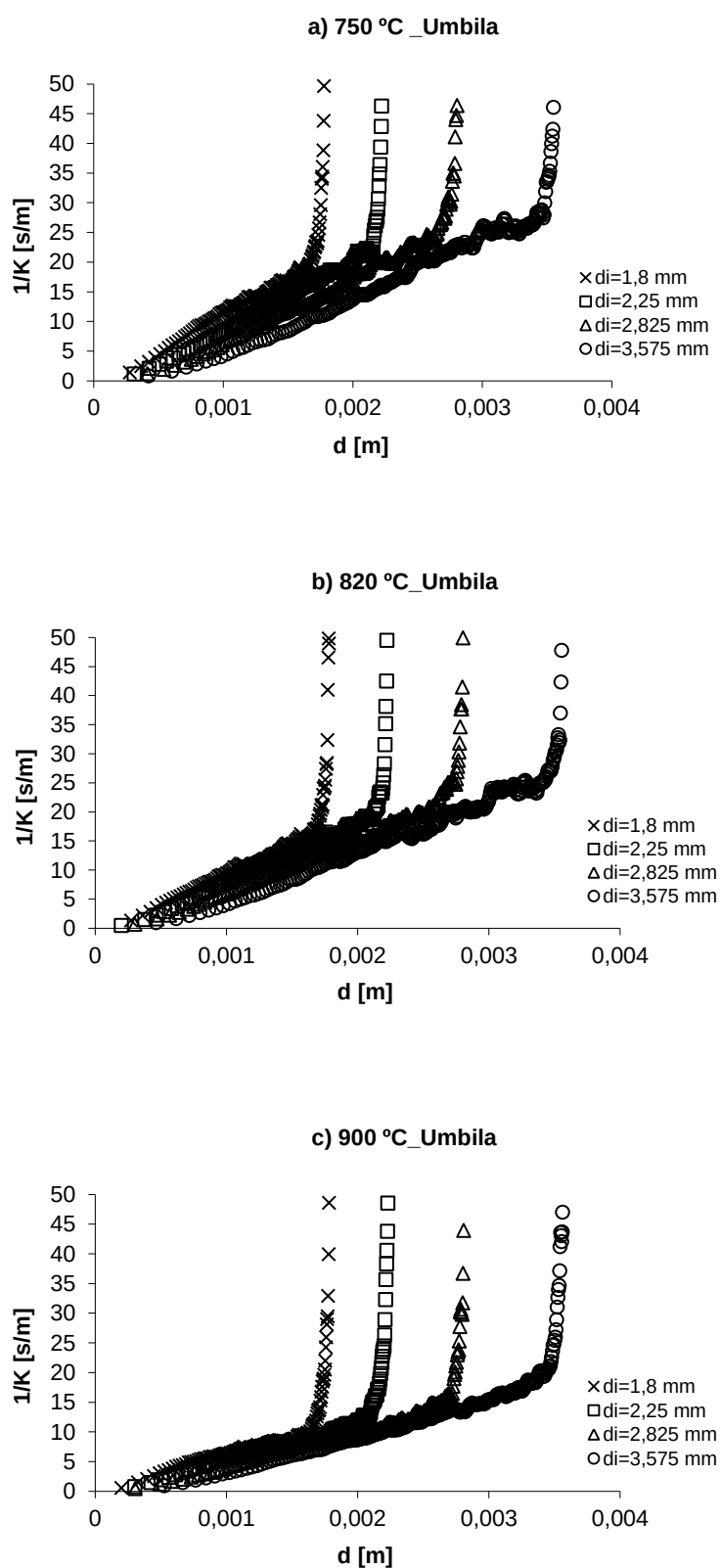


Figura 6.6 Evolução da resistência global à queima com o diâmetro para a temperatura de 750, 820 e 900 °C, para carvão de umbila.

Em todos os ensaios foram utilizados os mesmos tamanhos de partícula, as mesmas condições de queima e a mesma massa inicial da carga.

6.5 Dados Cinéticos e Difusivos para os Três Tipos de Carvões

Observando as três figuras anteriores, verifica-se que considerando apenas os pontos de menor resistência à queima para os quatro diâmetros ensaiados, a evolução de $1/K$ com d estão de acordo com o previsto teoricamente pela Equação (6.1). Sendo assim, é possível determinar os parâmetros cinéticos e difusivos para qualquer instante da queima, para os quatro tamanhos de partículas estudados e para os três carvões. Os pontos mais fidedignos para se tirarem conclusões são os pontos de 50 % de fracção queimada. Os pontos de 25 e 75 % de fracção queimada nem sempre são reprodutíveis, não sendo por isso os valores mais adequados para obtenção de resultados. A seguir são apresentadas as representações gráficas, com os pontos de resistência global de 25, 50 e 75 %, para os carvões de chanfuta, jambirre e umbila e para as três temperaturas utilizados nos ensaios.

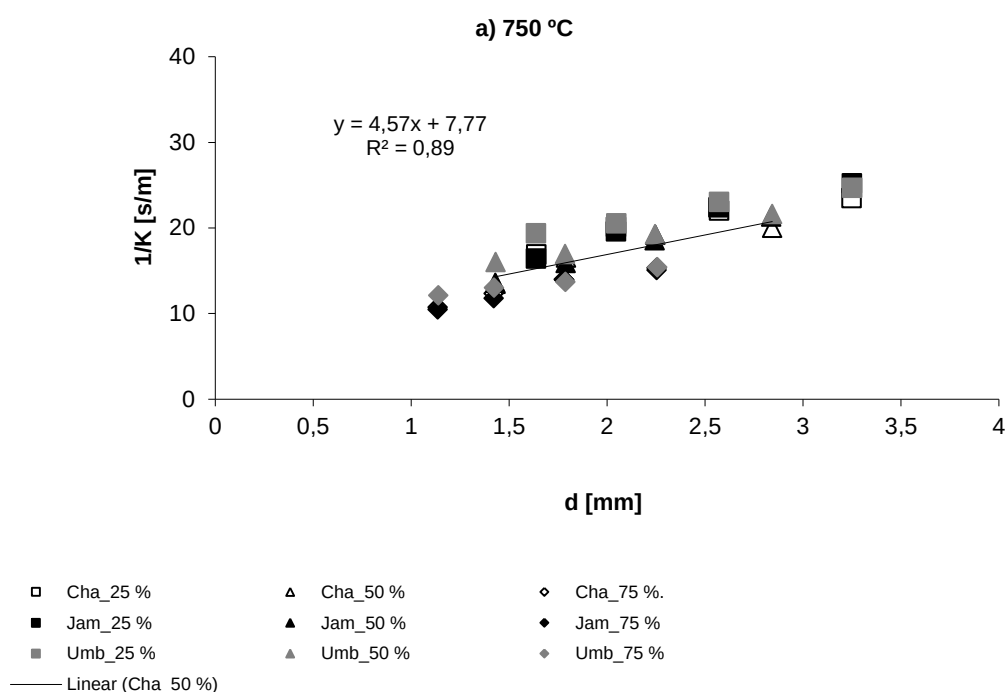


Figura 6.7 Recta de ajuste dos valores médios instantâneos da resistência global a 50 % de queima para partículas de carvão de chanfuta.

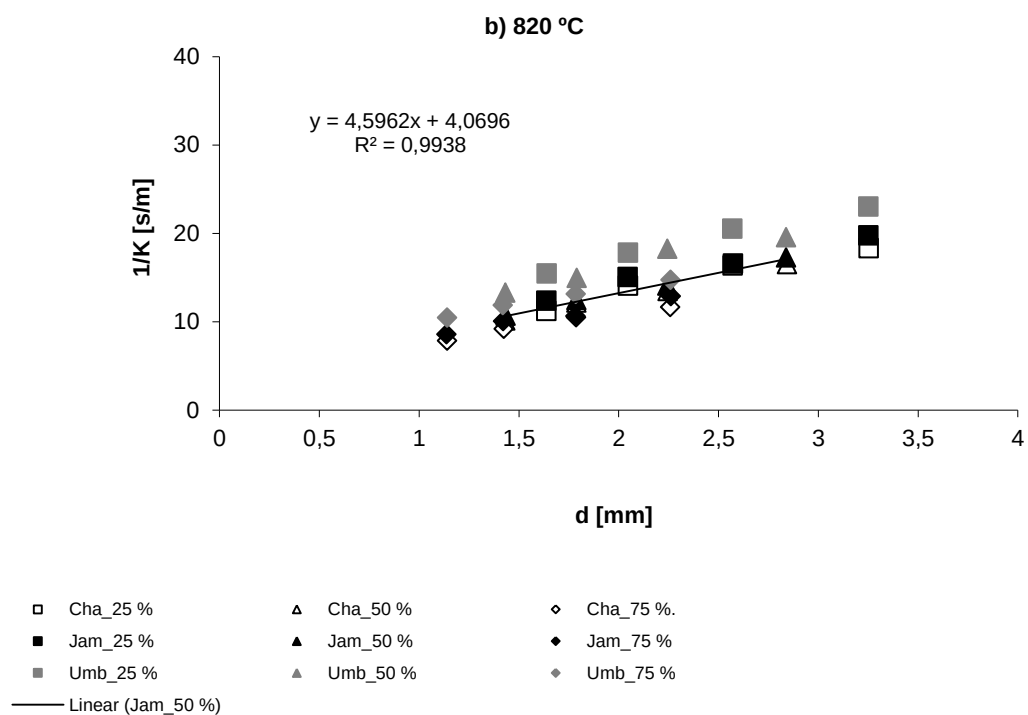


Figura 6.8 Recta de ajuste dos valores médios instantâneos da resistência global a 50 % de queima para partículas de carvão de Jambirre.

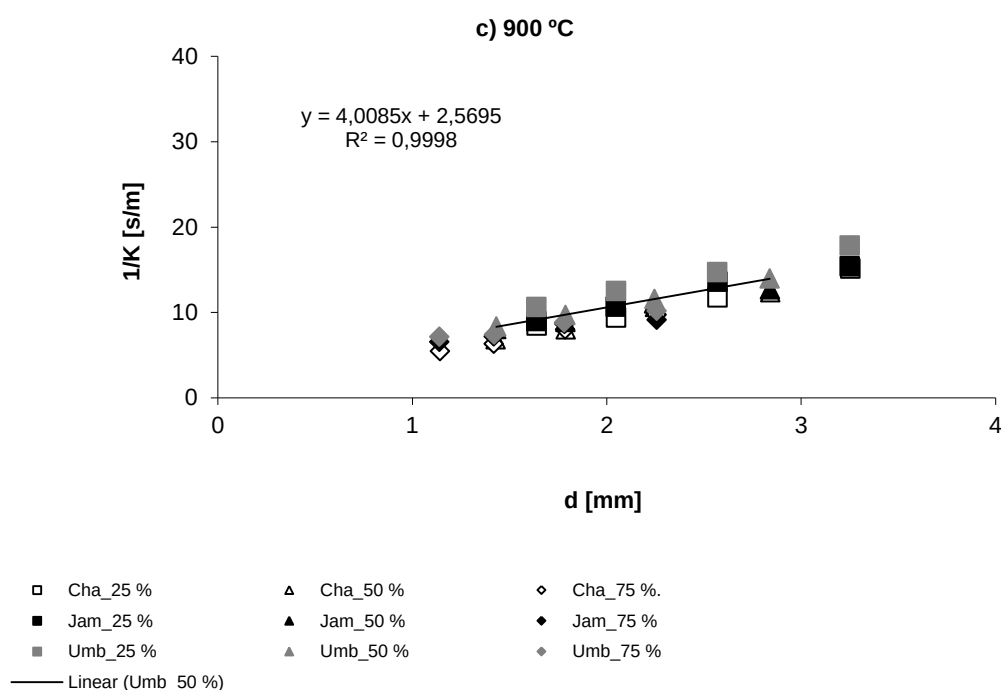


Figura 6.9 Recta de ajuste dos valores médios instantâneos da resistência global a 50 % de queima para partículas de carvão de umbila.

Para se obterem as representações gráficas acima de $1/K$ em função de d foram usados para os quatro tamanhos os valores instantâneos de $1/K$ para 25, 50 e 75 % de fracção queimada e os correspondentes valores de d . As correlações foram obtidas colocando para cada temperatura, o conjunto de pontos ensaiados de 25, 50 e 75 %, para todos os carvões de chanfuta, jambirre e umbila. Para se evitar uma sobreposição de linhas de ajuste, em cada gráfico só se mostra, à vez, a linha de ajustamento para um dos carvões a 50 % de queima; Figuras 6.7 a 6.9, respectivamente para chanfuta, jambirre e umbila.

Analisando os gráficos observa-se uma sobreposição nas correlações para as diferentes espécies nos mesmos valores instantâneos de fracções queimadas. Isto verifica-se para as três temperaturas ensaiadas. Verifica-se também uma diminuição da resistência global à medida que aumenta a temperatura.

Na Tabela 6.2 encontram-se os parâmetros cinéticos, Sh e k_c , calculados de acordo com a Equação (6.1). A determinação dos parâmetros cinéticos apresentados na Tabela 6.2 pressupõe a queima do carbono a CO na superfície da partícula ($C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$), sendo o CO oxidado a CO_2 longe da partícula, tal como já foi referido.

Tabela 6.2 Valores da constante cinética e número de Sherwood.

	T_{leito} [°C]	f [%]	R^2 -	Sh -	k_c [m/s]	Recta de ajuste	
						Ord. Org	Declive
Chanfuta	750	25	0,916	1,918	0,177	11,318	3,905
		50	0,888	1,640	0,257	7,774	4,568
		75	0,959	1,939	0,301	6,640	3,863
	820	25	0,961	1,579	0,418	4,785	4,295
		50	0,987	1,559	0,500	4,001	3,360
		75	0,980	2,017	0,471	4,243	3,362
	900	25	0,984	1,441	1,793	1,116	4,235
		50	0,981	1,502	1,968	1,016	4,062
		75	0,996	1,557	2,180	0,918	3,917
Jambirre	750	25	0,980	1,397	0,246	8,136	5,363
		50	0,994	1,369	0,337	5,942	5,471
		75	0,980	1,689	0,362	5,529	4,439
	820	25	0,984	1,547	0,362	5,530	4,385
		50	0,994	1,476	0,491	4,070	4,596
		75	0,970	1,874	0,438	4,561	3,620
	900	25	0,976	1,494	0,815	2,455	4,083
		50	0,984	1,768	0,666	3,002	3,450
		75	0,939	2,519	0,515	3,886	2,422
Umbila	750	25	0,982	2,198	0,145	13,771	3,408
		50	0,992	1,824	0,202	9,898	4,106
		75	0,985	2,619	0,227	8,796	2,860
	820	25	0,988	1,446	0,248	8,052	4,692
		50	0,949	1,463	0,291	6,876	4,635
		75	0,991	1,808	0,315	6,346	3,753
	900	25	0,999	1,371	0,596	3,356	4,450
		50	0,999	1,522	0,778	2,569	4,009
		75	0,973	2,129	0,547	3,655	2,866

7 Comparação e Avaliação dos Resultados

Para avaliar e comparar os dados cinéticos obtidos com valores existentes na literatura, procedeu-se à determinação das energias de activação. Com o conjunto de valores da constante k_c e respectiva temperatura das partículas obtida pelo balanço energético, é possível obter uma equação de Arrhenius para esta constante da taxa de reacção para os carvões testados. A temperatura das partículas foi determinada analiticamente e verificada experimentalmente.

7.1 Parâmetros Cinéticos

A equação de Arrhenius é largamente utilizada para relacionar a constante da taxa de uma reacção química (constante cinética) com a temperatura, sendo a equação a que se segue:

$$k_c = A \exp[-E_a / \bar{R}T_p] \quad (7.1)$$

Sendo,

A o factor pré-exponencial;

E_a a energia de activação;

$\bar{R}$ a constante universal dos gases perfeitos;

T_p a temperatura absoluta da partícula.

A obtenção dos parâmetros cinéticos A e E_a a partir do conhecimento dos valores experimentais da constante de reacção k_c e da temperatura T_p das partículas pode ser conseguida aplicando logaritmos naturais aos dois membros da Equação 7.1 e representando graficamente $\ln k_c$ versus $1/T_p$, representação de Arrhenius.

$$\ln k_c = \ln A - \frac{E_a}{\bar{R}} \frac{1}{T_p} \quad (7.2)$$

A energia da activação é obtida do declive da recta e da ordenada na origem obteve-se o valor do factor pré-exponencial. Esta prática foi utilizada por vários autores (Marques, 2007; Moreira, 2007 e Beça, 2010) para tratamentos da cinética de reacção de queima ou de decomposição térmica de carvões.

7.2 Temperatura das Partículas

Quando se faz a análise dos resultados da queima de cargas de partículas, para efeitos de tratamento dos dados experimentais e obtenção de parâmetros cinéticos, a temperatura das partículas pode ser considerada idêntica à do leito.

Com efeito está-se a assumir que o reator é isotérmico e considera-se que as partículas constituintes da carga em combustão estão à mesma temperatura do leito. Trata-se de uma aproximação que poderá induzir algum erro nos resultados, já que para partículas de coque a queimar em leito fluidizado a 930 °C, Roscoe *et al.*, (1980), verificaram experimentalmente que as partículas poderiam estar 130 a 160 °C acima da temperatura do leito. No entanto, sendo esta uma constatação experimental, resultando da visualização à superfície das partículas mais brilhantes que o leito, é possível que o seu aparecimento não seja necessariamente representativo da temperatura do grosso das partículas constituintes de uma carga. Existe alguma contradição entre diversos autores que mais recentemente se dedicaram à análise desta questão. Depois de uma revisão dos métodos experimentais e analíticos que têm sido usados para determinar a temperatura das partículas a queimar num leito fluidizado feita por Oka (2004), o mesmo autor concluiu que é necessário mais trabalho de investigação para clarificar este assunto. A título de exemplo salienta-se o trabalho de Khraisha (2005) onde se considera que as partículas queimam à temperatura do leito, enquanto que no trabalho de Komatina *et al.*, (2006) se constata que o tipo de carvão, a dimensão da carga e o teor de O₂ são tudo factores que influenciam a evolução da temperatura das partículas durante a combustão.

Alguns autores referem que o problema do incremento de temperatura das partículas em relação à temperatura do leito não tem sido considerado ou então adopta-se um incremento de temperatura do leito que depende do tamanho inicial da partícula (50 °C para partículas com diâmetro inicial inferior a 1 mm e 150 °C para partículas de diâmetro superior a 1 mm).

7.3 Determinação Semi-Analítica da Temperatura das Partículas

Como alternativa quer às aproximações simplistas quer a medidas experimentais, desenvolve-se seguidamente uma análise baseada num balanço energético a uma partícula de carbono (coque ou carvão vegetal), que é uma das componentes das cargas de partículas que foram queimadas nos ensaios experimentais. Esta análise tem como objectivo determinar a temperatura a que a partícula está a queimar, de modo que os dados cinéticos e difusivos sejam posteriormente determinados em função desta temperatura de queima da partícula.

A análise parte do balanço energético feito a uma partícula de carbono, Figura 7.1, e nela considera-se que o processo de combustão se desenvolve em regime permanente, o que é uma aproximação um pouco forçada, quando se queimam cargas de partículas. Como o resultado final deste desenvolvimento matemático será aplicado durante intervalos de tempo muito pequenos, quando comparados com o tempo de queima das partículas, o valor do calor conduzido para o interior da partícula é desprezado, $\dot{Q}_{s-i} = 0$. Então,

$$\dot{m}_c h_c + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} - \dot{m}_{CO} h_{CO} = \dot{m}_c \Delta h' \quad (7.3)$$

onde,

$\dot{m}_c h_c$ é a energia associada à corrente de carbono consumida no processo de combustão;

$\dot{m}_{O_2} h_{O_2}$ é a energia associada à corrente de O₂;

$\dot{m}_{CO} h_{CO}$ é a energia associada à corrente de CO;

$\Delta h'$ é a entalpia de combustão da reacção $C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$ à temperatura T da partícula.

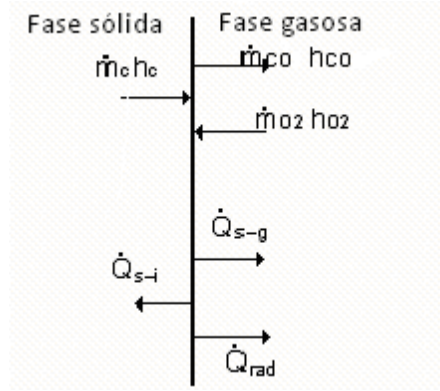


Figura 7.1 Transferência de energia à superfície de uma partícula de carbono a queimar em combustão incompleta à superfície.

O resultado final do balanço energético é dado por:

$$\dot{m}_c \Delta h' + \dot{m}_c c_{pg} (T_p - T_b) \frac{\exp\left(-\frac{\dot{m}_c c_{pg}}{2\pi d k_{tg}}\right)}{\left|1 - \exp\left(-\frac{\dot{m}_c c_{pg}}{2\pi d k_{tg}}\right)\right|} + \varepsilon_p \pi d^2 \sigma (T_p^4 - T_b^4) = 0 \quad (7.4)$$

$\Delta h' = -9211$ kJ/kg para 25 °C, ignorando a sua variação com T ;

T_p e a temperatura da superfície da partícula que se pretende conhecer;

T_b é a temperatura do leito no qual está inserida a partícula;

ε_p é a emissividade de uma partícula de carbono;

σ é a constante de Stefan-Boltzeman;

k_{tg} é a condutibilidade térmica do gás envolvente da partícula e que se pode considerar idêntica à do ar para a temperatura T_b ;

c_{pg} é o calor específico mássico à pressão constante do gás que envolve a partícula;

d é o diâmetro instantâneo da partícula em combustão;

$\dot{m}_c$ é a taxa de queima da partícula que na teoria é dada por:

$$\dot{m}_c = 2M_c \pi d^2 K C_p \quad (7.5)$$

Em que,

C_p é a concentração molar média do O_2 no seio da fase densa do leito;

A determinação semi-analítica da temperatura da partícula T_p foi de acordo com os balanços energéticos à superfície da partícula Equação 7.4 contabilizando o calor gerado na reacção de combustão $C + 1/2 O_2 \rightarrow CO$ de $\Delta h' = -9211$ kJ/kg e as trocas de calor com o leito por condução e radiação. Foram determinados valores de temperatura das partículas para os instantes correspondentes 25, 50 e 75 % de fracção queimada, que constam da Tabela 7.1.

7.4 Obtenção de Parâmetros Cinéticos para os Carvões Estudados

Conhecidos os valores de k_c , assim como a temperatura das partículas, torna-se simples obter a lei de Arrhenius, visto que a equação de Arrhenius relaciona a constante da taxa de reacção química, constante cinética, com a temperatura, Equação (7.1).

Na Tabela 7.1 estão representados valores calculados da temperatura das partículas, de $1/T_p$ e os respectivos valores de $\ln k_c$ para os três carvões vegetais testados. Na Figura 7.2 estão apresentadas as representações de Arrhenius para as três espécies. Desta representação é possível obter uma correlação geral para as três amostras,

De acordo com a lei de Arrhenius,

$$k_c = A \exp\left[-\frac{Ea}{\bar{R}T_p}\right] \quad (7.6)$$

Aplicando logaritmos a ambos os membros da Equação 7.1 obtém-se a Equação 7.6, em que $\ln A$ é a ordenada na origem e $Ea/\bar{R}$ o declive negativo da recta.

Tabela 7.1 Inverso da temperatura da partícula e $\ln k_c$

	T_{leito} [°C]	f [%]	$\ln k_c$ [m/s]	T_p [°C]	$1/T_p$ [1/K]
Chanfuta	750	25	-1,732	808,78	9,24E-4
		50	-1,359	821,52	9,14E-4
		75	-1,201	841,21	8,97E-4
	820	25	-0,872	875,42	8,71E-4
		50	-0,693	885,70	8,63E-4
		75	-0,753	906,42	8,48E-4
	900	25	0,584	947,71	8,19E-4
		50	0,677	957,54	8,13E-4
		75	0,780	977,03	8,00E-4
Jambirre	750	25	-1,402	801,35	9,31E-4
		50	-1,088	810,58	9,23E-4
		75	-1,016	827,62	9,08E-4
	820	25	-1,016	869,29	8,75E-4
		50	-0,711	879,93	8,67E-4
		75	-0,826	897,54	8,54E-4
	900	25	-0,205	944,46	8,21E-4
		50	-0,406	952,47	8,16E-4
		75	-0,664	969,91	8,04E-4
Umbila	750	25	-1,931	796,66	9,35E-4
		50	-1,600	804,32	9,28E-4
		75	-1,483	819,72	9,15E-4
	820	25	-1,394	861,12	8,82E-4
		50	-1,234	868,82	8,76E-4
		75	-1,155	884,45	8,64E-4
	900	25	-0,518	936,71	8,27E-4
		50	-0,251	945,79	8,20E-4
		75	-0,603	959,96	8,11E-4

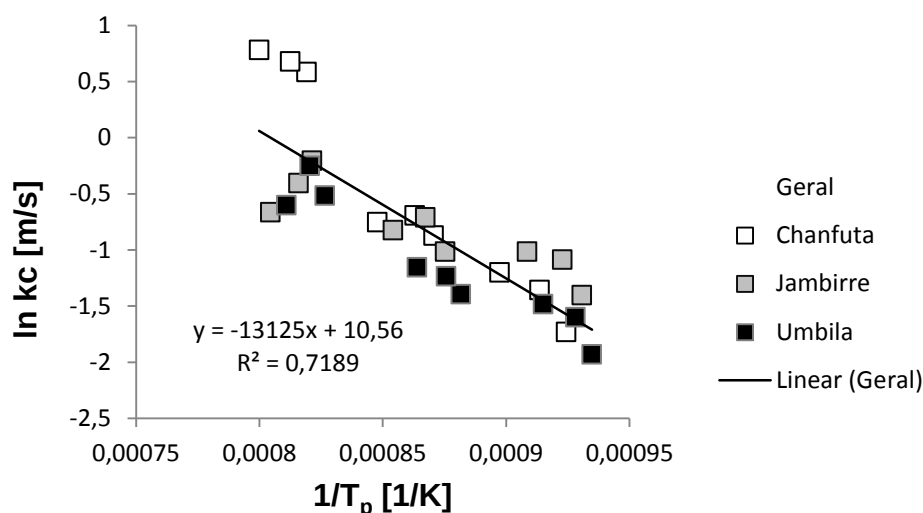


Figura 7.2 Representação de Arrhenius para os três carvões

Na Figura 7.2 mostra-se a representação de Arrhenius geral para os três carvões estudados. A maior discrepância de pontos observada no gráfico corresponde à espécie chanfuta para a queima à temperatura do leito de 900 °C. Esta discrepância pode dever-se ao elevado teor de cinzas presente nestes carvões, que é de cerca de 14 %, valor que é cerca de três vezes superior ao teor de cinzas para a espécie jambirre e umbila, provocando desta forma um efeito catalisador na reacção de queima, com o consequente aumento do valor de k_c , como observado na Tabela 6.2.

Constata-se que o valor da energia de activação obtido para as três espécies em conjunto está dentro da gama dos dados existentes na literatura. Janse *et al.*, (1998) fizeram uma compilação de valores das energias de activação para vários tipos de carvões, em várias condições de queima, existentes na literatura, e reportam valores entre 84,9 e 160 kJ/mol.

A Tabela 7.2 apresenta os valores da energia de activação e o factor pré-exponencial obtidos para os três carvões em conjunto. O valor de 109,1 kJ/mol está dentro da gama indicada acima.

Tabela 7.2 Energia de activação e factor pré-exponencial para as três espécies no geral.

A [m/s]	38552,4
Ea (kJ/mol)	109,1

Substituindo os valores tabelados na equação da lei de Arrhenius obtém-se:

$$k_c = 38552,4 \exp[-109,1 \times 10^6 / \bar{R}T_p] \quad (7.7)$$

7.5 Correlações Individuais

Em complemento à obtenção de uma correlação válida para as três espécies testadas também se obtiveram correlações individuais.

Nas Figuras 7.3, 7.4 e 7.5 estão as representações de Arrhenius para cada uma das três espécies de carvão vegetal ensaiado. Destas representações é possível obter três correlações, uma para cada amostra de carvão.

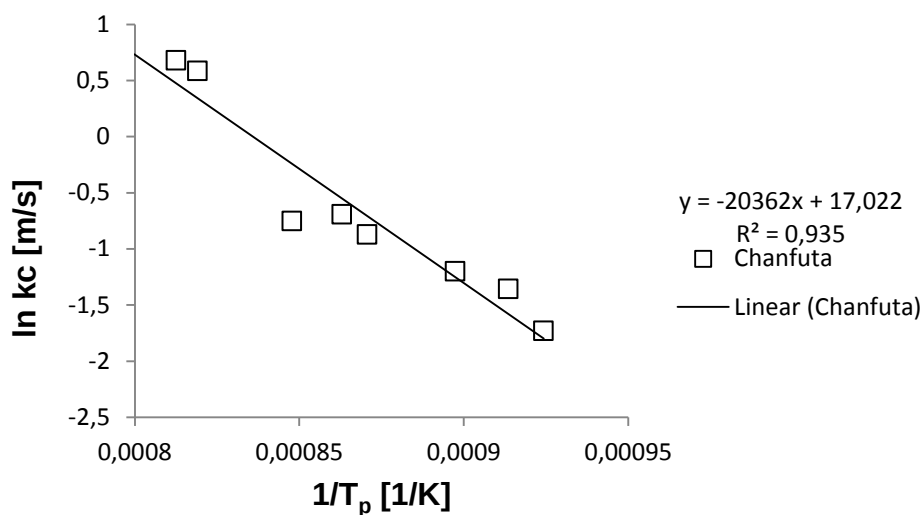


Figura 7.3 Representação de Arrhenius para os Carvões de Chanfuta.

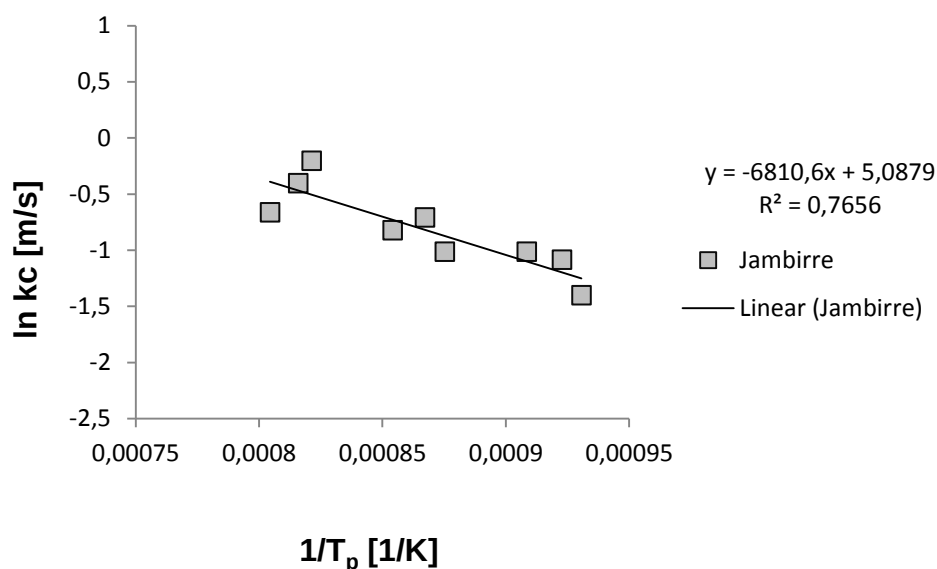


Figura 7.4 Representação de Arrhenius para os Carvões de Jambirre.

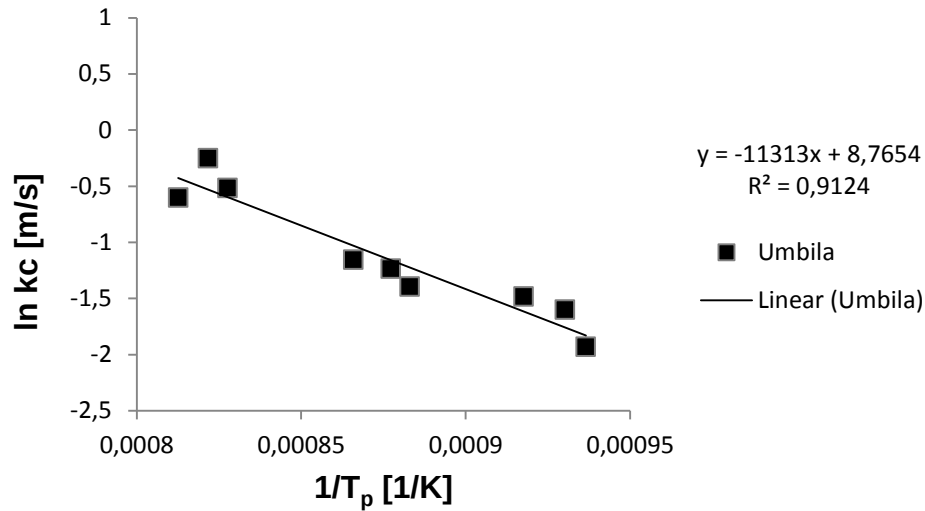


Figura 7.5 Representação de Arrhenius para Carvões de Umbila

Seguindo o método anteriormente explicado para obtenção da energia de activação e factor pré-exponencial pela equação de Arrhenius, pode escrever-se, para as três espécies de carvões as correlações seguintes,

- Para os carvões de chanfuta,

$$k_c = 24692080,7 \exp[-169,3 \times 10^6 / \bar{R}T_p] \quad (7.8)$$

- Para os carvões de jambirre,

$$k_c = 162,0 \exp[-56,6 \times 10^6 / \bar{R}T_p] \quad (7.9)$$

- Para os carvões de umbila,

$$k_c = 6692,6 \exp[-94,7 \times 10^6 / \bar{R}T_p] \quad (7.10)$$

A energia de activação do carvão da espécie jambirre de 56,6 kJ/mol situa-se abaixo do limite mínimo de 84,9 kJ/mol observado por Janse *et al.*, (1998), o que mostra que esta espécie tem uma reactividade elevada quando comparada com outros carvões derivados da madeira, ao passo que a reactividade do carvão da espécie chanfuta se situa ligeiramente acima do limite máximo da gama de reactividade obtida pelos mesmos autores. Para a espécie umbila o valor da reactividade situa-se dentro da gama referida, embora próximo do limite inferior.

As correlações representadas pelas Equações 7.8, 7.9 e 7.10 foram obtidas a partir de valores médios experimentais de k_c e da temperatura da partícula para as três fracções queimadas de 25, 50 e 75 %.

Beça (2011) obteve valores da energia de activação para carvões vegetais, obtidos a partir de cortiça, entre 27 e 97 kJ/mol.

Para se fazer uma melhor avaliação da representatividade dos valores calculados pelas correlações, apresenta-se na Figura 7.6 a comparação dos valores de k_c obtidos experimentalmente com os valores de k_c calculados.

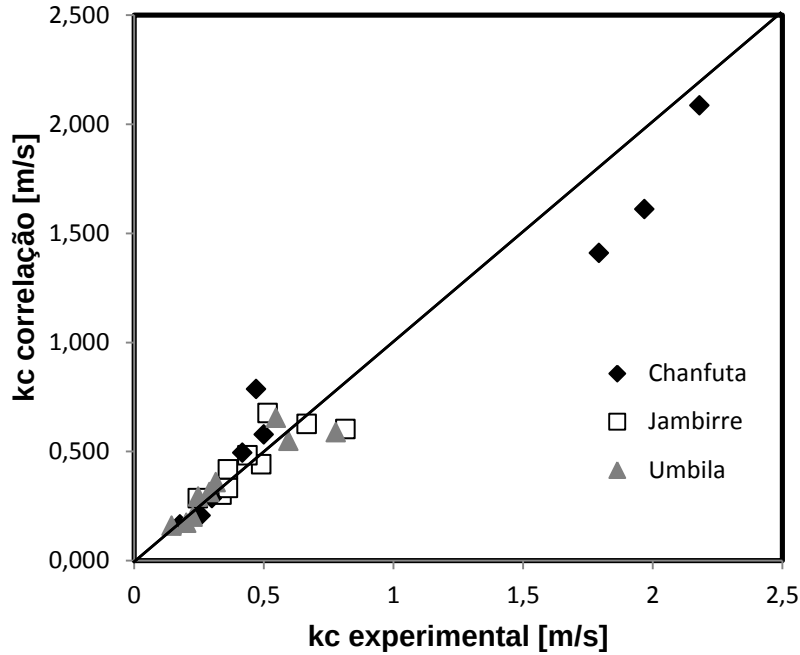


Figura 7.6 Comparação dos valores de k_c calculados pelas correlações 7.8, 7.9, e 7.10 e experimentais para os carvões de chanfuta, jambirre e umbila.

A expressão apresentada por Wen e Chen (1982), referida no trabalho de Moreira (2007), foi usada para o cálculo dos desvios médios entre os valores calculados e experimentais de k_c .

$$\text{Desvio médio} = \sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left(\frac{k_{ci, \text{calculado}} - k_{ci, \text{experimental}}}{k_{ci, \text{experimental}}} \right)^2} \quad (7.11)$$

Onde N_p é o número de pontos a comparar e k_{ci} é o valor de k_c para o ponto i . Aplicando a Equação (7.11) resulta para os três carvões os desvios médios tabelados, indicados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 Valores de desvio médio para as três amostras de carvão vegetal

	Desvio médio [%]
Chanfuta	27
Jambirre	17
Umbila	15
Geral	37

7.6 Temperatura da Partícula Obtida Experimentalmente

Tendo em conta que a determinação da temperatura das partículas é um assunto em aberto e que não reúne consensos, nesta secção apresentam-se os resultados de um estudo experimental da determinação da temperatura da partícula, e que foi levado a cabo com partículas de carvão de chanfuta e umbila, para posteriormente se fazer comparação com as temperaturas das partículas obtidas analiticamente recorrendo aos balanços energéticos.

7.6.1 Procedimento Experimental para os Ensaios de Determinação da Temperatura da Partícula

O procedimento experimental e as condições do leito são semelhantes ao de queima de cargas de carvão, neste caso para além do registo da evolução da concentração molar de CO₂ nos gases queimados, do tempo de queima e da evolução da temperatura do leito também foi registada a evolução da temperatura no interior da partícula.

Foram queimadas partículas isoladas de carvão de chanfuta e umbila, para temperaturas de leito de 750, 820 e 900 °C. As velocidades de fluidização foram idênticas às dos ensaios de queima de partículas. Foram testadas partículas com forma aproximadamente cúbica, obtidas por maquinagem dos carvões. As massas e dimensões das partículas podem ser consultadas na Tabela 7.4.

Para efeitos de cálculo do diâmetro da partícula, foi considerado que o diâmetro da partícula é igual ao diâmetro equivalente baseado no volume multiplicado pela esfericidade das partículas de carvão, e por sua vez o diâmetro equivalente é igual ao diâmetro da esfera com o mesmo volume da partícula, Gupta e Sathiyamoorthy (1999). As equações que se seguem demonstram o procedimento de cálculo do diâmetro da partícula a testar.

Volume da esfera,

$$V = \frac{4}{3}\pi \times \frac{D_{ep}^3}{8} \quad (7.12)$$

Em que

D_{ep} é o diâmetro equivalente da partícula,

V é o volume da amostra de carvão.

A esfericidade da partícula de carvão é calculada com base na seguinte expressão:

$$\phi_c = \frac{A_{sup.e}}{A_{sup.p}} \quad (7.13)$$

em que:

ϕ_c é a esfericidade da partícula de carvão $0 < \phi_c < 1$;

$A_{sup.e}$ é área superficial da esfera de igual volume;

$A_{sup.p}$ é a área superficial da partícula.

Finalmente o diâmetro da partícula é dado por:

$$d_p = D_{ep} \times \phi_c \quad (7.14)$$

Tabela 7.4 Massa e volume das partículas

	T_{leito} [°C]	Volume [m ³]	Massa [g]	d_p [mm]
Chanfuta	750	2,42E-06	1,059	12,66
		9,20E-07	0,427	9,62
		6,16E-07	0,376	8,37
	820	9,8E-07	0,382	9,41
		8,51E-07	0,476	9,49
	900	8,82E-07	0,434	9,22
Umbila	750	8,40E-07	0,316	9,25
		8,64E-07	0,227	9,40
	820	6,00E-07	0,181	8,39
		1,19E-06	0,314	10,51
		8,00E-07	0,233	9,10
	900	8,08E-07	0,239	9,29

Estando o analisador de gás ligado, foi realizada a calibração deste conforme as recomendações do fabricante, e seguiram-se os passos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 dos ensaios de queima da partícula, ver Secção 5.7. Ao fim destes, procedeu-se de seguida aos passos seguintes:

1. As partículas foram maquinadas para se obter uma forma aproximadamente cúbica, pois de entre as formas geométricas mais simples é aquela que em termos de esfericidade se aproxima mais à da esfera;

2. Com ajuda de um paquímetro mediram-se as amostras de carvão de modo a obter o volume e a área superficial;
3. Pesaram-se as amostras;
4. Com uma broca de 1 mm fez-se um furo no centro da amostra;
5. Colocou-se com muito cuidado o termopar no furo efectuado, de modo a garantir que este não se soltasse no decorrer do ensaio;
6. Iniciou-se a aquisição de dados no computador;
7. Colocou-se no interior do leito a partícula com o termopar inserido. O ensaio termina quando o nível de CO₂ era constante e próximo do valor nulo;
8. Repetiu-se o procedimento anterior para diferentes condições experimentais e diferentes partículas.

7.6.2 Evolução da Temperatura das Partículas em Função do Tempo

Os resultados da temperatura das partículas são apresentados nesta secção. O objectivo passa por obter os valores da temperatura no interior das partículas a queimar no leito fluidizado e de seguida fazer uma comparação com a temperatura do leito, e com a temperatura da partícula obtida pelo balanço energético. No entanto só no final da queima é que a temperatura no interior da partícula se aproxima do valor da temperatura à superfície desta. E mesmo assim haverá alguma subjectividade quanto à escolha do período final para efeitos de comparação dos valores de temperatura medidos e calculados, pois certamente que a rigidez do termopar irá afectar o livre percurso que uma partícula segue durante a sua combustão no interior do leito fluidizado.

Para efeitos de comparação considera-se que para o cálculo analítico da temperatura das partículas, a condutibilidade térmica do gás envolvente da partícula é obtida à temperatura do leito e a emissividade da partícula de carbono é de 0,75. No modelo de transferência de calor da partícula foram consideradas a radiação e a condução para o ar de fluidização. Não foram considerados aspectos convectivos tal como no modelo de queima onde se considerou apenas a difusão quando se contabilizaram os mecanismos de transferência de massa.

O valor de emissividade de 0,75 tem a ver com o facto de se ter adoptado um valor médio para o material do leito, areia de sílica e as partículas de carbono. Field *et al.*, (1967) referem 0,8 para partículas de carbono enquanto Boterill (1975) refere máximos de 0,6 para a areia de sílica

Da análise gráfica das representações abaixo verifica-se que a temperatura da partícula aumenta à medida que aumenta o tempo de queima, isto é, à medida que o diâmetro da partícula diminui a temperatura da partícula aumenta. Pode-se considerar que a temperatura da partícula é aquela que é medida quando a área da superfície da partícula a queimar é muito pequena ou quando a partícula esta quase toda queimada, nesta zona o termopar está mais próximo do exterior da partícula, isto é próximo da zona da reacção em fase heterogénea medindo desta forma a temperatura da partícula na zona de reacção.

Geralmente no final de queima quando já não há partícula a queimar, a temperatura da partícula devia ser aproximadamente igual à temperatura do leito, mas esta situação não se verifica em alguns casos. O termopar que lê a temperatura do leito tem um diâmetro (3 mm) seis vezes maior que o diâmetro do termopar que lê a temperatura da partícula (0,5 mm), isto faz com que o termopar maior meça uma temperatura média entre a temperatura das partículas de areia constituintes do leito e a corrente de gás, ar de fluidização e produtos gasosos da combustão, enquanto o termopar de diâmetro menor apenas lê uma temperatura mais próxima da corrente gasosa, e que é em princípio sempre inferior à temperatura média

ponderada medida pelo termopar de maior diâmetro (Boterill, 1975). Também pode-se considerar para esta situação de discrepância na leitura das temperaturas, o facto da existência de gradiente de temperatura dentro do leito que depende da posição do termopar, podendo este estar mas acima ou abaixo do leito, ou ainda encostado à parede do reactor.

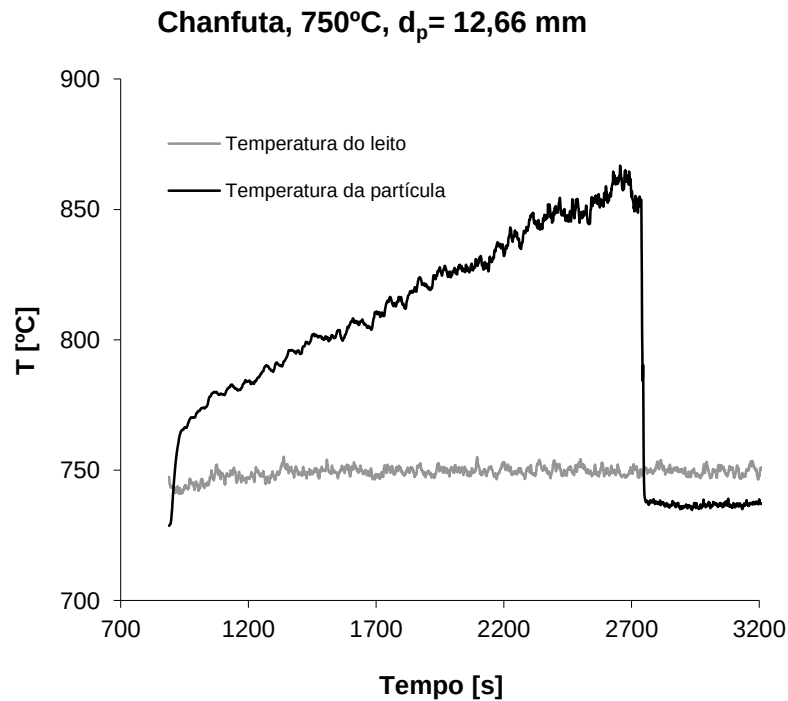


Figura 7.7 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima.

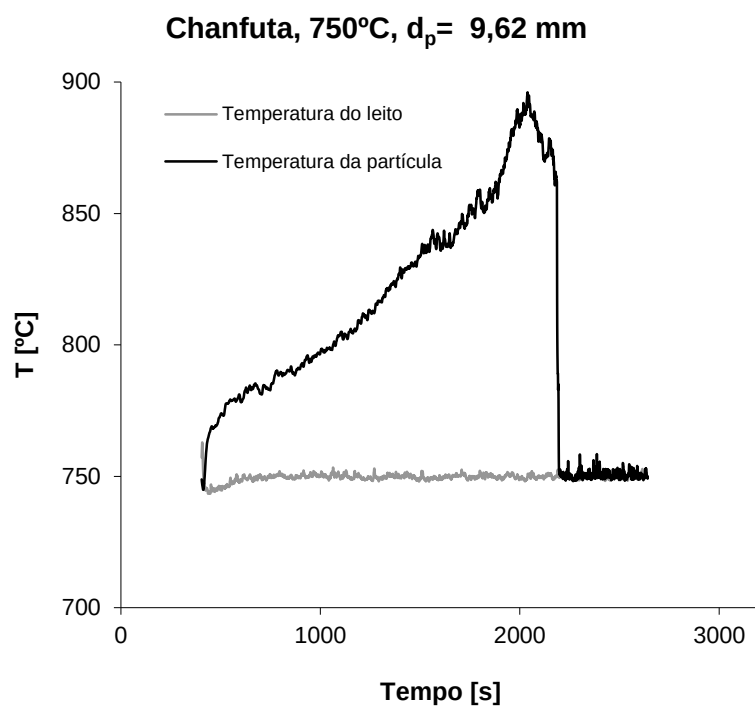


Figura 7.8 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima.

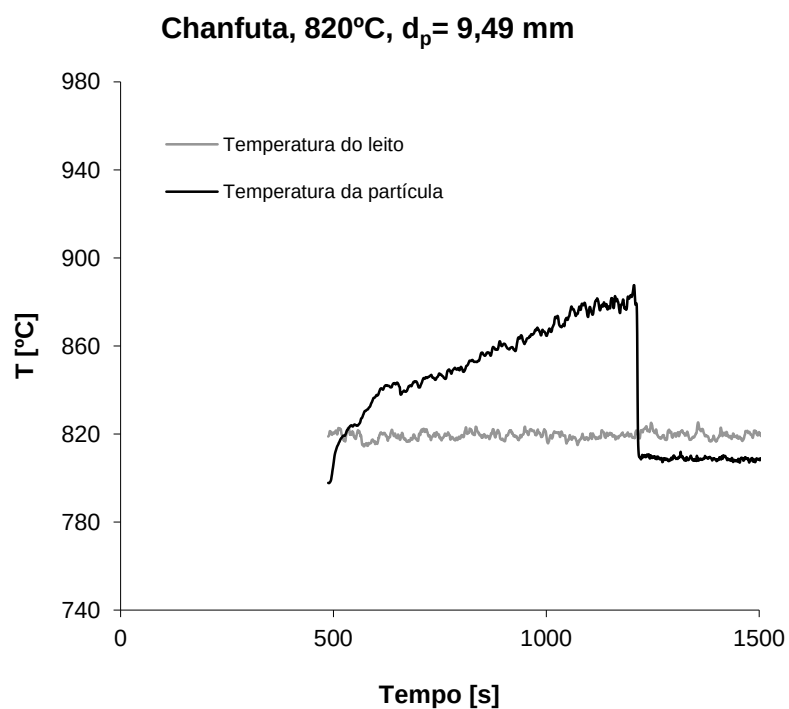


Figura 7.9 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima

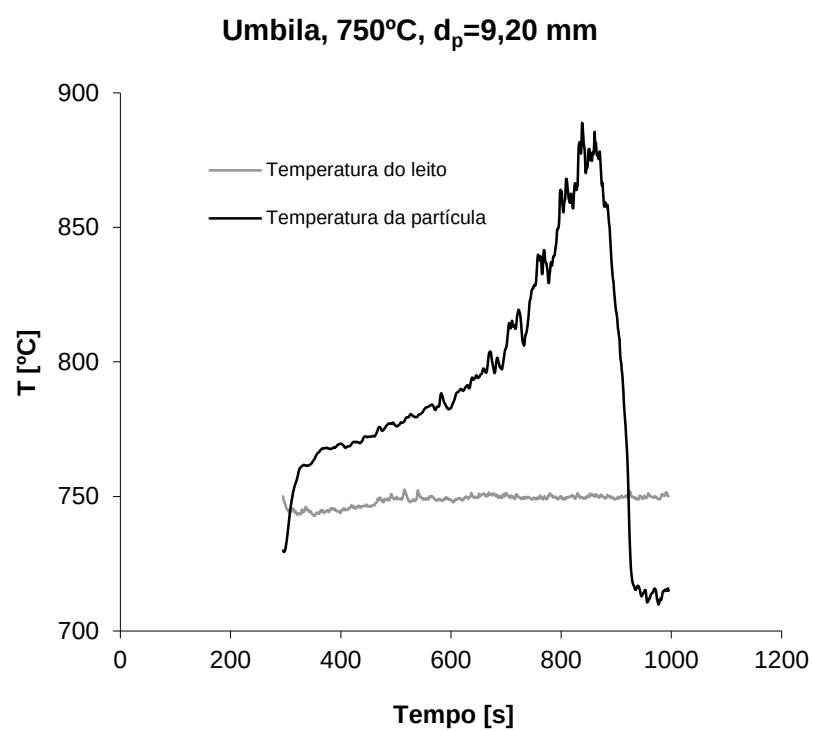


Figura 7.10 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima

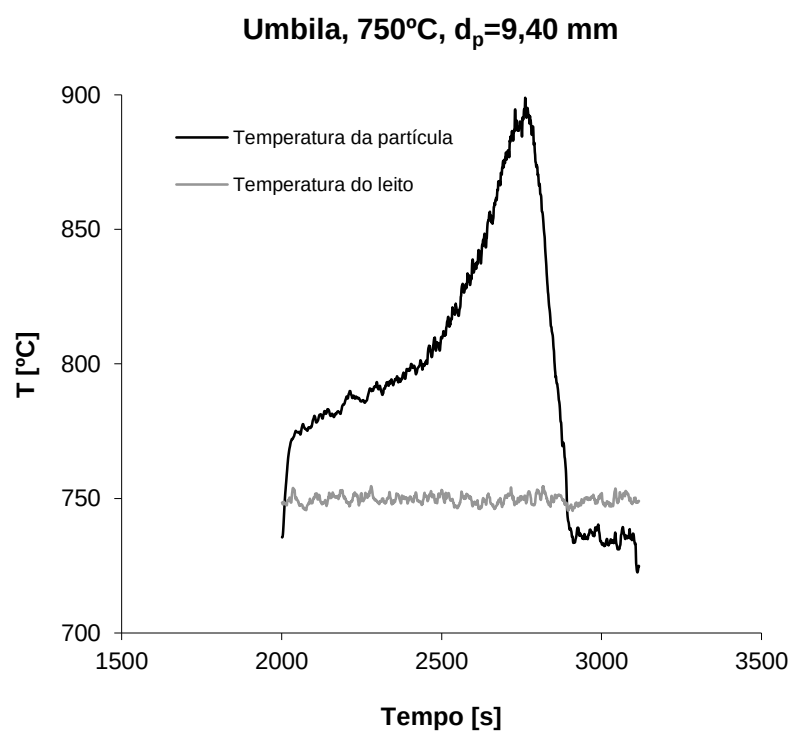


Figura 7.11 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima

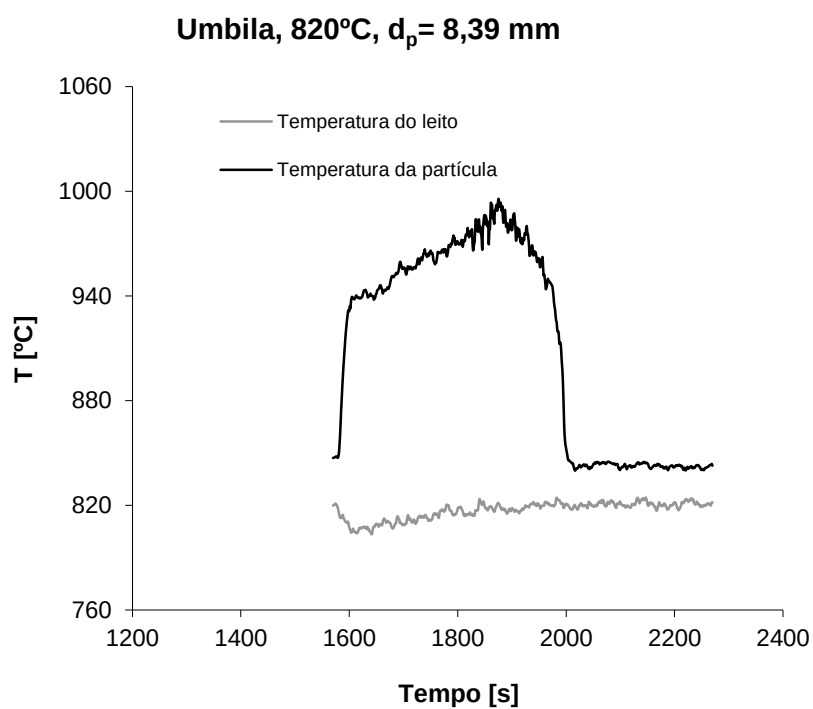


Figura 7.12 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima

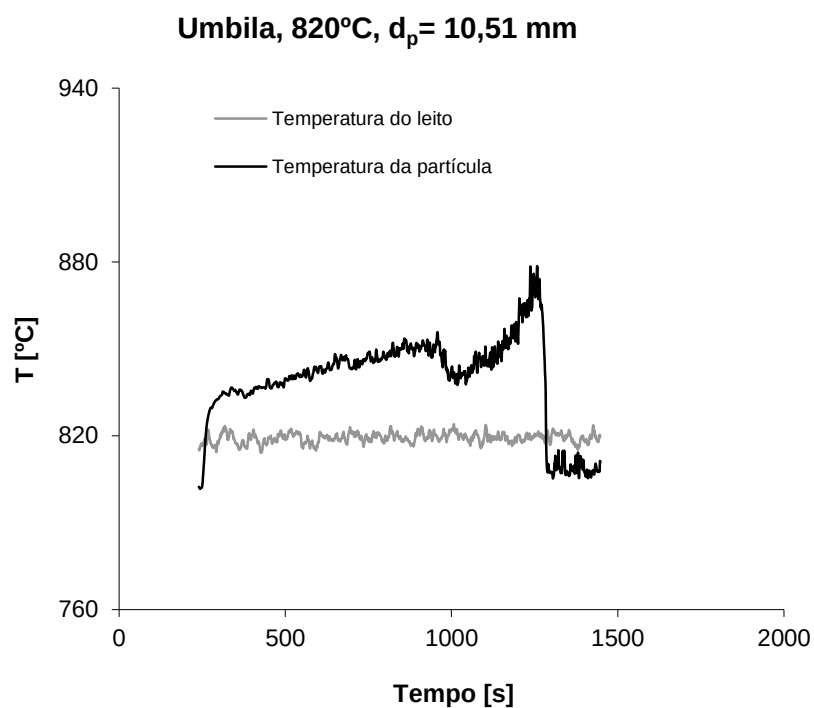


Figura 7.13 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima.

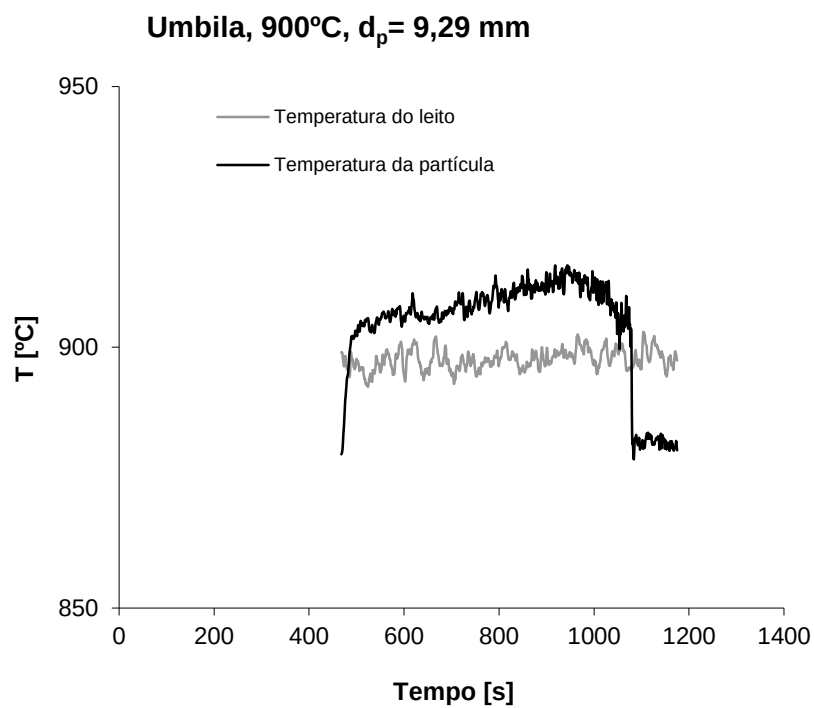


Figura 7.14 Evolução da temperatura da partícula e do leito em função do tempo de queima.

Devido à variação da temperatura no interior da partícula ao longo da combustão certos autores acabam por calcular uma temperatura média, Adánez *et al.*, (2001), para a temperatura da partícula e tiram as suas ilacções em face da referida escolha. No presente trabalho o objectivo imediato foi o de se avaliar se os valores calculados para a temperatura da partícula através do respectivo balanço energético tinham alguma similitude com os valores obtidos pela via experimental.

Tabela 7.5 Valores de temperatura das partículas medidos e valores de temperaturas das partículas semi-analíticos.

	T_{leito} [°C]	f [%]	$T_{\text{p.semi-analítico}}$ [°C]	$T_{\text{p.experimental}}$ [°C]
Chanfuta	750	50	821,52	845,5
	820		885,70	870
	900		957,54	955
Umbila	750		804,32	827,5
	820		868,82	920
	900		945,79	920

Os valores calculados para T_p no instante correspondente à fracção queimada de 50 %, estão próximos da média aritmética das temperaturas medidas a $\frac{1}{2}$ do tempo de teste e no final do tempo de teste.

Chama-se a atenção para o facto de que, tendo tido estas medições de temperatura um primeiro objectivo de avaliação simplista da qualidade do procedimento experimental, as bainhas dos termopares tipo K de 0,5 mm utilizados na medição das temperaturas no interior das partículas serem em aço inoxidável AISI 316. Este material revelou-se ser pouco resistente às temperaturas encontradas assim como à atmosfera redutora existente no interior das partículas onde estavam inseridos. As bainhas deveriam ter sido em INCONEL. Tal facto também veio criar entraves adicionais à qualidade das temperaturas medidas. Contudo como ponto de partida para ensaios mais rigorosos, estes testes cumpriram a sua função.

Há ainda outra discrepância a ter em conta, os valores calculados para a temperatura das partículas foram conseguidos através da análise da taxa de queima de cargas de partículas com tamanhos iniciais na gama dos 1,8 mm a 3,6 mm, enquanto que os valores medidos para as temperaturas no interior das partículas, foram para partículas isoladas cujos diâmetros iniciais andaram na gama dos 8,37 a 12,66 mm. Há claramente diferenças nas condições de operação escolhidas para as duas situações experimentais consideradas, mas isto deveu-se ao facto de a decisão de se avançar para a medição das temperaturas no interior das partículas ter sido tomada numa fase posterior aos ensaios de combustão das cargas, como consequência das dúvidas que entretanto se levantaram com a análise dos resultados da queima das cargas. Para além disso, a medição de temperaturas de partículas de pequenos diâmetros é de materialização mais difícil e exige equipamento mais sofisticado do que o disponível no laboratório.

8 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

No trabalho presente foram estudados carvões vegetais obtidos de três madeiras facilmente encontradas em Moçambique, no que respeita à sua combustão em leito fluidizado borbulhante. Para os ensaios de queima de partículas com o objectivo de se obterem os parâmetros cinéticos e difusivos, foram usadas amostras de 1,5 g de carvão de diâmetros médios 1,8, 2,2, 2,8 e 3,6 mm, e temperaturas do leito de 750, 820 e 900 °C. Para os ensaios de determinação da temperatura da partícula a queimar isoladamente foram usadas partículas de carvão de diâmetros compreendidos entre 8,37 e 12,66 mm e massas entre 0,181 e 1,059 g, com a mesma gama de temperatura dos ensaios anteriores.

Obtiveram-se dados referentes à cinética e difusão. Com base nos dados cinéticos, foi possível obter correlações de Arrhenius, quer para o conjunto das espécies em geral, quer espécie a espécie. Da análise dos resultados obtidos, concluiu-se que as energias de activação são relativamente baixas quando comparadas com dados existentes na literatura para carvões derivados da madeira.

Foram feitos ensaios de medição da temperatura da partícula para os carvões de chanfuta e umbila, inserindo um termopar no interior da partícula a queimar, observando-se que a temperatura no interior da partícula aumenta com o aumento do tempo de queima. Estes valores medidos de temperatura foram comparados com valores calculados.

Sugere-se para trabalhos futuros que a queima de partículas seja da gama de tamanhos das usadas para medir a temperatura das partículas. Sugere-se também a realização de ensaios de determinação da temperatura da partícula usando termopares de Inconel 600 e diâmetro inferior a 0,5 mm, para minimizar a limitação dos movimentos da partícula dentro do leito.

Finalmente, sugere-se que o estudo seja alargado a outras espécies lenhosas aplicando a mesma metodologia, para estender a gama de dados sobre o tema.

Referências

- Adánez, J., de Diego, L.F., García-Labiano, F., Abad, A., Abanades, J.C. (2001) *Determination of Biomass Char Combustion Reactivities for FBC Applications by a Combined Method*, Ind. Eng. Chem. Res., 40, 4317–4323.
- Avedesian, M.M, Davidson, J.F., (1973), *Combustion of Carbon Particles in a Fluidised Bed*, Trans. Inst. Chem. Engrs., 51,121.
- Basu, P., Broughton, J., Elliott, D.E., (1975), *Combustion of single coal particle in fluidized beds*, Institute of fuel Symposium Series No. 1: Fluidised Combustion, artigo A3.
- Batidzirai, B., Faaij APC., Smeets, E., (2006), *Biomassa and Bioenergy supply from Mozambique*, Energy for Sustainable Development, 54,81.
- Beça, A.M.S., (2011), *Estudo Prévio da Queima de Carvão de Cortiça em Leito Fluidizado e Obtenção de Dados Cinéticos*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Botteril, J.S.M., (1975), *Fluid-Bed Heat Transfer*, Academic Press, London.
- Brow S., (1997), *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forest*, FAO, Forestry Paper No 134, pp. 1-16.
- Cuvilas, C.A., Jirjis, R., Lucas, C., (2010), *Energy situation in Mozambique: A review*, Renewable and Sustainable, 14, 2139.
- Darton, R.C., La Nauze, R.D., Davidson, J.F, Harrison, D., 81977), Trans. Inst. Chem. Engrs. 55, 274.
- Davidson, J.F., Harrison, D., (1963), *Fluidised Particles*, Cambridge University Press.
- Demirbas, A., (2009), *Green Energy and Technology*, Springer, London.
- El Bassam, N., (2010), *Handbook of Bioenergy Crops*, Earthscan, London.
- Fennell, P.S., Kadchha, S., Lee, H., -Y., Dennis, J.S., Hayhurst, A.N., (2007), “The Measurement of the Rate of Burning of Different Coal Chars in an Electrically Heated Fluidized Bed of Sand”, Chemical Engineering Science, 62, 608-618.
- Field, M.A., Gill, D.W, Morgan, B.B. e Hawksley, P.G.W, 1967, *Combustion of Pulverised Coal*, BCURA, Leatherhead
- Geldart, D., (1986), *Gas Fluidization Technology*, Jonh Willey and Sons, New York.
- GRNB., (2008), *Avaliação dos níveis de consumo da energia da biomassa nas províncias de Tete, Nampula, Zambézia, Sofala, Gaza e Maputo*.
- Guedes de Carvalho, J.R.F., Pinto, A.M.F.R, Pinho, C.M.C.T., (1991), *Mass Transfer Around Carbon Particles Burning in Fluidised Beds*, Trans. Inst. Chem.Engrs., Vol.69, Part A
- Gupta, C.K., Sathiyamoorthy, D., (1999) *Fluid Bed Technology in Materials Processing*, CRC Press.
- GREENPRO, (2004), *Bioenergia*.
- Hovmand, S., Freedman, W, Davidson, J.F., (1971), Trans. Inst. Chem. Engrs. 79, 149.
- IEA, (2010), http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf.
- Janse, A.M.C., de Jonge, H.G., Prins, W., van Swaaij, W.P.M., (1998), *Combustion Kinetics of Char Obtained by Flash Pyrolysis of Pine Wood*, Ind. Eng.Res.,37, 3909-3918.
- Jenkins, D., (2010), *Wood Pellet Heating Systems*, Earthscan, London.
- Khraisha, Y. H., (2055), *Batch Combustion of Oil Shale Particles in Fluidized Bed Rector*, Fuel Processing, Technology, 86, pp. 691-706.
- Klass, D.L., (1998), *Biomass for Renewable Energy Fuels, and Chemicals*, Academic Press, London.

- Komatina, M., Manovic, V. Dakic, D., (2006), *An Experimental Study of Temperature of Burning Coal Particle in Fluidized bed*, Energy and Fuels, 20, pp. 114-119.
- Kunni, D., Levenspiel, O., (1991), *Fluidization Engineering*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, Boston.
- Marques, M.A.A., (2007), *Estudo Preliminar das Taxas de Reacção de Carvão de Pinheiro Manso em Leito Fluidizado*, Dissertação de Mestrado em Fundamentos e Aplicações de Mecânica de Fluidos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Mello, M.G., (2001), *Biomassa*, Belo Horizonte.
- Mesa, J.M., Rocha, J.D., Olivares, E., Barboza, L.A., Brossard, L.E., Brossard Junior, L.E., (2003), *Pirólise rápida em leito fluidizado: Uma opção para transformar biomassa em energia limpa*, Revista Analytica, Maio 2003, N°4.
- Ministry for Co-Ordination of Enveronmental Affairs (MICOA), (2003), *Mozambique initial national communication under UN framework convention on climate change*, <http://unfccc.int/resource/docs/natc/moznc1.pdf>.
- Moreira, N.A.R., (2007), *Caracterização da Combustão de Carvões Vegetais em Leito Fluidizado*, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para o grau de Doutor em Engenharia Mecânica, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Obernberger, I., Thek, G., (2010), *The Pellet Handbook*, Earthscan, London.
- Oka, S.N., (2004), *Fluidized Bed Combustion*, Marcell Dekker, Inc.
- Otieno H.O., Awange, J.L., (2006), *Energy Resources in East Africa*”, Springer, Berlin.
- Pinho, C.M.C.T., (1984), *Combustão de coque em leito fluidizado: recolha de dados cinéticos à escala laboratorial*, Tese de Doutoramento apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica e gestão Industrial.
- Pinho, C.M.C.T., (2009 a), *Sebenta de Combustão*, DEMEC, FEUP.
- Pinho, C.M.C.T., (2009 b), *Considerações sobre a queima de carvões vegetais em regime permanente num leito fluidizado borbulhante*, Sumário pormenorizado da lição conforma definido no Decreto-Lei 239/2007 de 19 de Junho, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial.
- Ribeiro, L.J.S., (1996), *Combustão de bolhas de propano e de metano na superfície livre de um leito fluidizado*, Tese de mestrado, Universidade do Porto.
- Ribeiro, L.J.S., (2002), *Combustão de Propano em Leito Fluidizado de Areia*, Tese de doutoramento, Universidade do Porto.
- Ribeiro, L., Pinho, C., (2006), *Combustion of Slugs of propane and Air Moving Up Trough an Incipiently Fluidized Bed*, Combustion Theory and Modelling, Vol. 11, No. 3.
- Ribeiro, L., Pinho, C., (2009), *A simple Approach to Numerical Modeling of Propane Combustion in Fluidized Beds*, Chem. Eng.Comm., 196:305-329.
- Ribeiro, L., Pinho, C., (2004), *Generic Behavior of Propane Combustion in Fluidized Beds*, Trans. I. Chem. E., Part A.
- Roscoe, J.C., Kwiatkowski, A.R., Harrison, D., (1980), *The Temperature of Coke Particles in Fluidised Combustor*, Trans. Inst. Chem. Engrs., Vol. 58, p. 69-72.
- Ross, I.B., Davidson, J.F., (1981), *The Combustion of Carbon Particles in a Fluidized Bed*, Trans. Inst. Chem. Engrs., Vol.59.
- Ross, I.B., (1979), *The Efficiency of Fluidized Bed Combustion*, Ph.D. dissertation, University of Cambridge.
- Saxena, S.C., Jotshi, C.K., (1994), *Fluidized-bed Incineration of Waste Materials*, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.20.

Sitoe, A.A., Tchaúque, F., (2007), *Avaliação integrada das florestas em Moçambique*, Ministério da Agricultura-Direcção Nacional de Terra e Florestas.

Vasco H., Costa M., (2009), *Quantification and use forest biomass residues in Maputo province, Mozambique*, *Biomass and Bioenergy*, 33-1221.

WEC, (2010, http://www.worldenergy.org/documents/wec_combined.pdf.

Wen, C.Y., Chen, L.H., (1982), *Fluidized bed freeboard phenomena: entrainment and elutriation*, *AIChE Journal*, 28, 117-128.

White, F., (1991), *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill.

ANEXO A: Determinação da Resistência Global de Combustão pela Teoria de Fluidização em Duas fases

- **Constante da Taxa de Reacção**

O método para determinação da constante da taxa de reacção que a seguir se propõe assume que a temperatura da partícula T_p é a constante ao longo da queima. Assume ainda que o oxigénio reage na fase densa de acordo com uma taxa de reacção de primeira ordem:

$$R_{O_2} = Kc_p \quad (A.1)$$

onde R_{O_2} é a taxa de consumo de oxigénio por unidade de volume da fase densa e c_p é a concentração molar de oxigénio na fase densa.

A massa de carbono m_c de uma carga de carvão de massa m é dada por

$$m_c = f_c m \quad (A.2)$$

onde f_c é a fracção mássica de carbono numa carga (carbono fixo, obtido da análise imediata ao carvão)

De igual modo, pode escrever-se que

$$\rho_c = f_c \rho_{carvão} \quad (A.3)$$

sendo $\rho_{carvão}$ a massa volúmica da partícula de carvão (determinada com porosímetro de mercúrio), e ρ_c a massa de carbono por unidade de volume da partícula. Considera-se que a massa de carbono se distribui igualmente pelo volume da partícula.

Assim sendo, considerando uma carga com a massa m , o número de partículas de carvão (ou carbono) N_c existente na carga é dado por,

$$N_c = \frac{6m_c}{\rho_c \pi d_i^3} \quad (A.4)$$

d é o diâmetro da partícula num determinado instante e K é a constante global da taxa de reacção. Para uma carga de partículas, a taxa instantânea de consumo de carbono é $N_c R_0$. Considerando o volume da fase densa $H_{mf} A_t$, pode escrever-se que

$$N_c R_0 = k c_p H_{mf} A_t \quad (A.5)$$

onde H_{mf} é a altura do leito no regime de fluidização incipiente e A_t é a área da secção recta do leito. Fazendo a mudança de variável $k' = k H_{mf} / U$, onde U é a velocidade de aproximação, e substituindo na equação acima, vem

$$k' = \frac{12d^2 K m_c}{\rho_c d_i^3 A_t U} \quad (\text{A.6})$$

A resistência global à queima, $1/K$, pode ser obtida modificando a Equação (A.6),

$$\frac{1}{K} = \frac{12d^2 m_c}{\rho_c d_i^3 A_t U k'} \quad (\text{A.7})$$

O valor de k' é obtido da expressão Davidson e Harrison (1963)

$$\frac{c_H}{c_0} = \beta e^{-x} + \frac{(1 - \beta e^{-x})^2}{k' + 1 - \beta e^{-x}} \quad (\text{A.8})$$

onde c_H é a concentração molar de oxigénio à saída do leito ($= c_0 - C_{CO_2}$, da estequiometria), c_0 é a concentração molar de oxigénio à entrada do leito e $\beta = 1 - U_{mf}/U$; X é o número de vezes que o gás dentro da bolha é trocado com a fase densa durante a subida da bolha no leito, Hovmand *et al.*, (1971).

$$X = \frac{10H_{mf}}{d_{eb}(g d_{eb})^{1/2}} \left[U_{mf} + \frac{0,61\varepsilon_{mf}}{1 + \varepsilon_{mf}} D_G \left(\frac{g}{d_{eb}} \right)^{1/4} \right] \quad (\text{A.9})$$

Na expressão g é a aceleração de gravidade, ε_{mf} é a porosidade da fase densa nas condições de fluidização incipiente, D_G é a difusividade do oxigénio no ar, e d_{eb} é o diâmetro equivalente das bolhas dado por, Darton *et al.*, (1977),

$$d_{eb} = 0,54(U - U_{mf})^{0,4} (h + \sqrt[4]{A_0})^{0,8} / g^{0,2} \quad (\text{A.10})$$

onde h é a altura no leito acima do distribuidor e A_0 é a razão entre a área do distribuidor e o número de furos. Para o cálculo de X admite-se que as bolhas têm diâmetro constante e igual ao calculado para $h = H_{mf}/2$,

A determinação do diâmetro d para um instante t_f da queima faz-se recorrendo à massa de carbono consumida até esse instante m_{cf} . O valor da massa de carbono consumida é obtido por integração da curva da concentração de CO_2 à saída do leito, entre o instante inicial da queima e o tempo t_f ,

$$m_{cf} = 12\dot{V}_{ar}\tilde{n} \int_0^{t_f} \vartheta_{CO_2} dt \quad (\text{A.11})$$

onde ϑ_{CO_2} é a fracção molar ou volúmica de CO_2 nos gases queimados, $\dot{V}_{ar}$ o caudal volúmico de ar à pressão e temperatura ambientes e $\tilde{n}$ é o número de moles de CO_2 por unidade de volume ($= 4,231 \times 10^{-2}$ kmol/m³ para qualquer gás perfeito à temperatura e pressão ambiente).

Admitindo que o número de partículas no leito é constante ao longo da queima, o diâmetro das partículas no instante t_f pode ser obtido de

$$d = \sqrt[3]{d_i^3 - \frac{6m_{cf}}{\pi\rho_c N_c}} \quad (\text{A.12})$$

Definindo a fracção queimada f no instante t_f por

$$f = \frac{m_{cf}}{m_c} \quad (\text{A.13})$$

e substituindo N_c , definido pela Equação (A.4) na equação (A.13), pode-se ter o diâmetro das partículas em cada instante em função da fracção queimada,

$$d = d_i(1 - f)^{1/3} \quad (\text{A.14})$$

ANEXO B: Análise dos Carvões Estudados

Nas tabelas seguintes estão apresentados os dados da Análise Imediata constante dos Boletins de Ensaio fornecidos pelo LNEG, Laboratório de Caracterização de Combustíveis assim como os valores das massas específicas obtidos pelo método do porosímetro de mercúrio, fornecidos pela FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto).

Tabela B.1 Análise imediata da amostra de carvão de chanfuta.

Determinação	Método	Unidade	Resultado	
			Como recebido	Base seca
Humidade total	EN 1860-2	% (m/m)	0,8	-
Matérias voláteis	EN 1860-2	% (m/m)	10,7	10,8
Cinzas (a 750 °C)	EN 1860-2	% (m/m)	14,0	14,1
Carbono Fixo	ASTM 3172	% (m/m)	74,5	75,1

Tabela B.2 Propriedades físicas da amostra de carvão de chanfuta.

	Método	Unidade	Resultado
Massa específica	Porosímetro	g/cm ³	0,7351

Tabela B.3 Análise imediata da amostra de carvão de jambirre.

Determinação	Método	Unidade	Resultado	
			Como recebido	Base seca
Humidade total	EN 1860-2	% (m/m)	3,0	-
Matérias voláteis	EN 1860-2	% (m/m)	5,6	5,8
Cinzas (a 750 °C)	EN 1860-2	% (m/m)	3,9	4,0
Carbono Fixo	ASTM 3172	% (m/m)	87,5	90,2

Tabela B.4 Propriedades físicas da amostra de carvão de chanfuta

	Método	Resultado	Unidade
Massa específica	Porosímetro	0,6072	g/cm ³

Tabela B.5 Análise imediata da amostra de carvão de umbila

Determinação	Método	Unidade	Resultado	
			Como recebido	Base seca
Humidade total	EN 1860-2	% (m/m)	3,0	-
Matérias voláteis	EN 1860-2	% (m/m)	4,5	4,6
Cinzas (a 750 °C)	EN 1860-2	% (m/m)	2,6	2,7
Carbono Fixo	ASTM 3172	% (m/m)	89,9	92,7

Tabela B.6 Propriedades físicas da amostra de carvão de chanfuta

	Método	Resultado	Unidade
Massa específica	Porosímetro	0,4645	g/cm ³