

ELAINE REIS DE CARVALHO RABELO

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL SOBRE
INCANDESCÊNCIA EM ESPÉCIMES DE MADEIRA**

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia do Campus de
Guaratinguetá, Universidade
Estadual Paulista, para a obtenção
do título de Doutor em Engenharia
Mecânica na área de Transmissão e
Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Gurgel Veras

Guaratinguetá
2003

Aos meus pais e meu marido que sempre me apoiaram e incentivaram e, em especial, à minha filha Érica que me acompanhou durante nove meses desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. João Andrade de Carvalho Jr., que na sua imensa sabedoria orientou-me com muita paciência e simplicidade durante o desenvolvimento deste trabalho, aumentando a minha admiração e estima;

Ao Dr. Carlos Alberto Gurgel Veras, que mais do que co-orientador, orientou-me como um amigo;

Ao Dr. Messias Borges Silva pelo seu valioso apoio e colaboração no projeto;

Ao Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE, pela eficiente infraestrutura oferecida para a realização dos ensaios;

Ao Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, pela formação teórica e acadêmica a mim oferecida;

À FAPESP, pelo amparo em projeto e bolsa, processo 99/04663-5;

Ao Dr. Marco Aurélio Ferreira pelas discussões e idéias fornecidas;

Ao Dr. José Augusto Jorge Rodrigues pela ajuda e colaboração nas análises de caracterização realizadas;

Ao Sr. José Carlos dos Santos, pelo apoio técnico e logístico;

Às bibliotecárias Maria Aparecida e Maria Ignês pela atenção e presteza em fornecer as bibliografias necessárias;

À colega e amiga Cristiane Ribeiro de Carvalho pela excelente assistência na área de Informática.

Ao pessoal da Oficina do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão.

RESUMO

Este trabalho trata da combustão sem chama, denominada incandescência, em espécimes de madeira. O estágio de incandescência é muito comum em queimadas florestais, ocorrendo após o período de chamas, quando a biomassa de tamanho maior permanece fumegando por até vários dias. Este material, em estado de incandescência, é foco permanente de emissão de gases tóxicos bem como de re-ignição de biomassa não queimada. Os objetivos principais do trabalho são: verificar experimentalmente os parâmetros que favorecem o início e a continuidade do processo de incandescência e quantificar as concentrações de CO, CO₂, O₂ e HC durante a queima. Também serão determinadas temperaturas, em diferentes pontos dos corpos de prova, a velocidade da frente de incandescência e, finalmente, a taxa de queima. Os ensaios foram feitos em um forno de 1,80 m de comprimento por 0,60 m de diâmetro, conectado a um controlador de temperatura, com vazões de ar de combustão previamente estabelecidas. Além da vazão de ar, outros parâmetros também variaram, como a temperatura interna do forno, a espécie da madeira, o volume e a umidade da amostra. Para otimizar a execução dos testes foi aplicada a técnica de “Projeto de Experimentos”. Os ensaios de laboratório foram comparados com os resultados obtidos em uma queimada realizada no interior da floresta Amazônica, no norte do estado de Mato Grosso.

Palavras chave: Combustão em Madeira, Incandescência, Queimadas.

ABSTRACT

This work investigates non flaming combustion in biomass logs. The process is called smouldering combustion. The occurrence of smouldering is very common in forest fires, where the large sized biomass remains fuming for several days. The material in the state of is a source of toxic gases and of ignition for unburned biomass. The main goals of the work are experimentally check the parameters that favor initiation and permanence of the smouldering process and measure CO, CO₂, O₂ and HC concentrations during the burning. The velocity of the smouldering front was determined by thermocouples placed in different points of the biomass sample. The average burning rate was also determined. The tests were performed in a furnace of 1.80 m length by 0.60 m diameter. A temperature controller was used to set the desired furnace temperature. The mass flow rate of air was controlled by valves and measured with rotameters. Tests were conducted for different biomass species and sample volumes and moisture contents. To optimize the number of tests the technique “Project of Experiments” was applied. Results of the laboratory tests agreed well with those obtained in the Amazon forest, in the north of the state of Mato Grosso, Brazil.

Keywords: Biomass Combustion, Smouldering, Forest Clearing Experiment.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Posicionamento do Problema.....	1
1.2 – Caracterização da Madeira.....	4
1.3 – Propagação da Incandescência – Direta e Reversa.....	5
1.4 – A Incandescência em Incêndios.....	6
1.5 – Modelos Disponíveis.....	7
1.6 – Incandescência Permanente e Transiente.....	8
1.7 – Processo de Decomposição Térmica da Madeira durante a Queima.....	9
1.8 – Objetivos do Trabalho.....	12

CAPÍTULO 2 – AMOSTRAS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

2.1 – Preparação das Amostras.....	13
2.2 – Caracterização do Material.....	13
2.2.1 – Porosimetria.....	13
2.2.2 – Picnometria.....	14
2.2.3 – Perda de Massa em Termobalança.....	15
2.2.4 – Análise de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio da Biomassa.....	17
2.3 – Equipamentos.....	18
2.4 – Ensaio Preliminares.....	23
2.5 – Projeto de Experimentos.....	24
2.6 – Procedimentos dos Ensaio.....	28

CAPÍTULO 3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

3.1 – Descrição dos Resultados.....	29
3.2 – Análise dos Resultados Utilizando “Planejamento de Experimentos”.....	71
3.3 – Comentários sobre os Resultados Usando “Planejamento de Experimentos”.....	73
3.4 – Resultado da Análise de Cromatografia do Alcatrão.....	78
3.5 – Análises de CHN das Cinzas e de Composição de Elementos da Madeira e das Cinzas Produzidas.....	79

3.6 – Comparação dos valores de velocidade da frente incandescente da literatura com àqueles encontrados nos ensaios de laboratório.....	81
CAPÍTULO 4 – OBSERVAÇÕES SOBRE INCANDESCÊNCIA EM QUEIMADA FLORESTAL	
4.1 – Local do Ensaio.....	83
4.2 – Tipos de Incandescência Observados após a Queimada Florestal.....	83
4.3 – Descrição dos Dados de Temperatura e Velocidade de Queima nos Troncos.....	97
4.4 – Conclusões sobre os Experimentos de Campo.....	120
CAPÍTULO 5 - MODELO NUMÉRICO PARA A PROPAGAÇÃO DA INCANDESCÊNCIA EM TRONCOS DE MADEIRA	
5.1 – Introdução – Modelos Disponíveis.....	125
5.2 – Descrição do Modelo.....	128
5.2.1 – Solução numérica.....	128
5.2.2 – Condições de contorno.....	130
5.3 – Conservação de Energia e o Transporte de um Escalar.....	131
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO	
6.1 – Conclusões Gerais.....	141
6.2 – Recomendações para Trabalho Futuro.....	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	144
ANEXO 1.....	148

LISTA DE TABELAS

2.1 – Resultados obtidos da análise de porosimetria.....	14
2.2 – Resultados obtidos da análise de picnometria.....	15
2.3 – Resultados obtidos da análise de CHN.....	17
2.4 – Matriz originária dos Arranjos Ortogonais com 3 níveis – L18.....	26
2.5 – Matriz experimental.....	27
2.6 – Fatores e níveis utilizados na matriz experimental.....	27
3.1 – Valores obtidos nas respostas para os 18 ensaios realizados.....	71
3.2 – Resultados dos efeitos sobre as respostas.....	72
3.3 – Resultado da análise de CHN nas cinzas.....	79
3.4 – Resultado da análise de composição de elementos das cinzas.....	80
3.5 – Resultado da análise de composição de elementos da madeira utilizada.....	81
3.6 – Velocidade da frente de incandescência para diversos materiais.....	82
4.1 – Velocidade média dos troncos monitorados.....	120
4.2 – Características dos troncos monitorados.....	123
4.3 – Resultados das Análises Termogravimétricas.....	124

LISTA DE FIGURAS

1.1 – Esquema de reação global para o processo de incandescência.....	4
1.2 – Esquema mostrando os períodos de queima da madeira.....	10
2.1 – Análise de Termobalança da espécie embaúba “preta”.....	16
2.2 – Análise de Termobalança da espécie embaúba “pata de anta”.....	16
2.3 – Análise de Termobalança da espécie embaúba “branca”.....	17
2.4 – Esquema do forno de ensaios.....	19
2.5 – Fotografia do forno desenvolvido para ensaios.....	20
2.6 – Esquema do condensador de alcatrão.....	20
2.7 – Fotografia do condensador de alcatrão.....	21
2.8 – Fotografia do analisador de gases.....	21
2.9 – Controlador de temperatura, sistema de aquisição de dados de temperatura e quadro de disjuntores.....	22
2.10 – Esquema da disposição dos termopares na amostra.....	23
2.11 – Esquema da metodologia aplicada no “Projeto de Experimentos”.....	24
3.1 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº. 5.....	31
3.2 – Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 5.....	31
3.3 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 5.....	32
3.4 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº. 9.....	33
3.5 – Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo para o ensaio nº. 9.....	34
3.6 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 9.....	34
3.7 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº. 11.....	36
3.8 – Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 11.....	36
3.9 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 11.....	37
3.10 – Amostra após experimento realizado.....	37
3.11 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº. 3.....	39
3.12 – Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 3.....	39

3.13 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 3.....	39
3.14 – Variação das temperaturas T ₁ a T ₅ em função do tempo, para o ensaio nº. 1.....	41
3.15 – Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 1.....	42
3.16 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.1.....	42
3.17 – Variação das temperaturas T ₁ a T ₅ em função do tempo, para o ensaio nº.15.....	43
3.18 – Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 15.....	44
3.19 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 15.....	44
3.20 – Variação das temperaturas T ₁ a T ₅ em função do tempo, para o ensaio nº. 2.....	46
3.21 – Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 2.....	46
3.22 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.2.....	47
3.23 – Variação das temperaturas T ₁ a T ₅ em função do tempo, para o ensaio nº.8.....	48
3.24 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.8.....	48
3.25 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.8.....	49
3.26 - Variação das temperaturas T ₁ a T ₅ em função do tempo, para o ensaio nº.12.....	50
3.27 – Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.12.....	51
3.28 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.12.....	51
3.29 - Variação das temperaturas T ₁ a T ₅ em função do tempo, para o ensaio nº.13.....	53
3.30 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.13.....	53
3.31 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.13.....	54
3.32 - Variação das temperaturas T ₁ a T ₅ em função do tempo, para o ensaio nº.4.....	55
3.33 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.4.....	56
3.34 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.4.....	56
3.35 - Variação das temperaturas T ₁ a T ₅ em função do tempo, para o ensaio nº.14.....	57
3.36 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.14.....	58
3.37 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.14.....	58

3.38 - Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.17.....	59
3.39 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.17.....	60
3.40 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.17.....	60
3.41 - Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.16.....	61
3.42 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.16.....	62
3.43 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.16.....	62
3.44 - Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.10.....	63
3.45 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.10.....	64
3.46 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.10.....	64
3.47 - Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.18.....	65
3.48 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.18.....	66
3.49 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.18.....	66
3.50 - Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.6.....	68
3.51 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.6.....	68
3.52 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.6.....	68
3.53 - Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.7.....	69
3.54 - Variação das concentrações de CO, CO ₂ e O ₂ em função do tempo, para o ensaio nº.7.....	70
3.55 - Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.7.....	70
4.1 – Tronco incandescente ilustrando os diferentes processos na incandescência.....	84
4.2 – Troncos fibrosos queimando por incandescência.....	85
4.3 – Tronco em brasa, produzindo grande quantidade de cinzas.....	89
4.4 – Incandescência no cruzamento de dois troncos.....	87
4.5 – Incandescência em cruzamento de troncos de diferentes diâmetros.....	87
4.6 – Incandescência em cruzamento com vários troncos.....	87
4.7 – Onda de incandescência propagando-se apenas na metade inferior do tronco.....	88
4.8 – Tronco oco, de 30 cm de diâmetro, queimando sem chamas, internamente, com as cinzas sendo depositadas em sua casca inferior.....	89

4.9 – Tronco maciço, com 26 cm de diâmetro, queimando lentamente como um cigarro.....	90
4.10 – Propagação da onda de incandescência na casca de um tronco de 53 cm de diâmetro.....	91
4.11 – Incandescência na lateral de tronco com 25 cm de diâmetro.....	92
4.12 – Tronco com vários pontos em incandescência.....	92
4.13 – Tronco da Figura 12 após 24 horas de queima.....	92
4.14 – Tronco com pontos incandescentes e chama, produzindo muita fumaça.....	93
4.15 – Tronco incandescente sobre um “tapete” de cinzas.....	94
4.16 – Tronco (≈ 20 m) após algumas horas em incandescência.....	95
4.17 – Vista panorâmica onde focos de incandescência são identificados.....	95
4.18 – Outra vista panorâmica dos focos de incandescência.....	96
4.19 – Esquema de monitoramento dos troncos.....	97
4.20 – Perfil de temperatura na região da extremidade em incandescência.....	98
4.21 – Fotografia do tronco nº. 1, no dia seguinte à queimada.....	99
4.22 – Fotografia do tronco nº. 1, dois dias após a queimada.....	99
4.23 – Fotografia do tronco nº. 1, três dias após a queimada.....	100
4.24 – Fotografia do tronco nº. 2, no dia seguinte à queimada.....	101
4.25 – Fotografia do tronco nº. 2, dois dias após a queimada.....	102
4.26 – Fotografia do tronco nº. 2, três dias após a queimada.....	102
4.27 – Fotografia do tronco nº. 3, no dia seguinte à queimada.....	103
4.28 – Fotografia do tronco nº. 3, dois dias após a queimada.....	103
4.29 – Fotografia do tronco nº. 3, três dias após a queimada.....	104
4.30 – Fotografia do tronco nº. 4, no dia seguinte à queimada.....	105
4.31 – Fotografia do tronco nº. 4, dois dias após a queimada.....	105
4.32 – Fotografia do tronco nº. 4, três dias após a queimada.....	106
4.33 – Fotografia do tronco nº. 5, no dia seguinte à queimada.....	107
4.34 – Fotografia do tronco nº. 5, dois dias após a queimada.....	107
4.35 – Fotografia do tronco nº. 5, três dias após a queimada.....	108
4.36 – Fotografia do tronco nº. 6, no dia seguinte à queimada.....	109
4.37 – Fotografia do tronco nº. 6, dois dias após a queimada.....	109
4.38 – Fotografia do tronco nº. 6, três dias após a queimada.....	110
4.39 – Fotografia do tronco nº. 7, no dia seguinte à queimada.....	111

4.40 – Fotografia do tronco nº. 7, focalizando a região (cruzamento) com oscilações entre chama e incandescência.....	111
4.41 – Fotografia do tronco nº. 7, na extremidade incandescente.....	112
4.42 – Fotografia do tronco nº. 8, no dia seguinte à queimada.....	113
4.43 – Fotografia do tronco nº. 8, dois dias após a queimada.....	113
4.44 – Fotografia do tronco nº. 8, três dias após a queimada.....	113
4.45 – Fotografia do tronco nº. 9, no dia seguinte à queimada.....	115
4.46 – Fotografia do tronco nº. 9, dois dias após a queimada.....	115
4.47 – Fotografia do tronco nº. 9, três dias após a queimada.....	116
4.48 – Fotografia do tronco nº. 10, no dia seguinte à queimada.....	117
4.49 - Fotografia do tronco nº. 10, dois dias após a queimada.....	117
4.50 - Fotografia do tronco nº. 10, três dias após a queimada.....	117
4.51 – Fotografia do tronco nº. 11, no dia seguinte à queimada.....	118
4.52 – Fotografia do tronco nº. 11, dois dias após a queimada.....	119
4.53 - Fotografia do tronco nº. 11, três dias após a queimada.....	119
4.54 – Perfil de velocidade da frente de incandescência dos troncos monitorados.....	121
5.1 – Volume de controle unidimensional para discretização dos pontos.....	132
5.2 – Estimativa numérica para distribuição da temperatura no tronco.....	138
5.3 – Distribuição da velocidade de propagação da frente de incandescência no tronco.....	139

LISTA DE SÍMBOLOS

A:	fator pré-exponencial;
c:	calor específico;
D_p :	diâmetro de poros;
E:	energia de ativação;
Gr:	número de Grashof;
h:	coeficiente de transferência de calor por convecção;
k:	constante de reação;
K:	condutibilidade térmica;
Le:	número de Lewis;
$\dot{m}''$:	taxa de consumo do coque;
$\dot{m}''_{CO}$:	taxa de consumo de CO;
$\dot{m}''_{CO_2}$:	taxa de consumo do CO ₂ ;
$\dot{m}''_v$:	taxa de consumo dos voláteis;
$\dot{m}''_w$:	taxa de consumo da água;
Nu:	número de Nusselt;
Pr:	número de Prandtl;
Q_r :	calor de reação ou de combustão heterogênea;
R:	constante universal dos gases;
r:	raio do tronco;
S:	termo de fonte ou sorvedouro;
T:	temperatura;
t:	tempo;
u:	vetor velocidade;
V_m :	velocidade média de propagação da frente incandescente;
x:	coordenada axial;
Y_{O_2} :	fração mássica do oxigênio;

Símbolos Gregos

β :	razão de massa estequiométrica;
ε :	emissividade;
ϕ :	variável dependente;
r_a :	massa específica total;
r_b :	massa específica da biomassa virgem;
r_c :	massa específica do coque;
r_w :	massa específica da água;
θ :	parâmetro que varia de 0 a 1 para solução da integral;
Γ :	coeficiente de difusão;
σ :	constante de Stefan-Boltzmann.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Posicionamento do Problema

“Smoldering” ou incandescência é definida como um modo de combustão caracterizado pela degradação térmica e carbonização de material virgem, sem chama, com desenvolvimento de fumaça e brilho visível. Muitos materiais podem sustentar a combustão por incandescência. Dentre eles incluem-se carvão vegetal, algodão, cinzas, papel, espumas de poliuretano, materiais de isolamento térmica e madeira.

A incandescência é sustentada, primeiramente, por reações de oxidação heterogêneas (gás-sólido), causando geralmente oxidação incompleta do combustível e, conseqüentemente, produzindo muitos gases tóxicos. Tipicamente, o monóxido de carbono apresenta o maior perigo. O calor produzido nesta zona de reação é conduzido pelo sólido e dois outros fenômenos são observados como conseqüência do aumento da temperatura local: secagem e pirólise (Carvalho Jr. et al., 2001; Carvalho et al., 2002). A zona de reação propaga-se lentamente podendo não ser detectada por longos períodos de tempo, para num dado instante, sofrer transição para chama. Esta toxidade, junto com o potencial de transição para combustão de chama, faz da incandescência um risco de incêndio que deve ser evitado.

Normalmente, a incandescência difere notadamente das demais combustões de chama. Temperaturas de incandescência são baixas (350 a 700 °C), assim como as velocidades de propagação da onda [$O(10^{-2}$ cm/seg)]. A incandescência, portanto, tende a ser muito menos intensa e rápida que a combustão em chamas, e isto significa que há muitas circunstâncias em que ela não possa ocorrer porque as perdas de calor extinguiriam este processo de reação comparativamente fraco. No entanto, circunstâncias que suprimiriam a chama devido ao acesso de ar limitado, freqüentemente favorecem a incandescência, a qual pode sobreviver com o fornecimento de muito pouco ar (Ohlemiller e Rogers, 1978).

Processos de combustão com chama e sem chama são diferentes também na aparência e na produção de emissões. Enquanto a combustão com chama termina em poucos minutos, a incandescência pode permanecer por até vários dias.

Durante as últimas décadas, houve um aumento permanente na produção e uso de materiais como polímeros sintéticos, têxteis, madeiras e outros, para uma grande gama de aplicações (materiais de construção, móveis, roupas, etc.). Com isto, houve uma necessidade de um entendimento fundamental e fenomenológico do desempenho destes materiais em incêndios e a contribuição deles para o perigoso alastramento do fogo. Diversos estudos teóricos e experimentais têm sido desenvolvidos por pesquisadores de diferentes disciplinas para caracterizar o comportamento de vários materiais sob diferentes condições de incêndio (ignição, incandescência, chama e expansão da chama). Uma revisão completa sobre o processo de incandescência foi recentemente apresentada por Ohlemiller (1995).

Porém, mais trabalho é necessário para estabelecer uma base de conhecimento que poderia ser usada por cientistas químicos e de materiais para projetar usando materiais com comportamentos específicos sob diferentes condições de incêndio. No presente, uma análise realística ou modelo numérico capaz de usar as propriedades termoquímicas intrínsecas de materiais para prever diferentes aspectos de seus desempenhos no fogo (flamabilidade, calor perdido, geração de fumaça, toxicidade, etc.) não é disponível.

O problema não é puramente químico, pois fatores físicos também têm uma influência. Estes incluem a área da superfície por unidade de volume do combustível, permeabilidade do combustível para o fluxo do gás, taxa de perda de calor da zona de reação e o tipo de fonte de ignição (Ohlemiller, 1985).

Estatísticas mostram que 75 % de incêndios em habitações podem queimar sem chama em seus estágios iniciais, seguidos somente mais tarde por chama (National Fire Protection Association, 1963). O cigarro é uma das causas mais comuns de incêndios residenciais.

A queima de um cigarro é um exemplo familiar de combustão por incandescência; ele é também um dos mais comuns iniciadores do processo em outros materiais, especialmente artigos de tapeçaria e de cama. Um cigarro também tem várias características comuns com os principais materiais que queimam sem chama. As partículas de combustível divididas finamente fornecem uma grande área de superfície por unidade de massa de combustível, o que facilita o ataque da superfície pelo oxigênio. A natureza permeável dos agregados das partículas de combustível permite o transporte do oxigênio para o local de reação por difusão e convecção. Ao mesmo tempo, agregados de partícula formam isolantes térmicos que evitam perdas de calor, permitindo sustentar a combustão, apesar de baixas taxas de liberação de calor.

A incandescência é sustentada por reações heterogêneas (gás-sólido) em regiões onde o oxigênio está presente. A degradação térmica produz gases tóxicos, principalmente alcatrão e monóxido de carbono, entre outros. A zona de reação propaga-se, via de regra, lentamente, podendo não ser detectada por longos períodos de tempo, para num dado instante sofrer transição para chama.

Segundo Ohlemiller e Rogers (1978), na combustão por incandescência, a primeira fonte de calor liberada é aquela associada à oxidação heterogênea do sólido. Este processo ocorre em diversas etapas. O oxigênio propaga-se para a superfície do sólido onde é adsorvido. Uma reação altamente exotérmica segue-se na superfície. Depois, os produtos de combustão (primeiramente CO_2 , H_2O e CO) são dispersados. Com o aquecimento, algumas substâncias se decompõem dentro do alcatrão líquido, limitando o fluxo de ar e, conseqüentemente, inibindo a propagação da onda de incandescência. Em geral, processos químicos relacionados à incandescência podem ser amplamente descritos como pirólise (endotérmica) de sólido e oxidação (exotérmica) de sólido e carvão. Pesquisas experimentais têm mostrado que o primeiro estágio (pirolítico e degradação oxidativa do combustível sólido) é globalmente exotérmico, mas a maior parte do calor é perdida pela oxidação do carvão. Reações heterogêneas são dependentes do oxigênio disponível na zona de reação. Aumentando a taxa de escoamento do oxidante aumentam-se as taxas de oxidação do combustível e as taxas de calor liberado e, conseqüentemente, a taxa de propagação da incandescência. Portanto, as características da combustão da incandescência são determinadas pelas taxas de transferência de calor e fornecimento de oxigênio.

O termo incandescência é, algumas vezes, usado impropriamente para descrever uma reação sem chama de materiais orgânicos. Qualquer material orgânico, quando sujeito a um fluxo de calor suficiente, irá degradar-se, gaseificar-se e produzir fumaça. Portanto, normalmente, é pequena ou inexistente a oxidação envolvida no processo de gaseificação (endotérmico), denominado pirólise, e não incandescência (Ohlemiller, 1995).

Muitos materiais que queimam através do processo de incandescência são representados por um esquema de reação global mostrado na Figura 1.1 (Ohlemiller e Lucca, 1983):

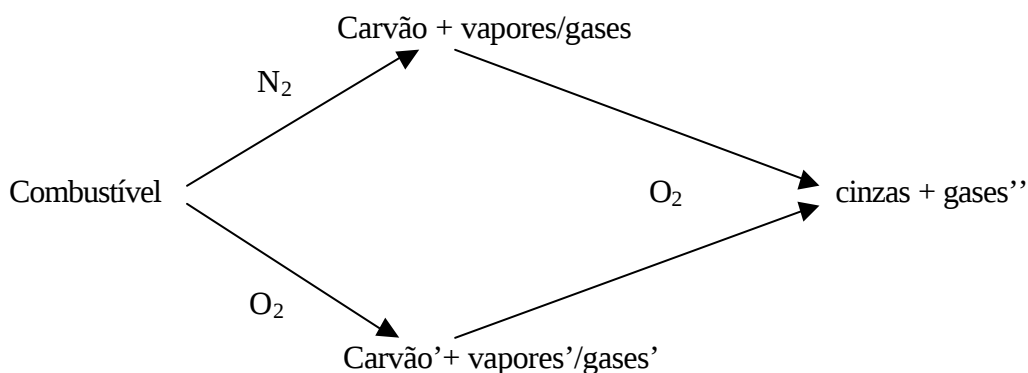


Figura 1.1 – Esquema de reação global para o processo de incandescência (Ohlemiller e Lucca, 1983).

Isto mostra que inicialmente há caminhos de reações de pirólise e reações oxidativas competindo. O caminho oxidativo pode ser moderadamente exotérmico. Inicialmente, ambos os caminhos podem formar um material rico em carbono (carvão). Estes carvões são tipicamente um pouco mais resistentes para oxidação que o combustível inicial, mas podem ser completamente gaseificados, liberando algumas milhares de calorias por grama de carvão. A extensão que cada caminho desta reação geral é seguida depende da configuração da incandescência (direta ou reversa – ver item 1.3). A influência da taxa de fornecimento de oxigênio sobre a velocidade da incandescência, o perfil de temperatura, e as principais espécies gasosas têm sido examinadas, e os resultados interpretados em termos dos fatores que parecem controlar a propagação da incandescência.

1.2. Caracterização da Madeira

Em base seca, a biomassa é constituída de 88% a 99,9% de componentes orgânicos, às vezes atribuídos como carbono fixado e volátil. Celulose, hemicelulose e lignina formam esta parte orgânica, distribuídos em 20 a 28% de lignina, 42 a 45% de celulose e 27 a 30% de hemicelulose (Salazar e Connor, 1983).

A lignina funciona como um ligante plástico entre os constituintes da biomassa. É facilmente destruída por ácidos. Tem uma massa molecular em torno de 1000 g/gmol, e sua composição é $C_{47}H_{52}O_{16}$, ou $C_{42}H_{32}O_6(OH)_5(CH_3O)_5$. É removida da madeira durante o processo de fabricação da polpa de celulose, e usada na indústria química, entre outros, como estabilizante de asfalto, dispersante, aditivo em óleos, na fabricação da baunilha (The Condensed Chemical Dictionary, 1971).

A celulose é um carboidrato natural, isômero do amido ($C_6H_{10}O_5$), altamente polimerizado (grau de polimerização 1000 para polpas e troncos, e até 10000 para fibras de algodão). Não reage com ácidos e bases, sua massa molecular é da ordem de 10^6 g/gmol e sua massa específica é da ordem de $1,5 \text{ g/cm}^3$. É combustível, com ponto de ignição de aproximadamente 240°C . Em algumas formas pode ser auto-inflamável.

A hemicelulose consiste em alguns carboidratos da madeira e acompanha a celulose “in natura”. Alguns a tratam como celulose com um grau de polimerização de 150 ou menos. É solúvel em bases e facilmente transformada em sacarose por diluição em ácidos minerais.

A hemicelulose é o mais reativo componente da madeira e a lignina o menos reativo, mas a cinética da pirólise da madeira é principalmente influenciada pelo maior constituinte, a celulose.

Os componentes acima estão dispostos em forma de células e fibras. Algumas dessas células possibilitam o transporte de água e ar, enquanto as fibras, formadas por celulose e aglutinadas por lignina, dão resistência mecânica à madeira. Há também células que acumulam amido, resinas, gorduras, etc.

1.3. Propagação da Incandescência – Direta e Reversa

Durante o processo de queima por incandescência o oxigênio pode difundir-se pelo sólido degradado, ou ser fornecido na mesma direção que a onda térmica de propagação (incandescência direta) ou na direção oposta (incandescência reversa). Portanto, a incandescência direta ocorre quando a zona de reação propaga-se na mesma direção do escoamento do oxidante, enquanto que a incandescência reversa propaga-se opondo-se ao escoamento do oxidante.

A incandescência reversa é mais comum no cenário de iniciação de incêndios, razão pela qual ela tem sido mais estudada (Leach et al., 2000). Este processo é caracterizado pela velocidade de propagação constante e sem transição para a chama. Um aumento da velocidade da propagação que eventualmente ocasiona chama é típico de incandescência direta. Portanto, este é mais perigoso, mas menos comum no cenário do incêndio.

Ohlemiller e Lucca (1983) compararam experimentalmente as características dos processos direto e reverso em celulose. Eles notaram diferenças qualitativas e quantitativas nos dois modos de propagação. O modo reverso rapidamente alcança uma taxa de propagação constante, que se torna limitada pela estequiometria de oxidação do carvão. Para o modo direto, duas reações distintas foram observadas: uma reação de pirólise não oxidativa e uma reação de oxidação do carvão. Na realidade, para Torero e Fernandez-Pello (1994), a propagação da incandescência é freqüentemente uma combinação de mistura de modos de escoamentos direto e reverso, com um deles dominante.

Para um mesmo combustível e para uma mesma taxa de fornecimento de ar, o processo direto é aproximadamente dez vezes mais lento que o reverso. O processo direto também permite uma combustão mais completa (Ohlemiller, 1995).

1.4. A Incandescência em Incêndios

Combustão por incandescência de materiais porosos tem sido estudada experimentalmente e teoricamente, no contexto de segurança de incêndio. A incandescência constitui um sério risco de incêndio por muitas razões. É difícil de ser detectado no interior de um material poroso, e os gases produzidos durante o período de incandescência podem conduzir a uma combustão com chama. Os componentes tóxicos resultantes na combustão são bem maiores na fase sem chama. A fumaça na combustão por incandescência freqüentemente não se dispersa com eficiência; normalmente, ela é levada pelos ventos para vales e cidades próximas, somando-se à poluição local, o que prejudica significativamente a visibilidade, além de causar efeitos de saúde adversos (Ferguson et al., 1994).

Combustão com chama de biomassa em uma primeira fase produz componentes altamente oxidados, tais como dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre. Yokelson et al. (1997) investigaram os gases resultantes na combustão sem chama de biomassa. Durante 24 queimadas com incandescência foram observados, predominantemente, os seguintes produtos: dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, etano, etino, propano, formaldeído, hidroxietanal, metanol, fenol, ácido acético, ácido fórmico, amoníaco, ácido cianídrico e sulfato de carbonila. Estes produtos estavam presentes na composição da fumaça originária da combustão sem chama de madeiras, gramíneas e solo orgânico. Quase metade das emissões orgânicas detectadas origina-se da pirólise do combustível, a qual produz fumaça branca, rica em compostos orgânicos oxigenados. Estes compostos merecem mais atenção na determinação dos impactos do incêndio na atmosfera.

Em incêndios de florestas tropicais e temperadas, uma porcentagem do consumo de biomassa é por combustão sem chama; portanto, a incandescência produz forte impacto na atmosfera em regiões tropicais de desflorestamento, principalmente na estação seca (Ward et al., 1992).

O aumento no interesse na conservação de energia residencial tem resultado em uma forte demanda por materiais de isolamento térmica. Isolamentos feitos de celulose são mais eficientes e mais baratos. Uma variedade de aditivos, em forma de pó fino é

adicionada ao material com o intuito de controlar sua combustibilidade. Eles são bastante eficientes em suprimir chama, mas são menos eficientes no caso de incandescência. Quando o isolamento é instalado inapropriadamente, correntes de calor podem causar a incandescência. Uma vez iniciado, o processo torna-se auto-sustentável, expandindo-se no local e inserindo uma toxidade e risco potencial de chama. Em indústrias nas quais se processam materiais oxidáveis, há um perigo não somente de explosões, mas também de ignição da incandescência de camadas de pó acumuladas dentro ou sobre o equipamento de processamento aquecido (Ohlemiller, 1985).

1.5. Modelos Disponíveis

A incandescência é um modo importante de combustão que tem motivado pesquisas analíticas e experimentais no que diz respeito à segurança de incêndio. Definida como uma oxidação heterogênea exotérmica auto-sustentável do sólido, combustão por incandescência tem sido modelada mais explicitamente em termos das propriedades intrínsecas do sólido, como também comparada com modelos de expansão de chama. Usando modelos cinéticos simplificados, referenciados como “cinéticos globais”, a iniciação do processo de incandescência tem sido estudada completa e extensivamente do ponto de vista termo-físico. Estes estudos são baseados nos modelos unidimensionais de degradação sólida, nos quais os efeitos da transferência de calor e massa na fase gasosa, ou são desprezados, ou tratados empiricamente. A propagação da frente de incandescência subsequente à ignição é consideravelmente mais complexa, e muito menos estudada analiticamente. Resultados experimentais de Ohlemiller (1985) indicam a importância de processos de transporte na fase gasosa na incandescência de camadas de combustível permeáveis, tanto no processo direto como no reverso, na presença de escoamento forçado. Os modelos analítico/numéricos disponíveis não podem descrever esses efeitos quantitativamente. A transição da incandescência para chama é ainda mais complexa, e não tem sido modelada em nenhum detalhe. A complexidade adicional origina-se da presença simultânea de reações heterogêneas e homogêneas, as quais fazem as ligações entre as reações químicas e a geração e transporte de calor. Assim, uma descrição realística da transição de incandescência para chama requer consideração dos processos termo-físicos e químicos presentes e a ligação entre eles (Moallemi et al., 1993).

O modelo termo-físico para propagação da onda de incandescência formulado por Ohlemiller (1985) considerou vários mecanismos de transporte (difusão e convecção de energia, oxigênio e voláteis) no sólido, carvão, cinzas e gás. Este modelo é baseado na hipótese de continuidade da matéria sólido/gás na escala de sub-partícula do combustível sólido, mas considerou a existência simultânea de espécies e gradientes de temperatura na escala de partícula sólida e na escala da frente de reação. A complexidade das equações resultante fez o caso geral intratável.

1.6. Incandescência Permanente e Transiente

Moussa et al. (1976) explicaram os efeitos da fração molar de oxigênio e pressão parcial sobre a velocidade da frente de incandescência, a temperatura e o limite de extinção. Segundo esses autores, a incandescência permanente ocorre dentro de uma região que cobre uma gama extensa de fração molar de oxigênio ambiente e pressão parcial. Sob baixos valores de fração molar de oxigênio ambiente e pressão parcial, a incandescência transiente é seguida pela extinção, enquanto que com altos valores, é seguida por chama e expansão desta sobre o material virgem. As regiões permanentes e transientes são separadas pela extinção e limites de chama, ocorrendo com valores bem definidos da fração molar de oxigênio e pressão parcial.

A transição da incandescência para a chama requer tanto uma mistura de gases e ar que esteja dentro de seus limites de flamabilidade, quanto uma corrente de calor suficiente para ignitar esta mistura. No entanto, estes dois requisitos devem ser satisfeitos no mesmo local e ao mesmo tempo. Qualquer outro fator que aumente a taxa líquida de geração de calor, ou diminua a taxa líquida de perda de calor, levará o material em incandescência para ignição da chama por aumento da temperatura local e da taxa de geração de gás de pirólise (Ohlemiller, 1995).

Quando a incandescência se expande através do material virgem, pode-se identificar: (1) uma zona de pirólise marcada por rápida elevação de temperatura; (2) uma zona carbonizada, onde a temperatura atinge um máximo, a evolução de gases visíveis cessa, e ocorre incandescência; (3) uma zona de carvão residual poroso e/ou cinzas, resfriamento lento e sem chamuscamento.

Segundo Shafizadeh e Sekiguchi (1984), os carvões formados durante a incandescência em celulose não são nem celulose intacta, nem carbono puro, e podem ser diferentes materiais nos diferentes estágios de decomposição térmica.

1.7. Processo de Decomposição Térmica da Madeira durante a Queima

Na degradação ou decomposição térmica da madeira, pode-se observar alguns fenômenos físicos e químicos que ocorrem no tempo e espaço. Tais fenômenos incluem secagem e pré-aquecimento, liberação de material inflamável volátil, combustão do material gasoso liberado, e combustão incandescente do carbono fixo (The Condensed Chemical Dictionary, 1971). Este processo de decomposição, que ocorre com aquecimento, é chamado de pirólise. O processo em si da queima da madeira, onde se observam estes fenômenos, acontece em cinco períodos distintos, representados esquematicamente na Figura 2 e descritos a seguir (Kanury e Blackshear, 1970):

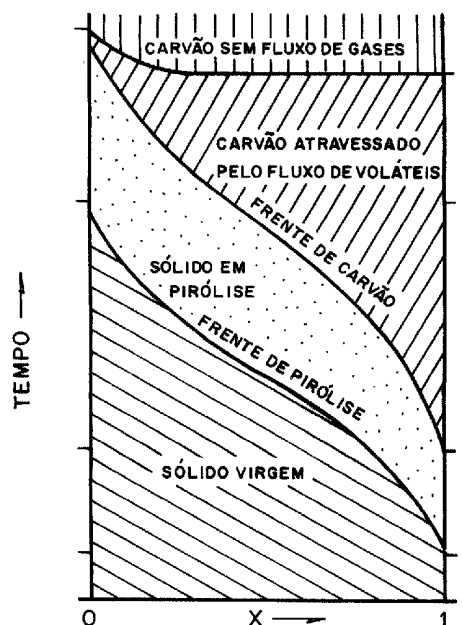


Figura 1.2 – Esquema mostrando os períodos de queima da madeira

PERÍODO 1. Com o início do aquecimento da superfície, a transferência de calor em todo o sólido é feita por condução, e é iniciada a secagem.

PERÍODO 2. Há uma camada superficial, na qual o sólido passa a se decompor termicamente. Nesta camada, a condução é acompanhada pela reação de pirólise. Devido à formação de grande quantidade de gases produzidos na pirólise, estes fluem em direção à fonte quente, ocorrendo a convecção na direção oposta àquela da condução. Abaixo da camada de pirólise, o material virgem continua a ser aquecido predominantemente por condução. Quando a superfície atinge uma temperatura suficientemente alta, tem início a pirólise do sólido a uma taxa considerável. Os gases aí liberados são ignitados pela fonte de calor inicial, que age como uma chama piloto. Dos constituintes condensáveis formados na camada em pirólise, a maior parte flui para fora, e uma fração pequena deles acha passagem para o interior relativamente mais frio, por difusão. Os vapores difundidos condensam-se ao atingir um local apropriado para tal. Entretanto, como o sólido continua a ser aquecido por condução, estes condensados são re-evaporados, num processo com efeitos endotérmicos, tornando a combustão auto-sustentada.

PERÍODO 3. Nele existem três camadas: a camada interior de material virgem, a camada intermediária em pirólise, e a camada superficial, constituída por carvão. A camada de carvão é formada quando todos os voláteis estejam removidos do sólido. Nesta camada, a transferência de energia ocorre simultaneamente por condução e por convecção contrária. Além disso, a camada de carvão age como um reator contínuo de fluxo, no qual os gases mais pesados da pirólise, catalisados pelo carvão aquecido, decompõem-se em gases mais leves. Quando esses gases combustíveis, com uma massa molecular mais baixa, encaminham-se para fora, podem encontrar-se com moléculas de oxigênio difundidas nas camadas sub-superficiais, vindas da atmosfera. A reação de oxidação resultante pode provocar uma forte reação exotérmica na camada de carvão.

PERÍODO 4. A frente da pirólise alcança o plano de simetria, tendo-se somente duas camadas: uma em pirólise e a externa de carvão.

PERÍODO 5. Refere-se ao momento em que a frente de carvão alcança o plano de simetria. Não há mais escoamento de gases nesta fase, e a transferência de calor se dá por condução através do carvão. No início deste período, o tronco pode falhar mecanicamente.

Este processo, aqui descrito em linhas gerais, é bastante influenciado por algumas características do material que está em pirólise. Antes de ser pirolizado, pode-se afirmar que um pedaço de madeira é um meio contínuo, com uma superfície bem definida, e onde a condução de calor acontece da maneira usual. Isto não é verdade: a madeira tem uma estrutura bastante anisotrópica. Sua condutividade térmica ao longo das fibras é aproximadamente o dobro da observada em uma direção perpendicular às fibras. Além disso, em algumas espécies de madeira, a permeabilidade na direção longitudinal é 10000 vezes maior que na direção transversal ao tronco. Como na direção longitudinal do tronco se tem uma maior condutividade térmica e uma maior permeabilidade, as fases acima descritas do processo de pirólise acontecem com mais facilidade nesta direção. Tem-se, assim, uma taxa de combustão maior longitudinal que transversalmente nos troncos onde são observadas as cinco fases descritas acima.

1.8. Objetivos do Trabalho

O objetivo central deste trabalho foi a investigação do processo de incandescência desenvolvido em troncos de madeira, com a finalidade de melhor compreender o seu mecanismo, e obter uma base racional para prevenção, detecção e controle do processo. Assim, suas metas gerais foram:

1. Determinar as concentrações de CO, O₂, CO₂ e UHC nos gases de combustão gerados durante o processo de queima.
2. Determinar as temperaturas durante o processo em vários pontos da madeira.
3. Realizar os ensaios de laboratório, previamente estabelecidos através da técnica de “Projeto de Experimentos”, utilizando madeiras de diferentes espécies e tamanhos, com valores distintos para a vazão de ar e a temperatura interna do forno.
4. Determinar a velocidade de propagação da frente de incandescência em cada caso.
5. Determinar as taxas de queima para cada caso.
6. Investigar a influência de parâmetros que favorecem o aparecimento e a continuidade da incandescência.
7. Realizar testes em campo em queimadas controladas.
8. Desenvolver modelagem físico-química da combustão utilizando dados de laboratório.

CAPÍTULO 2

AMOSTRAS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EM LABORATÓRIO

2.1. Preparação das Amostras

Para a realização da parte experimental coletaram-se amostras de madeira da espécie “embaúba” (*Cecropia Paraensis* Huber, Família: Moraceae). Tal espécie foi escolhida por se tratar de uma árvore bastante comum na Floresta Amazônica. As amostras foram colocadas ao ar livre para secagem, onde permaneceram até a realização dos testes. O primeiro lote de 32 amostras foi coletado na própria área verde do INPE, e usinados com dimensões que variam de 0,10 a 0,50 m de diâmetro e 1 m de comprimento. O segundo lote de 12 amostras, das espécies “embaúba branca” e “embaúba pata de anta”, com as mesmas dimensões, foi trazido de Alta Floresta, Mato Grosso, em outubro de 2000. Os teores de umidade das amostras recolhidas foram determinados utilizando-se o método de dupla pesagem, que consiste em pesar primeiramente a amostra úmida, recém abatida, e colocá-la para secagem até que, após consecutivas pesagens, a massa da amostra não apresente variação no peso maior que 1%, estando assim, prontas para a utilização nos testes. Um lote foi secado em estufa e outro ao ar livre.

2.2. Caracterização do Material

2.2.1. Porosimetria

Análises feitas com utilização do porosímetro de mercúrio do Laboratório de Química do INPE/Cachoeira Paulista (Quantachrome, modelo Autoscan 33), determinaram a distribuição de porosidade das espécies utilizadas nos testes. O aparelho utilizado possui placas de eletrodo que formam um capacitor, tendo como dielétrico o óleo, o vidro da célula e a coluna de mercúrio. Variando-se a pressão do óleo no conjunto, o mercúrio da célula começa a penetrar nos poros do material e, conseqüentemente, diminui a altura da coluna de mercúrio, o que altera a constante dielétrica do conjunto. Esta variação será igual ao volume de poros da amostra, o qual é

medido pelo aparelho em função da variação da capacitância do conjunto. Os resultados são mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Resultados obtidos da análise de porosimetria.

Espécie	Concentração de poros	Conclusão
Embaúba (preta)	$10^3 < D_p < 10^4 \text{ \AA}$	Madeira meso-porosa
Embaúba (pata de anta)	$10^3 < D_p < 10^4 \text{ \AA}$	Madeira meso-porosa
Embaúba (branca)	$10^3 < D_p < 10^4 \text{ \AA}$	Madeira meso-porosa

A conclusão acima foi obtida de acordo com a classificação das normas da ASTM, ou seja, para amostras com diâmetros de poros variando entre $10^2 < D_p < 10^3 \text{ (\AA)}$ e $10^3 < D_p < 10^4 \text{ (\AA)}$ são consideradas madeiras meso-porosas, aquelas com valores entre $10^4 < D_p < 2 \times 10^4 \text{ (\AA)}$ são macro-porosas e as que possuem $D_p < 10^2$ são micro-porosas.

Foram analisadas frações retiradas próximas à casca e mais ao centro do material. Em todas as análises realizadas (com repetibilidade) para todos os espécimes, a maior concentração de poros possui diâmetro com valores entre $10^3 < D_p < 10^4 \text{ \AA}$. Observou-se também que o volume poroso total próximo à casca é maior que o volume ao centro.

2.2.2. Picnometria

Para medir a densidade volumétrica real da madeira foi utilizado o picnômetro de hélio do Laboratório de Química (Micromerits, modelo 1305). O picnômetro determina rapidamente o volume de objetos sólidos de formato regular ou irregular, ou ainda, em pó ou em pedaços. O aparelho possui uma câmara com volume conhecido para uma pressão P_1 . Depois de introduzida a amostra na câmara, faz-se a expansão com o gás hélio, obtendo-se P_2 . Após dez medidas obtém-se o volume médio da amostra e, como a massa é conhecida, tem-se a massa específica da amostra. Foram feitas medidas para a embaúba da região paulista (“preta”) e para as duas espécies de embaúba da região amazônica (“pata de anta” e “branca”) com os resultados médios obtidos a partir de 3 ensaios realizados em cada espécie. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resultados obtidos da análise de picnometria.

Espécie	(*) Massa Específica Real (kg/m³)
Embaúba “preta”	1560
Embaúba “pata de anta”	1687
Embaúba “branca”	1420

(*) não foram considerados os poros da amostra durante a análise.

2.2.3. Perda de Massa em Termobalança

A termobalança fornece a medida quantitativa de qualquer variação de peso associada a uma alteração de temperatura. Assim, o equipamento registra diretamente a perda de peso devida à desidratação ou à decomposição, fornecendo gráficos das variações do peso, do fluxo de calor e da porcentagem de massa perdida, em função da temperatura ou do tempo.

Utilizou-se uma balança da marca Perkim Elmer, modelo PGA 7 acoplada a um controlador TAGS, que permite aquecimentos até 1400 °C. Na realização das análises, fixou-se a temperatura inicial em 30 °C e a final, em aproximadamente 630 °C, na taxa de aquecimento de 5 °C por minuto, em atmosfera inerte (nitrogênio).

Foi realizada uma análise para cada amostra, mostrando-se seus resultados nas Figuras 2.1, 2.2 e 2.3, os quais são bastante semelhantes entre si. No início, há uma pequena perda de massa em virtude da evaporação da água (a amostra já foi parcialmente seca antes), a qual ocorre até aproximadamente 110 °C; a variação maior é observada a partir dos 200 °C até os 350 °C. Nesta fase ocorre a pirólise, na qual está sendo liberada a maior parte de voláteis, produzindo uma perda de cerca de 50% da massa inicial da amostra seca; após este ponto, a perda é gradual, restando no fim apenas de 20 a 35% da massa inicial seca.

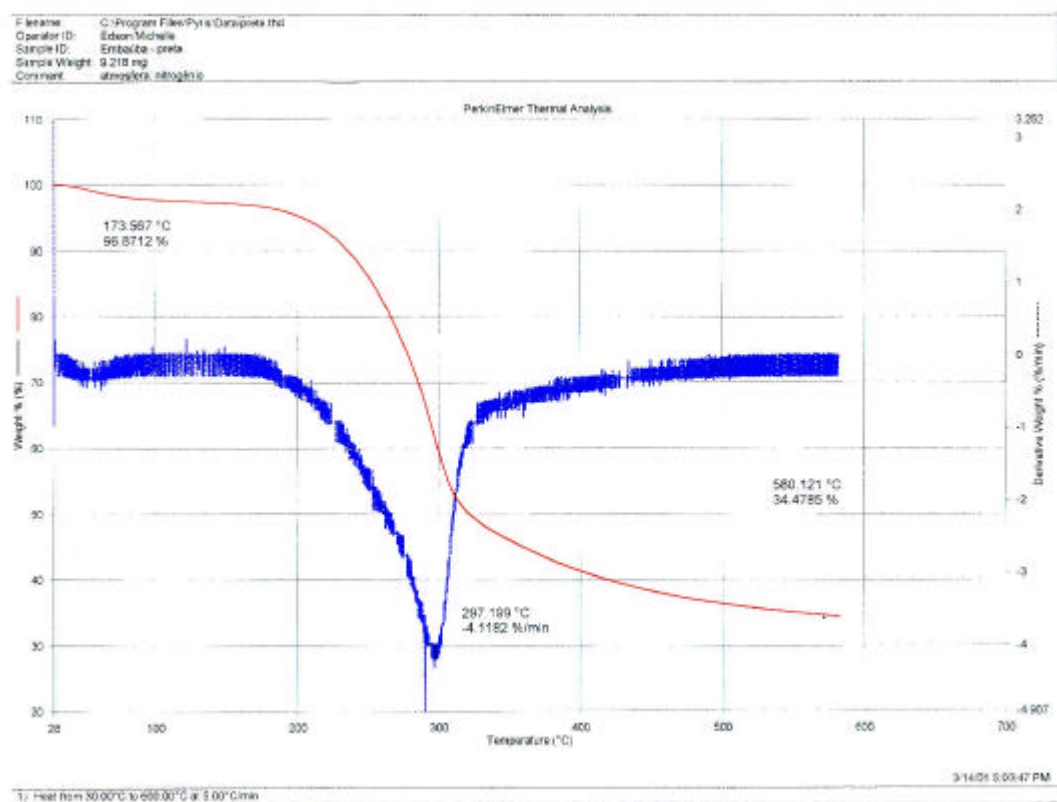


Figura 2.1 – Análise de termobalança da espécie embaúba “preta”.

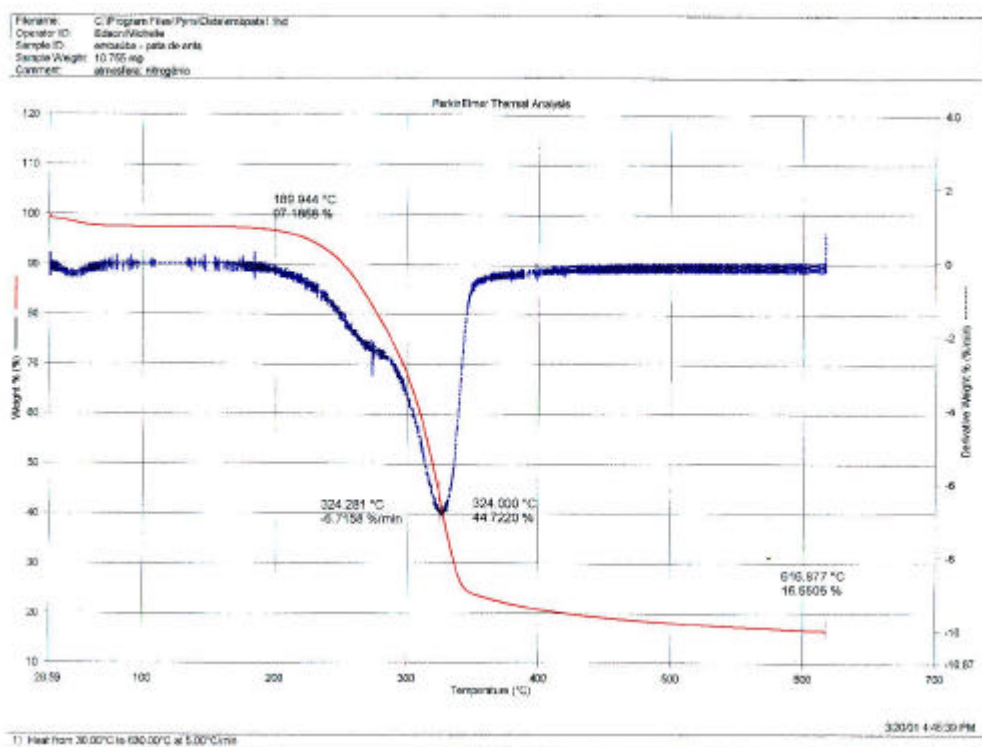


Figura 2.2 – Análise de termobalança da espécie embaúba “pata de anta”.

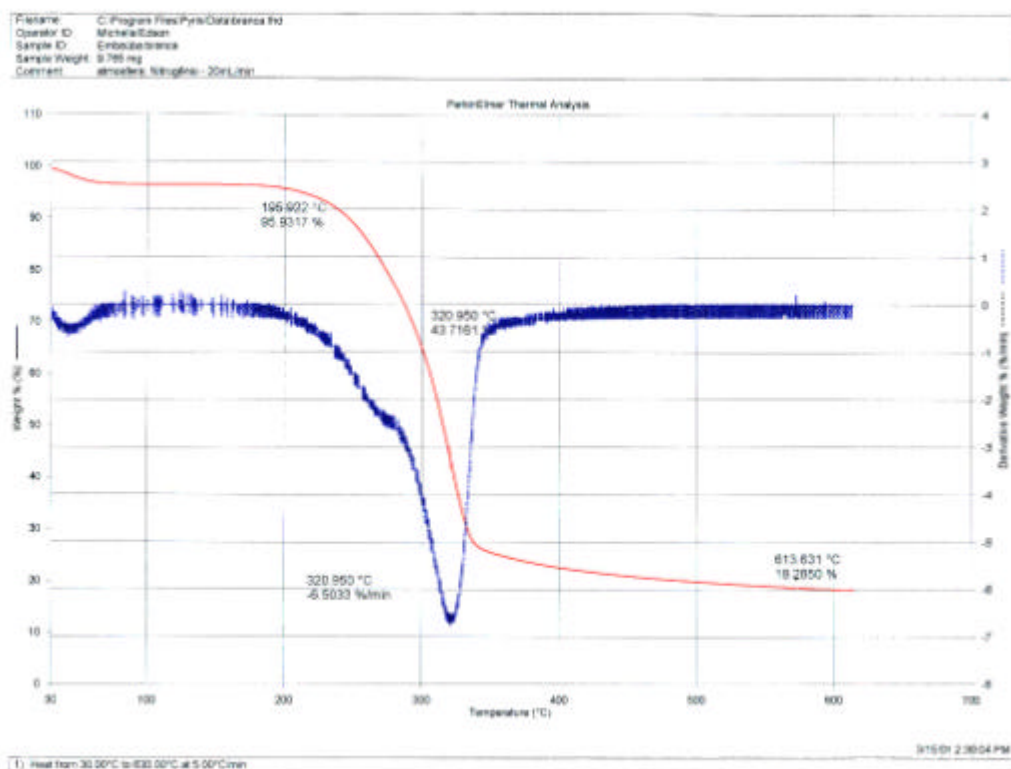


Figura 2.3 – Análise de termobalança da espécie embaúba “branca”.

2.2.4. Análise de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio da Biomassa

Para análise dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio presentes na biomassa seca, foi utilizado o analisador de CHN, marca Perkin Elmer, modelo 2000, pertencente à Faculdade de Engenharia Química de Lorena. O resultado da análise foi o seguinte:

Tabela 2.3 – Resultados obtidos da análise de CHN.

Espécie	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)
“Pata de Anta”	43,30	6,31	0,47
“Branca”	43,46	6,20	0,34
“Preta”	43,52	6,02	0,50

(*) valores de % em massa.

A diferença para 100 % é considerada como oxigênio.

2.3. Equipamentos

Um forno elétrico foi desenvolvido para iniciar e manter o processo de incandescência das amostras. Tal equipamento, cujos esquema e fotografia são mostrados nas Figuras 2.4 e 2.5, respectivamente, foi montado com 7 resistências tipo coleira, que operavam em tensão de 220 V, fornecendo uma potência de 9000 W. As dimensões do forno são 60 cm de diâmetro interno e 180 cm de comprimento. O material utilizado na construção foi o aço inox 304 (chapas de 2 mm). O isolamento do forno para reduzir as perdas de calor foi feito em manta de fibra cerâmica, marca Carbolane Z; posteriormente ele foi revestido com fita adesiva de substrato de alumínio. Ao longo do forno de ensaios foram instalados seis visores (três de cada lado), de borossilicato de 175 mm de diâmetro, para que a frente de incandescência pudesse ser observada durante os ensaios.

Em alguns testes-piloto foi utilizado um outro método para provocar a incandescência no tronco de madeira. Trata-se da utilização de um queimador infravermelho (marca Jackwal, potência de 1200kcal/h) para apenas ignitar a amostra, ocasionando uma queima por incandescência na direção longitudinal (semelhante à queima do cigarro), diferente do que ocorre com aquela provocada através das resistências, onde a incandescência acontece praticamente ao mesmo tempo em todo o substrato e vai caminhando radialmente. Como na direção longitudinal do tronco se tem uma maior condutividade térmica e uma maior permeabilidade, o processo de incandescência ocorre com mais facilidade nesta direção e, além disso, este método representa com mais fidelidade o fenômeno ocorrido nas florestas. Em alguns testes com queimador infravermelho, as resistências não permaneceram ligadas e em outros elas foram utilizadas apenas para manter o interior do forno aquecido e não mais para ignição. Na ignição com o queimador, todas as fases do processo ficam bem caracterizadas, possibilitando a visualização do avanço da frente de incandescência.

Logo na saída de gases foi instalado um trocador de calor (“banho de gelo”) para que o alcatrão fosse condensado em um recipiente para posteriormente seus componentes serem analisados através de cromatografia. Para garantir a ausência do alcatrão na linha de análise de gases, também foi instalado um filtro de carvão ativado,

bloqueando totalmente a passagem do alcatrão, sem alterar a composição dos gases, conforme ilustram as Figuras 2.6 e 2.7.

Uma sonda coletou os gases para o analisador de gases modular, da marca Sun, modelo MGA 1200 (Figura 2.8). É uma unidade compacta que mede monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), oxigênio (O₂) e hidrocarbonetos não queimados (UHC), através de técnica infravermelha não dispersiva. As faixas do analisador para medir CO e CO₂ são, respectivamente, 5 % e 10 %. O erro referente à precisão do aparelho é de 3 %.

Sete termopares tipo K (cromel-alumel) e uma sonda para coleta dos gases de combustão foram instalados. Um dos termopares foi conectado a um controlador de temperatura (Figura 2.9), o qual permite fixar a temperatura final do forno em um patamar, outro foi conectado na saída dos gases do banho de gelo para garantir a temperatura mínima de entrada dos gases no analisador, enquanto os demais foram conectados ao corpo de prova, como mostra a Figura 2.10. Na entrada do forno foi instalada uma tampa, no formato de um cone, acoplada a uma mangueira ligada ao rotâmetro para entrada controlada de ar. O ar de combustão foi fornecido por um compressor radial, marca IBRAM, modelo CR-6.

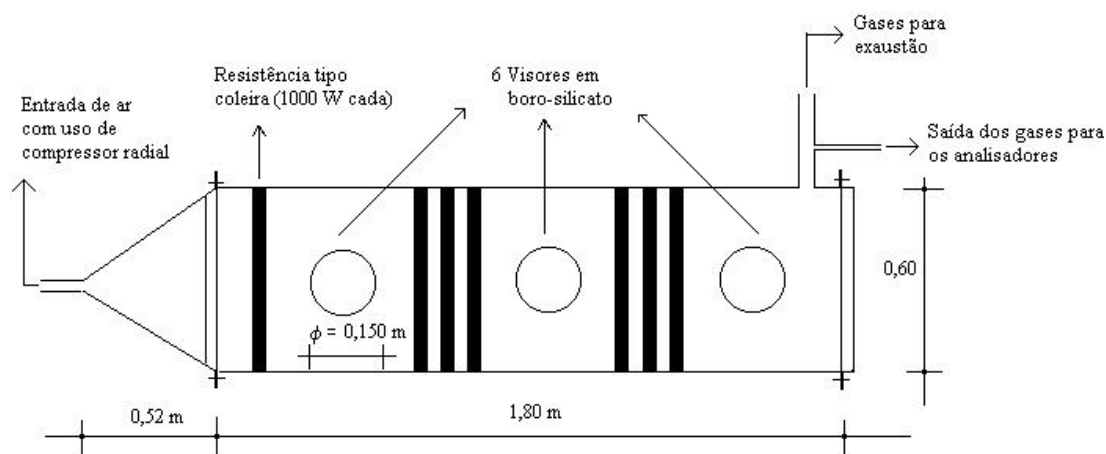


Figura 2.4 – Esquema do forno de ensaios.



Figura 2.5 – Fotografia do forno desenvolvido para ensaios.

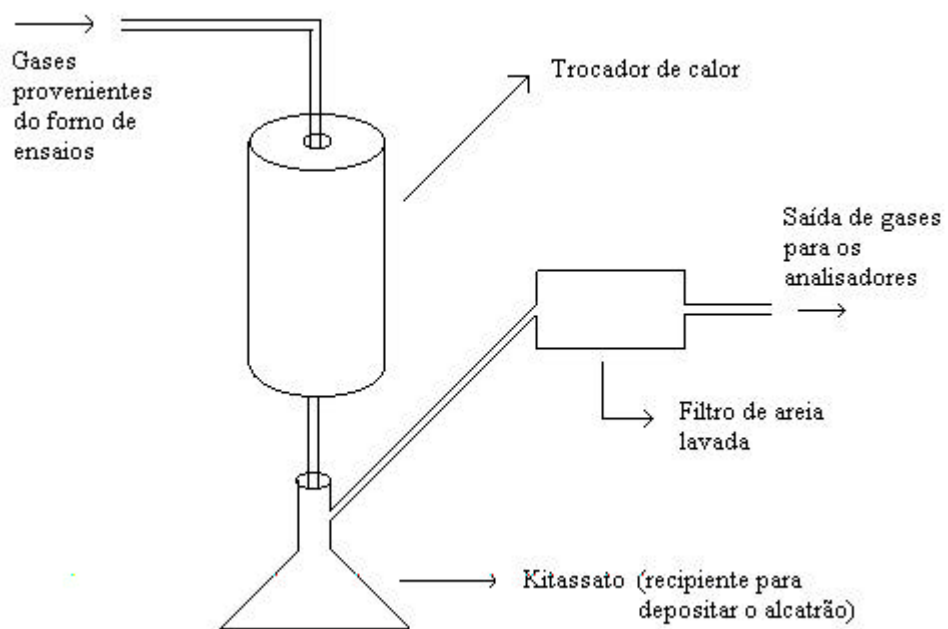


Figura 2.6 - Esquema do condensador de alcatrão.



Figura 2.7 – Fotografia do condensador de alcatrão (pode-se observar o depósito de alcatrão no fundo do kitassato).



Figura 2.8 – Fotografia do Analisador de Gases.

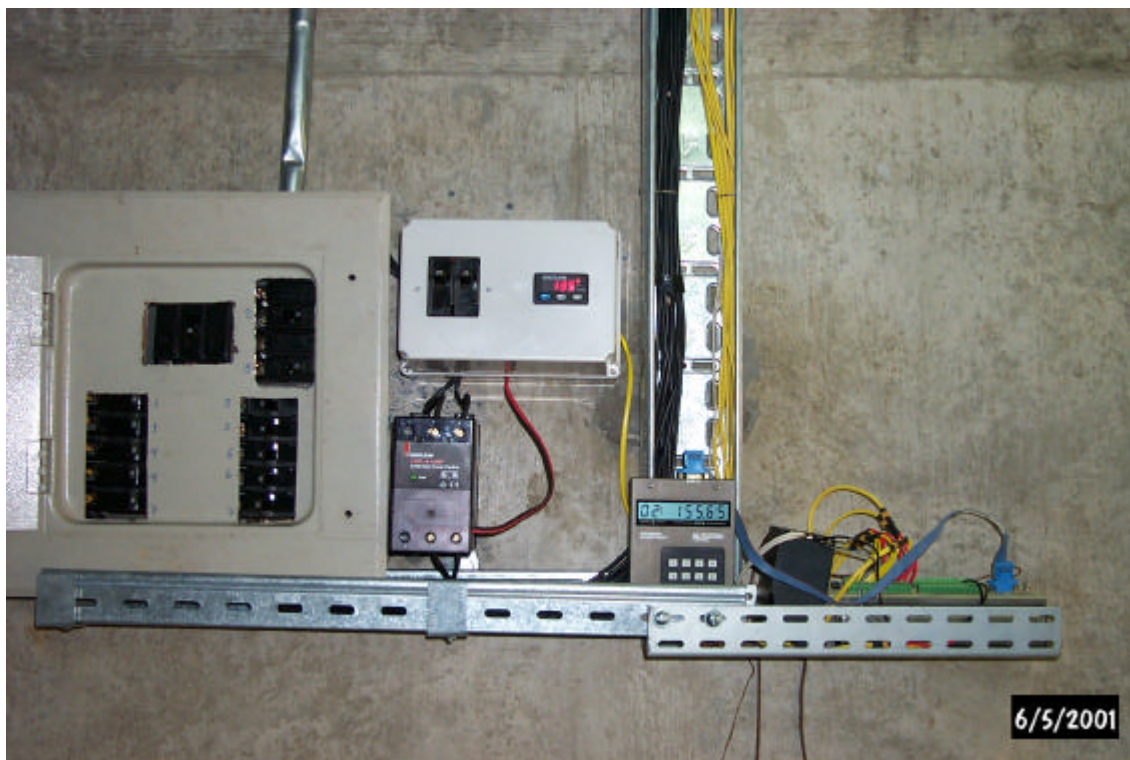


Figura 2.9 – Controlador de temperatura, sistema de aquisição de dados de temperatura e quadro de disjuntores.

O sistema de aquisição de dados de temperatura foi realizado através do coletor de dados Campbell Scientific, modelo CR10 WP. As concentrações dos gases foram coletadas a cada dez minutos, e registradas pelo relatório fornecido pelo analisador de gases. As temperaturas dos termopares foram coletadas continuamente do começo ao fim do processo, sem intervenção alguma durante o ensaio, enquanto as concentrações dos gases foram coletadas até o momento em que atingissem um patamar estável. Isto foi feito devido à impossibilidade de se permanecer 48 horas ininterruptas acompanhando-se a aquisição dos dados do analisador, bem como evitar o superaquecimento do aparelho. Após o processamento dos dados, obteve-se gráficos das variações tanto de concentrações, quanto da temperatura com o tempo.

A disposição dos cinco termopares ao longo da amostra é mostrada na Figura 2.10:

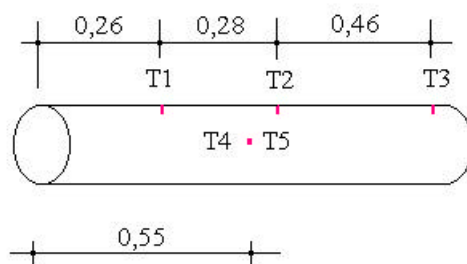


Figura 2.10 - Esquema da disposição dos termopares na amostra (dimensões: m)

Os termopares 4 e 5 estão em laterais opostas, e todos eles estão a uma profundidade de 3 cm.

2.4. Ensaio Preliminares

Quatro ensaios preliminares foram realizados com o objetivo de detectar eventuais problemas técnicos, sem a utilização de seus dados. No primeiro teste foi verificado que o diâmetro (3/8") da sonda dos gases de combustão não era suficiente para que eles chegassem até o analisador. Em outro teste foi necessário ajustar o programa do coletor de dados. Observou-se, também, nestes ensaios, que o carvão ativado contido no filtro estava reduzindo a concentração de hidrocarbonetos nos gases de combustão. A solução encontrada foi a utilização de areia lavada, com granulometria de 1 a 2 mm, para substituir o carvão. Nas bordas e no meio do filtro foi colocado um chumaço de lã de vidro com um filtro de papel nas extremidades, assim obteve-se um filtro eficiente, sem alterar a concentração. A lã de vidro, por ser de cor branca, permite a visualização da penetração do alcatrão no filtro; quando a lã escurecia, o filtro era substituído por outro.

Devido a estes ensaios que se optou, também, por ignitar a amostra utilizando um queimador infravermelho, obtendo-se assim um processo gradativo bastante semelhante ao que ocorre nas florestas tropicais.

2.5. Projeto de Experimento

Para otimizar a execução dos testes foi aplicada a técnica de “Projeto de Experimentos”, que consiste em uma metodologia baseada em princípios estatísticos, onde é possível tirar o máximo de informações úteis, com um mínimo de experimentos e realizando a análise dos dados obtidos a partir desse planejamento.

Em um projeto de experimentos, temos:

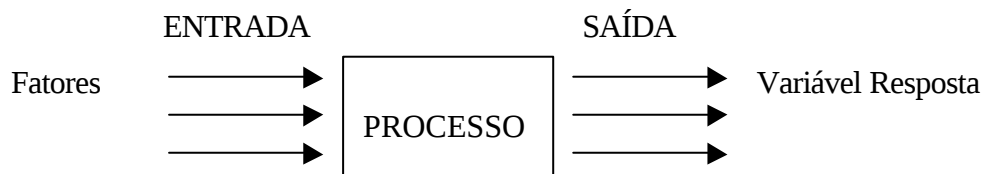


Figura 2.11 – Esquema da metodologia aplicada no “Projeto de Experimentos”.

Resumindo:

Fatores são as variáveis controláveis, variáveis de entrada (independentes).

Níveis são os valores nos quais os fatores são ajustados.

Resposta é a variável de saída, o resultado do processo.

As vantagens deste método são:

- requerer menor número de experimentos que os métodos convencionais;
- permitir que o estudo seja feito com diversas variáveis, investigadas simultaneamente;
- determinar a influência (interação) de uma ou mais variáveis sobre uma outra de interesse;
- mostrar as variáveis mais importantes do processo;
- permitir a otimização com redução significativa de custos;
- aplicar-se a qualquer tipo de processo;
- ser aplicável uma modelagem do experimento.

Para a realização dos testes são cinco os fatores que variaram: (i) a temperatura interna do forno de ensaios, (ii) a vazão de ar, (iii) a umidade das amostras, (iv) as espécies de madeira e (v) o volume dos espécimes. Utilizou-se uma matriz de

experimento fatorial fracionada do tipo 3^5 , onde foram considerados os 5 fatores que são os parâmetros que variaram (variáveis de entrada e independentes) em 3 níveis (3 = alto, 2 = intermediário, 1 = baixo). As variáveis de saída ou de resposta (resultado do processo) são: (i) velocidade da frente de incandescência, (ii) taxa de queima, (iii) concentração dos gases e (iv) temperaturas ao longo da amostra. A matriz escolhida foi a que mais se adequou ao estudo em questão. Optou-se pelo fatorial fracionado, em virtude da impossibilidade de realização do fatorial completo ($3^5 = 243$).

Aplicando-se a Técnica de Taguchi (Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade, 1991) que é baseada na metodologia do “Projeto de Experimentos”, escolheu-se a matriz originária dos Arranjos Ortogonais com três níveis, L18, apresentada na Tabela 2.4.

A Técnica de Taguchi tem o objetivo de auxiliar engenheiros ou pesquisadores a desenvolverem habilidade inicial com relação à técnica “Projeto de Experimentos”. Esta obra trata de estratégias básicas de ensaio.

No experimento em questão há cinco fatores. Assim, foram escolhidas, aleatoriamente, da tabela 2.4, cinco colunas para cada parâmetro. As restantes são chamadas de colunas inertes ou fantasmas e foram utilizadas para o cálculo do erro. A escolha das colunas foi a seguinte, como pode ser observado na Tabela 2.5:

Coluna 1: Umidade da madeira;

Coluna 2: Temperatura interna do forno de ensaios;

Coluna 4: Vazão de ar;

Coluna 7 : Espécie da madeira;

Coluna 8: Volume das amostras;

Colunas 3, 5 e 6: Inertes.

Tabela 2.4 – Matriz originária dos Arranjos Ortogonais com três níveis – L18.

Experimento	Fatores							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Tabela 2.5 – Matriz experimental.

Ensaio	Fatores				
	Umidade	Temperatura	Vazão de ar	Espécie	Volume
1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2
3	1	1	3	3	3
4	1	2	1	3	3
5	1	2	2	1	1
6	1	2	3	2	2
7	1	3	2	2	3
8	1	3	3	3	1
9	1	3	1	1	2
10	2	1	3	2	1
11	2	1	1	3	2
12	2	1	2	1	3
13	2	2	2	3	2
14	2	2	3	1	3
15	2	2	1	2	1
16	2	3	3	1	2
17	2	3	1	2	3
18	2	3	2	3	1

As variáveis de entrada possuem 3 níveis de variação, com exceção da variável umidade, que possui apenas 2, conforme mostrado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Fatores e níveis utilizados na matriz experimental.

Fatores	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Umidade	Secagem ao natural	Secagem em estufa	---
Temperatura	ambiente	100 °C	200 °C
Vazão	85 L/min	99 L/min	113 L/ min
Espécie	Embaúba preta	Embaúba branca	Embaúba pata de anta
Volume	Até $25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	De 26 a $51 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	De 52 a $83 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

No fator “volume” foram divididos três níveis diferentes, pois as amostras variavam de $(3 \text{ a } 83) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, sendo que o primeiro nível é, aproximadamente, a metade do segundo e este a metade do terceiro.

A vazão de ar foi estimada com base na observação dos testes preliminares que um corpo de prova de cerca de 1,2 kg demorava aproximadamente 2 horas em combustão.

Os dezoito experimentos foram realizados fora da ordem em que se apresentam na matriz para que não houvesse risco de se incorrer em vícios.

2.6. Procedimentos dos Ensaios

O procedimento adotado foi sempre o mesmo para todos os ensaios realizados, conforme descrito a seguir:

- Ligava-se o analisador para aquecimento, por um tempo mínimo de 20 minutos.
- Preparava-se o filtro de areia lavada e colocava-se gelo dentro do trocador de calor.
- Depois de escolhida a amostra, ela era pesada e furada nos pontos de posicionamento dos termopares.
- Ignitava-se a amostra com o queimador infravermelho, fora do forno de ensaios.
- Ligava-se o compressor de ar, o qual fornecia uma vazão de ar constante e fixada de acordo com a matriz experimental.
- Reposicionava-se o corpo de prova dentro do forno, de maneira que o fluxo de ar estivesse na mesma direção da frente de incandescência, ou seja, a zona de reação propagava-se na mesma direção do escoamento do oxidante (incandescência direta).
- Introduziam-se os 5 termopares e fechava-se o forno.
- A temperatura interna do forno era fixada por um controlador de temperatura, exceto nos casos em que a temperatura era ambiente, conforme matriz experimental.
- Ajustava-se o relógio do coleta de dados de temperatura com o relógio do analisador de gases.
- Conectava-se a sonda da amostra com a ponta de prova do analisador e iniciava-se a aquisição dos dados (temperatura e concentração dos gases).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

3.1. Descrição dos Resultados

Para analisar, comparar e discutir os resultados obtidos após os ensaios de laboratório foram consideradas 7 variáveis respostas. São elas: velocidade média da frente de incandescência, taxa de queima heterogênea, temperatura máxima atingida pela amostra, as concentrações máximas de CO, de CO₂, de HC e a concentração mínima de O₂.

Realizaram-se 18 experimentos, sem repetibilidade, os quais forneceram estimativas dos valores das respostas discriminadas acima. O procedimento adotado foi seguido rigorosamente para que não houvesse interferências de outras variáveis não avaliadas neste sistema.

A velocidade média da frente de incandescência foi calculada com base no comprimento do tronco (1 m) e o tempo necessário para a frente percorrer a amostra em cada ensaio, inferidos com auxílio das medidas de temperatura.

As taxas de queima foram obtidas a partir do balanço de massa. Como a reação normalmente ocorre a uma temperatura superior a 400 °C, considerou-se que o material consumido neste instante é praticamente carbono, tendo os voláteis já sido eliminados. Com esta hipótese, tem-se a seguinte reação química:



onde os coeficientes y, z, p são obtidos através das concentrações medidas em base seca de [CO]_{máx.}, [CO₂]_{máx.} e [O₂]_{mín.} para cada ensaio realizado. Esta metodologia é válida pois, para as concentrações utilizadas, entende-se que a frente de pirólise já percorreu o corpo de prova na sua totalidade, ocorrendo apenas, neste instante, queima heterogênea.

Para a resposta referente à temperatura máxima, considerou-se a maior temperatura obtida em cada ensaio, registrada por qualquer termopar posicionado na amostra.

Calculou-se também a taxa de consumo, baseada nos pesos inicial e final da amostra, mas é mais apropriado considerar-se a taxa de queima nas discussões finais.

Antes da análise das respostas obtidas serem discutidas através da Teoria de Planejamento de Experimentos, os 18 ensaios foram descritos e representados através dos gráficos de temperatura e concentrações gerados. Em todos os gráficos referentes às concentrações foram inseridas barras de erro relativas à precisão do aparelho (3%). Este valor foi confirmado após passagem dos gases de calibração no analisador utilizado, possibilitando o cálculo do erro relativo.

1º. Experimento: Ensaio nº. 5 da Matriz Experimental

O primeiro conjunto de resultados é apresentado nas Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, que mostram as variações das temperaturas T_1 a T_5 e das concentrações de CO, CO₂, O₂ e HC em função do tempo, para as seguintes condições:

Umidade da madeira: secagem natural.

Temperatura interna do forno de ensaios: 100 °C.

Vazão de ar: 99 l/min.

Espécie da madeira: embaúba “preta”.

Volume das amostras: classe 1 (até $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Através dos dados da Figura 3.1 pode-se verificar que a frente de incandescência atingiu todos os pontos de termopares, com exceção do T_3 que se localizava no final, atingindo temperaturas próximas a 600 °C. Para atingir o termopar 1 que se localizava a 26 cm da extremidade, foram 270 minutos e para atravessar o segundo (a 28 cm de T_1) foram 910 minutos. Com estes dados pode-se estimar a velocidade de propagação da frente de incandescência: $V = 2,63 \text{ cm/h}$.

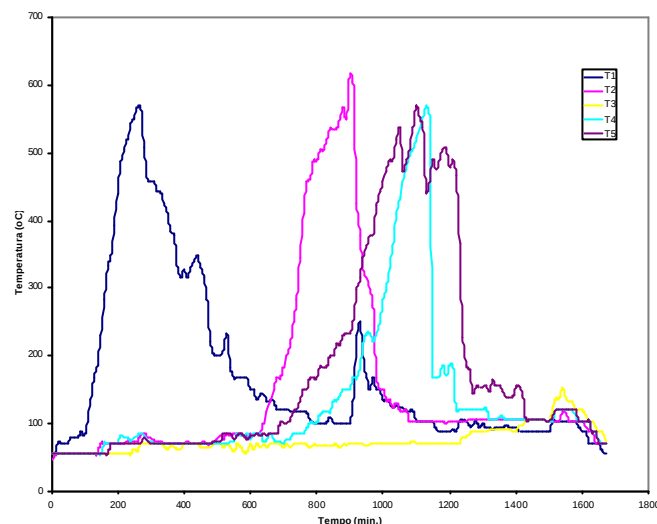


Figura 3.1 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.5.

Considerando o tempo que a frente levou para percorrer toda a extensão do tronco, tem-se: $V_m = 3,6$ cm/h.

Os termopares 4 e 5 registraram temperaturas máximas em instantes próximos, como era de se esperar, por estarem em sentidos opostos, mas à mesma distância da extremidade. O termopar 2 registrou a máxima temperatura atingida no experimento, 618°C . No termopar 3 não houve temperaturas superiores a 155°C ; deduz-se que, por estar bastante próximo à outra extremidade, provavelmente o termopar se soltou do tronco antes que a frente chegasse até ele.

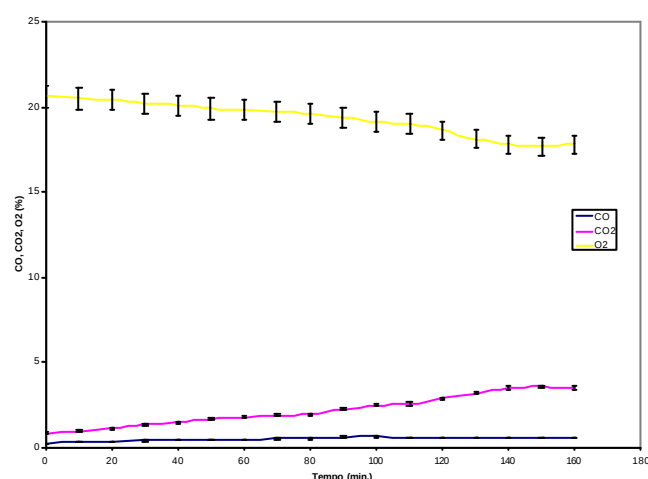


Figura 3.2 – Variação das concentrações de CO , CO_2 e O_2 em função do tempo, para o ensaio nº. 5.

Para estas condições pode-se verificar que a concentração de CO manteve-se baixa e a de CO₂ aumentou gradativamente. A concentração de O₂, conforme esperado, tem comportamento inverso à de CO₂. Os valores máximos das concentrações de CO e CO₂ foram 0,60% e 3,54%, respectivamente. A concentração de HC (hidrocarbonetos não queimados) teve o ponto máximo em 412 ppm e diminuiu até manter-se relativamente constante em 280 ppm. É importante ressaltar que, em todos os ensaios realizados, uma quantidade significativa de hidrocarbonetos ficou retida no próprio forno de ensaios, no condensador de alcatrão e nos filtros, ou seja, quando na forma gasosa, ele se condensa ao atingir temperaturas mais baixas., dando origem ao alcatrão. Portanto, esta concentração aferida é referente apenas aos hidrocarbonetos não condensáveis. O alcatrão retido nos filtros foi posteriormente analisado em cromatógrafo, com os resultados comentados mais adiante.

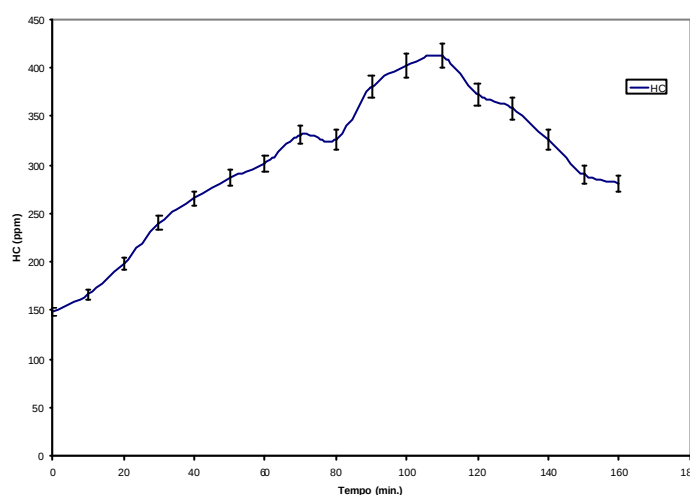


Figura 3.3 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 5.

O peso inicial da amostra era de 9 kg. Após o ensaio, o peso final verificado foi de 0,25 kg, obtendo-se assim, uma porcentagem de consumo de 97,22%. Com base nos pesos inicial e final e considerando que o tempo total de teste foi de 1670 minutos, pode-se determinar a taxa média de consumo, que para este caso foi de 5,24 g/min.

Considerando o material como carbono puro, determinou-se através da reação de combustão a taxa de queima heterogênea, que para este caso foi 2,13 g/min.

2º. Experimento: Ensaio nº. 9 da Matriz Experimental

Apresentam-se nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6, as variações das temperaturas T_1 a T_5 e das concentrações de CO, CO₂, O₂ e HC em função do tempo, para as seguintes condições:

Umidade da madeira: secagem natural.

Temperatura interna do forno de ensaios: 200 °C.

Vazão de ar: 85 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “preta”.

Volume das amostras: classe 2 (de 26 a 51x10⁻³ m³).

Para este caso, as temperaturas atingiram níveis menores e os pontos de máximo oscilaram em quase todos os termopares. A máxima temperatura atingida (em T_1) foi 491 °C, após 660 minutos de teste. Os picos de temperatura atingidos pelos termopares foram mais próximos que no caso anterior, indicando velocidade de propagação da frente incandescente mais rápida e taxa de consumo maior. Conforme esperado, a temperatura interna do forno fixada em 200 °C, acelerou o processo e o calor produzido ignitou outros pontos da amostra.

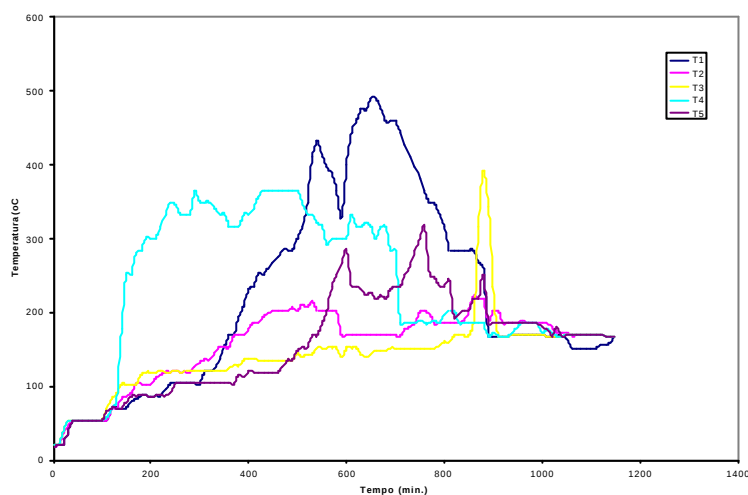


Figura 3.4 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº. 9.

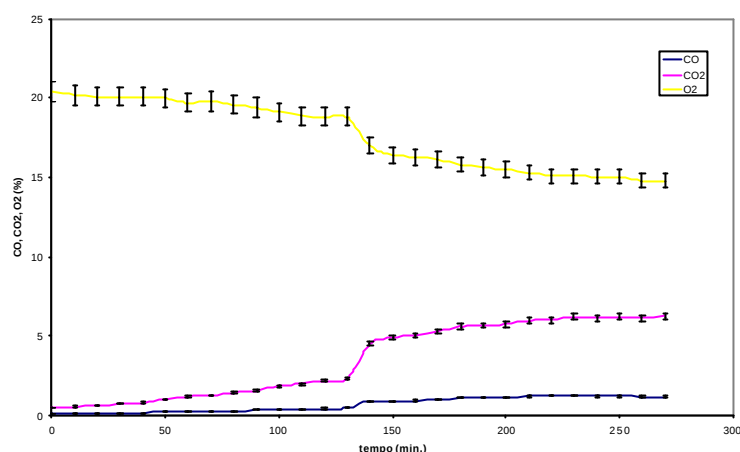


Figura 3.5 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio n^o. 9.

Considerando-se a distância entre os termopares T_1 e T_2 , obteve-se a estimativa da velocidade de propagação da frente de incandescência neste trecho: $V = 8,4$ cm/h. Mas, como nos gráficos referentes à temperatura não foram obtidos picos bem definidos, é mais razoável considerar-se o comprimento total do tronco; assim: $V_m = 5,21$ cm/h.

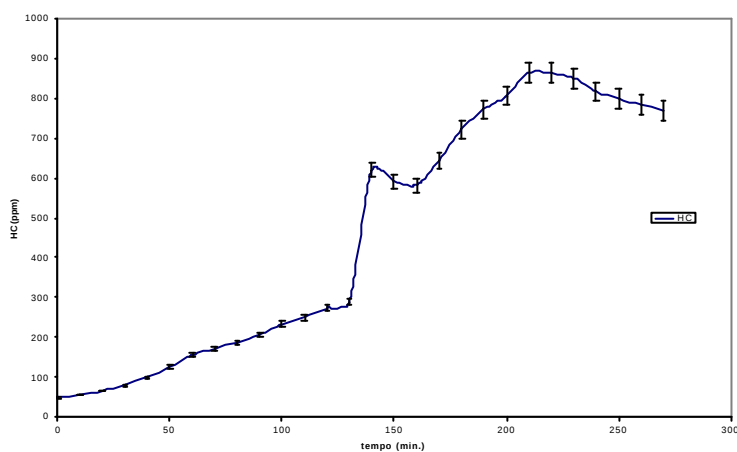


Figura 3.6 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio n^o. 9.

A concentração de CO novamente manteve-se baixa, não ultrapassando 1,22 %, enquanto a máxima de CO₂ foi 6,22 %. O mínimo correspondente da concentração de O₂ foi 14,8 % e o patamar médio de estabilização do O₂ encontrou-se em torno de 15 %, enquanto os patamares de estabilização de CO e CO₂ foram 1,18 % e 6,15 %, respectivamente. Pode-se verificar também, que à medida que a concentração de CO₂

aumenta continuamente, a de O_2 decresce, caracterizando uma queima heterogênea. Para este caso ocorreu um aumento significativo de HC, atingindo um valor máximo de 864 ppm. Uma grande parte de HC gerado na combustão se condensou formando o alcatrão que ficou retido no condensador de alcatrão, durante o experimento. De acordo com Numm et al. (1985), o alcatrão inicia-se em $327\text{ }^{\circ}\text{C}$, podendo atingir 58 % da massa da madeira em torno de $577\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O peso inicial da amostra era 11,2 kg e após um período de 1150 minutos de experimento, obteve-se apenas 0,37 kg em cinzas, ou seja 96,70% da massa foi convertida gerando uma taxa média de consumo de 9,42 g/min. Enquanto, a taxa de queima obtida foi 3,27 g/min.

3º. Experimento: Ensaio nº. 11 da Matriz Experimental

Para este conjunto de resultados tem-se, nas Figuras 3.7, 3.8 e 3.9, as variações das temperaturas T_1 a T_5 e das concentrações de CO, CO_2 , O_2 e HC em função do tempo, para as seguintes condições:

Umidade da madeira: secagem em estufa.

Temperatura interna do forno de ensaios: ambiente.

Vazão de ar: 85 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “pata de anta”.

Volume das amostras: classe 2 (de 26 a $51 \times 10^{-3}\text{ m}^3$).

Neste experimento ocorreu um fato notado também em outros ensaios realizados com alguns troncos da Amazônia: as temperaturas registradas pelos termopares foram baixas, não ultrapassando $270\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme pode ser observado na Figura 3.7. Este fato ocorreu devido à queima ter se propagado apenas na metade inferior do tronco, de uma extremidade à outra, como pode ser verificado pela Figura 3.10. A amostra utilizada estava muito seca e porosa, apresentando ranhuras, e isto provocou condições favoráveis para a propagação da frente de incandescência nesta região onde a temperatura se mantinha mais alta, favorecendo a continuidade do processo. Pelo fato dos termopares se posicionarem na parte superior e lateral do tronco, a temperatura registrada por eles foi próxima àquela caracterizada pela pirólise.

Considerando os pesos inicial e final da amostra que eram de 8,5 kg e 3,07 kg, respectivamente, pode-se concluir que foram queimados 63,88 % da amostra e, sabendo-se que o tempo de experimento foi de 1340 min, tem-se uma taxa média de consumo de 4,05 g/min. A taxa de queima heterogênea, para este caso, foi de 2,53 g/min.

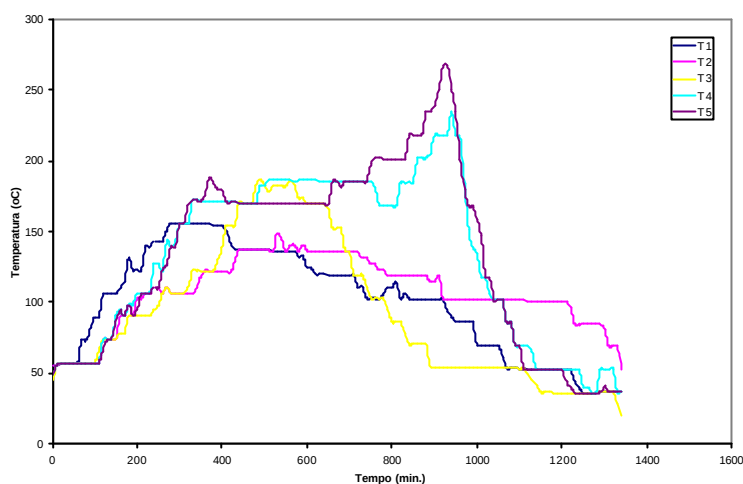


Figura 3.7 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº. 11.

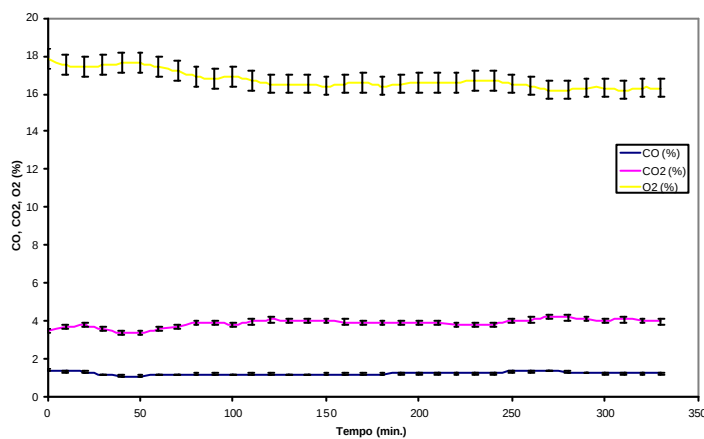


Figura 3.8 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 11.

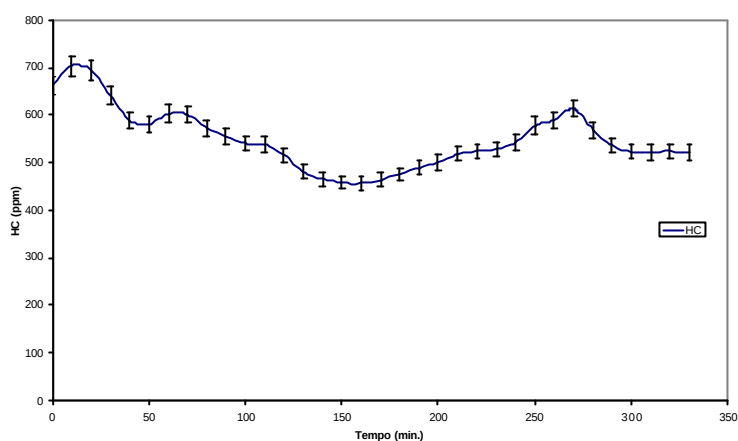


Figura 3.9 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 11.



Figura 3.10 – Amostra após o experimento realizado.

A velocidade da frente de chama foi estimada levando-se em conta o tamanho total da amostra (1 m) e o tempo necessário para a frente percorrer de uma extremidade à outra. Assim, obteve-se: $V_m = 4,5 \text{ cm/h}$.

Neste experimento, as concentrações mantiveram-se em patamares bastante estáveis, atingindo, em média os seguintes valores: CO, 1,25 %; CO₂, 4 %; O₂, 16,3 % e HC oscilou entre 457 e 704 ppm. A temperatura máxima obtida foi 267 °C, atingida pelo termopar lateral T₅.

4º. Experimento: Ensaio nº. 3 da Matriz Experimental

Nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 são apresentados os resultados do ensaio nº. 3 da Matriz Experimental, cujas condições são as seguintes:

Umidade da madeira: secagem natural.

Temperatura interna do forno de ensaios: ambiente.

Vazão de ar: 113 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “pata de anta”.

Volume das amostras: classe 3 (de 52 a $83 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Neste caso, os máximos de temperatura registrados pelos termopares encontram-se bastante próximos entre si. A amostra utilizada também apresentava irregularidades ou ranhuras, o que, talvez, propiciou o desenvolvimento da frente, primeiramente na parte superior do tronco, para depois atingir a região inferior. Considerando os perfis de temperatura registrados pelos termopares, foram 1100 minutos para que a frente de incandescência atingisse os 5 pontos e, ainda, eles registraram praticamente a mesma curva no decaimento das temperaturas, o que reforça a idéia descrita acima.

A temperatura máxima foi de 450 °C, atingida pelo termopar 4. As concentrações de CO, CO₂ e O₂ aumentaram gradativamente até manterem-se em patamares constantes nos seguintes valores: 1,2 %, 3,8 % e 17 %, respectivamente. A concentração de HC oscilou entre 54 a 433 ppm.

Para este ensaio, o peso inicial da amostra era 20,60 kg, restando no final 0,485 kg de cinzas e pedaços de carvão. Considerando o tempo de 1720 minutos de duração do teste, tem-se taxa de consumo de 11,69 g/min., onde 97,65 % da massa se devolatilizou. A taxa de queima heterogênea encontrada, ao considerar o material em combustão como carbono puro, foi de 3,04 g/min.

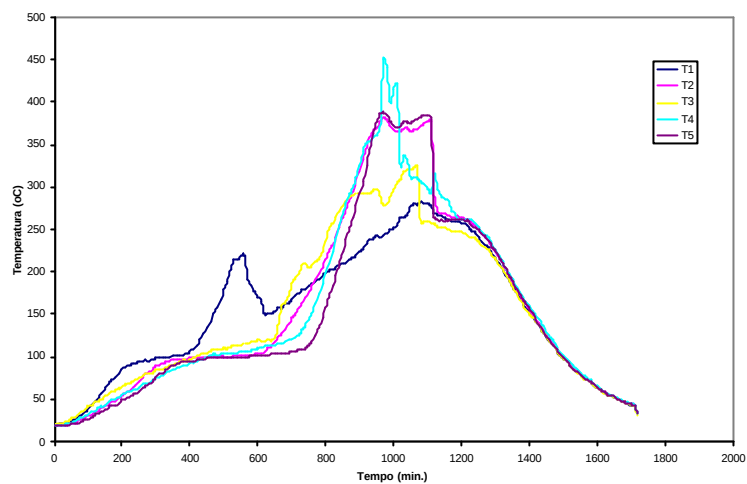


Figura 3.11 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.3.

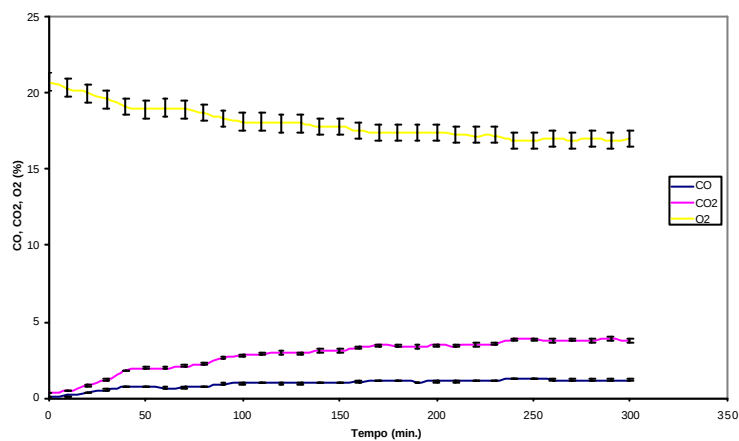


Figura 3.12 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 3.

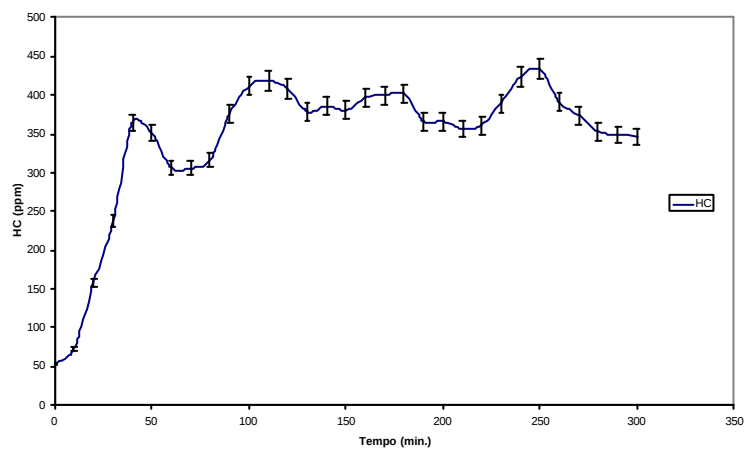


Figura 3.13 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 3.

Neste caso, para a estimativa da velocidade de propagação da frente de incandescência é mais conveniente considerar o comprimento total do tronco, obtendo-se assim: $V_m = 3,5 \text{ cm/h}$.

5º. Experimento: Ensaio nº. 1 da Matriz Experimental

Os resultados obtidos para este ensaio originaram os gráficos das Figuras 3.14 a 3.16. As condições adotadas neste ensaio foram as seguintes:

Umidade da madeira: secagem natural.

Temperatura interna do forno de ensaios: ambiente.

Vazão de ar: 85 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “preta”.

Volume das amostras: classe 1 (até $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

A massa inicial da amostra foi de 4 kg e após um período de 1490 minutos não havia mais sinal de combustão, restando apenas cinzas dentro do forno de ensaios com massa final de 0,138 kg. Portanto, a taxa de consumo foi de 2,59 g/min, onde 96,55 % da massa inicial foi devolatilizada. A taxa de queima heterogênea obtida para este caso foi de 1,62 g/min.

Através do gráfico da Figura 3.14 é possível verificar a passagem da frente incandescente em todos os termopares inseridos no corpo de prova, pois os cinco picos de temperatura ficaram bem definidos. O primeiro pico foi registrado pelo termopar nº. 1, após 500 minutos, aproximadamente. Os termopares de nºs. 2, 4 e 5 (os dois últimos laterais), localizavam-se em posições próximas, portanto, os picos correspondentes a eles foram registrados em instantes próximos (após cerca de 800 minutos). O termopar nº. 3 registrou a passagem da frente após 1190 minutos do início do teste.

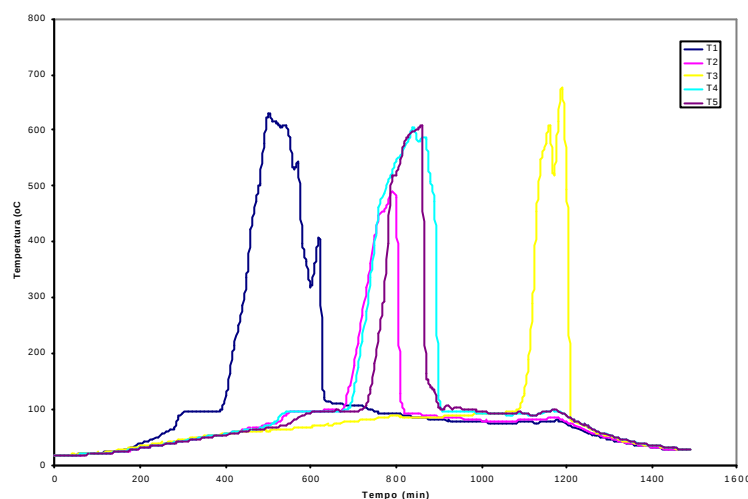


Figura 3.14 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.1.

A partir dos dados acima pode-se encontrar a velocidade média de propagação da incandescência para estas condições: $V_m = 4,03$ cm/h. Analisando a velocidade de propagação da frente, ponto a ponto, nota-se que ela inicia-se lentamente e aumenta gradativamente. Da extremidade do tronco até o primeiro termopar, a velocidade foi de 3,12 cm/h, deste ponto até o segundo termopar 5,6 cm/h e, finalmente, desta posição ao termopar nº. 3, obteve-se 7,67 cm/h. Com o desenvolvimento do processo, as condições de sustentação da frente são mais favoráveis, ou seja, há uma camada de cinzas mais espessa que favorece a manutenção da temperatura, diminuindo as perdas de calor, assim como os próprios gases gerados durante a queima contribuem para a continuidade da combustão.

A temperatura máxima registrada pelo termopar nº. 3 no decorrer do ensaio foi a mais alta de todos os experimentos: 671 °C.

Para este caso, a concentração de CO não atingiu 0,50 % e a de CO₂ alcançou o valor máximo de 3,2 % e, conseqüentemente, a concentração mínima de O₂ ficou em 18 %. Para os hidrocarbonetos, também obteve-se valores relativamente baixos, o máximo foi 321 ppm.

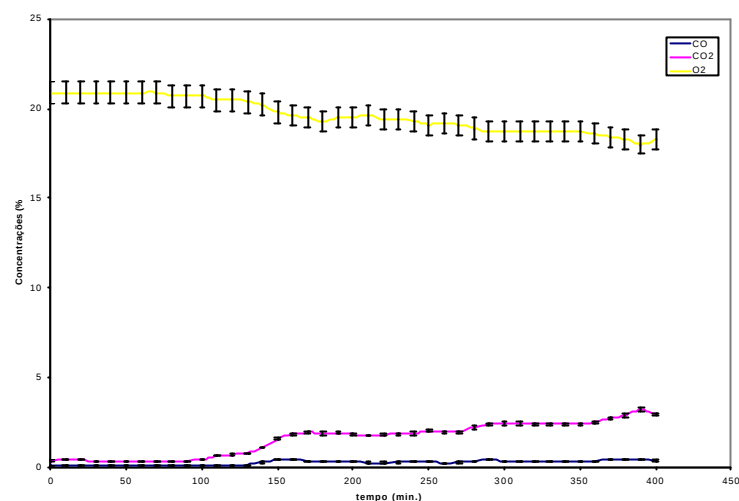


Figura 3.15 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 1.

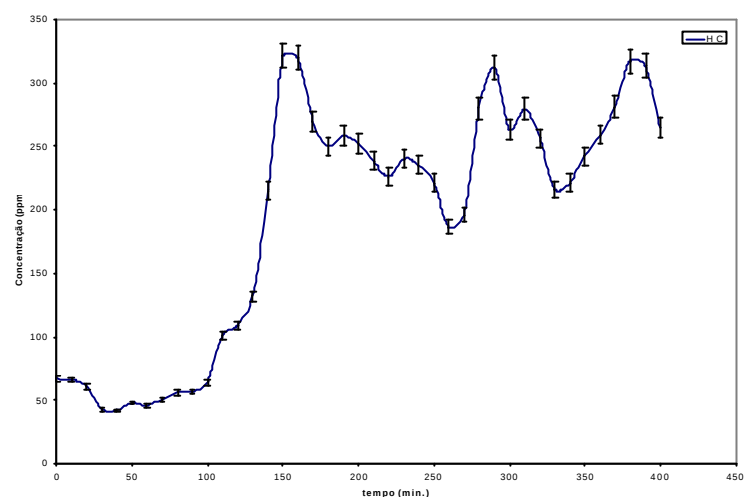


Figura 3.16 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 1.

6º. Experimento: Ensaio nº. 15 da Matriz Experimental

Para este ensaio, os resultados obtidos estão retratados nos gráficos das Figuras de nºs. 3.17 a 3.19. As condições adotadas foram as seguintes:

Umidade da madeira: secagem em estufa.

Temperatura interna do forno de ensaios: 100 °C.

Vazão de ar: 85 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “branca”.

Volume das amostras: classe 1 (até $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

A massa inicial da amostra era de 3 kg e, após o término do teste que teve duração de 1680 minutos, restaram apenas 0,141 kg de cinzas. Portanto, a taxa média de consumo encontrada foi 1,70 g/min, com 95,30 % de massa devolatilizada. A taxa média de queima heterogênea obtida foi de 2,42 g/min.

Como pode ser observado pelo gráfico da Figura 3.17, as temperaturas registradas pelos termopares não ultrapassaram 450 °C. Ocorreram vários picos de temperatura, levando-se a concluir que, em alguns momentos, houve a extinção da incandescência, com temperaturas decaindo até 120 °C. Segundo Moussa et al (1976), dependendo das concentrações de oxigênio do ambiente e da pressão parcial, o processo pode ser permanente e auto-sustentado, ou transiente e seguido por chama ou extinção. A fração molar de oxigênio ambiente e a pressão parcial governam o fluxo de calor gerado pela oxidação do carvão dentro da zona de incandescência. Assim, em baixos valores de fração molar de oxigênio e pressão parcial, a incandescência transiente é seguida pela extinção, enquanto que, a altos valores, é seguida por chama e expansão da chama sobre o material virgem. Para este ensaio, verificou-se que a frente de incandescência oscilou diversas vezes. A linha limítrofe entre a incandescência e sua extinção é muito tênue, bem como a transição da incandescência para a queima com chama.

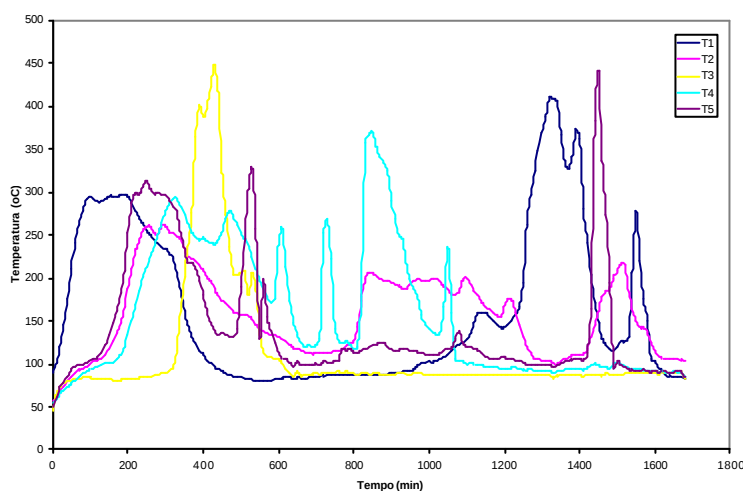


Figura 3.17 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.15.

A velocidade média foi calculada baseando-se no comprimento total do tronco (1 m) e o tempo de duração do ensaio, obtendo-se 3,57 cm/h.

A concentração de CO atingiu o máximo valor em 1,33 %, enquanto a de CO₂ ficou em 4,26 % e, para contrabalançar, registrou-se 17 % para o O₂. Para os hidrocarbonetos não condensáveis, o valor máximo registrado foi 799 ppm. Através da Figura 3.18 pode-se notar, nitidamente, um repentino aumento na emissão de CO, CO₂ e HC, no instante t = 340 min., ao mesmo tempo em que a concentração de O₂ diminuiu.

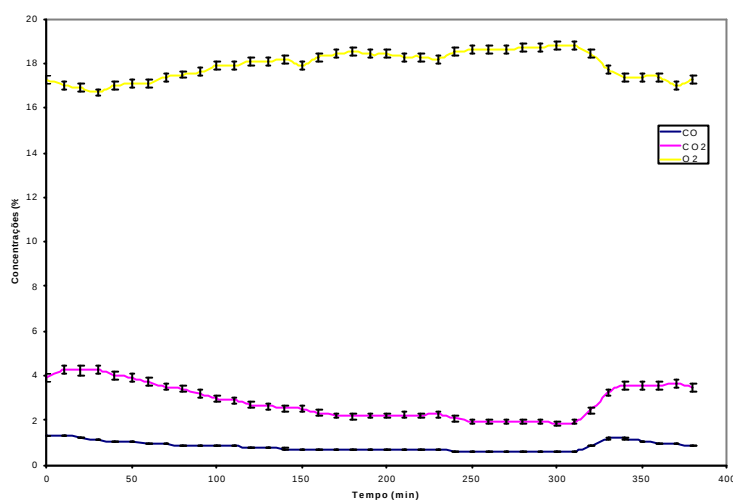


Figura 3.18 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 15.

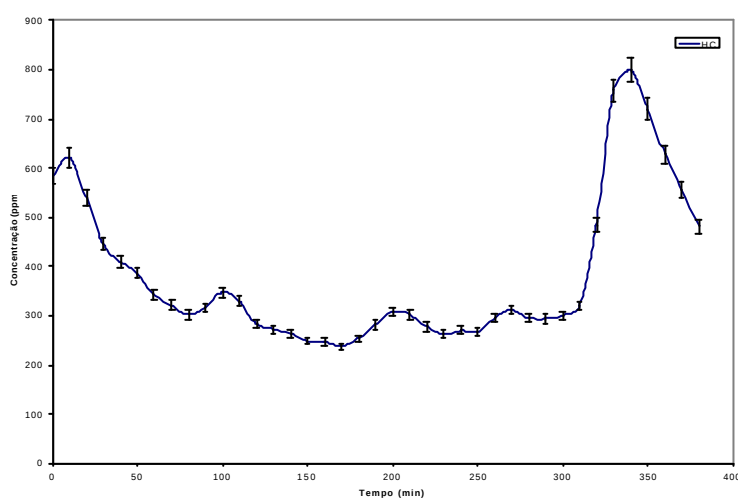


Figura 3.19 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 15.

7º. Experimento: Ensaio nº. 2 da Matriz Experimental

O conjunto de resultados para este ensaio segue representado nas Figuras 3.20 a 3.22, onde foram adotados os seguintes parâmetros:

Umidade da madeira: secagem ao natural.

Temperatura interna do forno de ensaios: ambiente.

Vazão de ar: 99 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “branca”.

Volume das amostras: classe 2 (de 26 a $51 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

A amostra, de 10 kg, utilizada neste teste apresentava fissuras decorrentes da secagem o que propiciou a propagação da frente incandescente apenas na metade inferior do tronco, restando, após o processo, a casca superior e cinzas, com massa final igual a 3,08 kg. Portanto, após 1230 minutos de ensaio, 69,2 % da massa inicial foi pirolisada e queimada, fornecendo uma taxa média de consumo de 5,63 g/min. A taxa de queima heterogênea obtida, considerando novamente o material como carbono puro no momento da reação, foi de 2,94 g/min.

A velocidade de propagação da frente para este caso foi igual 4,88 cm/h e a temperatura máxima registrada pelos termopares não ultrapassou os 340 °C, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.20. Provavelmente, as temperaturas foram superiores a este valor no local da queima, mas, como a região superior da amostra não foi atingida pela frente, os termopares registraram as temperaturas da região próxima à incandescência, ou seja, da região em pirólise.

As concentrações máximas para os gases CO e CO₂ foram, respectivamente, 1,38 % e 4,39 % e a mínima correspondente para o O₂ ficou em 16,7 %. As curvas referentes aos gases CO e CO₂ seguem quase paralelas no decorrer do ensaio e a curva do gás O₂ tende a decair à medida que àquelas tendem a ascender. A concentração de hidrocarbonetos oscilou entre 262 e 528 ppm.

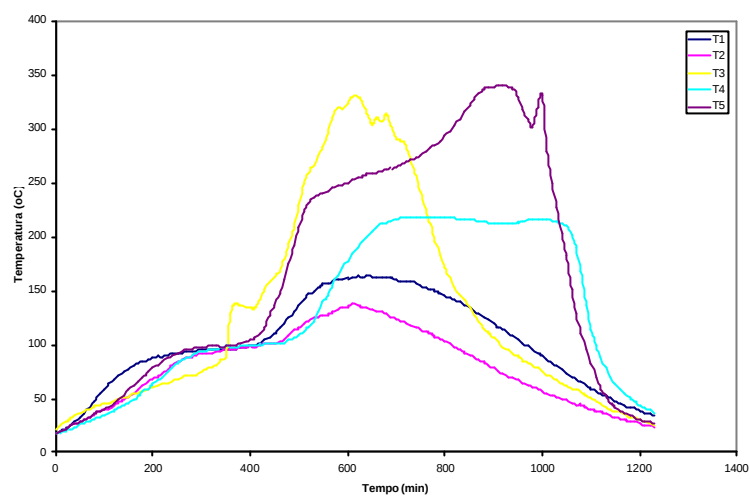


Figura 3.20 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.2.

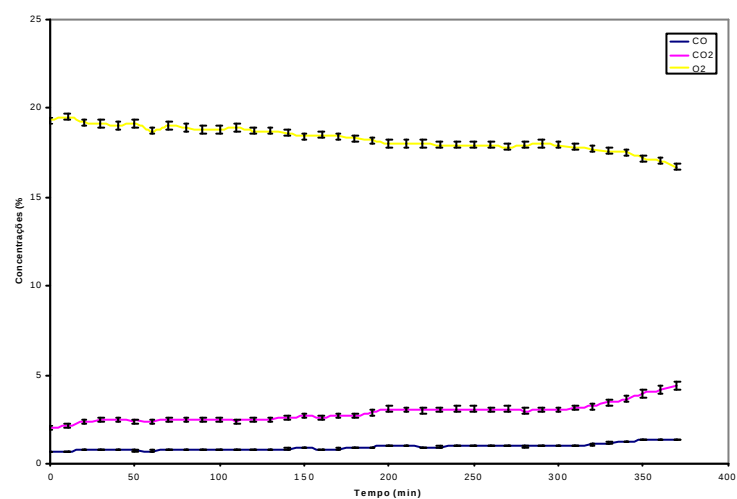


Figura 3.21 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 2.

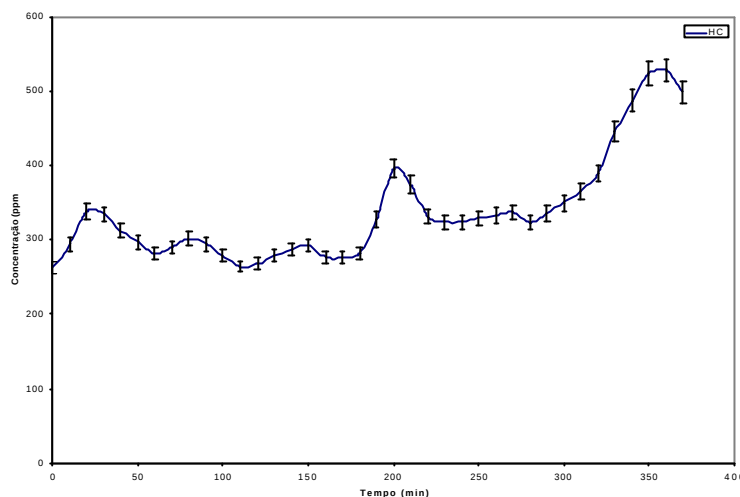


Figura 3.22 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 2.

8º. Experimento: Ensaio nº. 8 da Matriz Experimental

As condições adotadas neste caso são dadas a seguir e os resultados estão representados nas Figuras 3.23, 3.24 e 3.25.

Umidade da madeira: secagem ao natural.

Temperatura interna do forno de ensaios: 200 °C.

Vazão de ar: 113 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “pata de anta”.

Volume das amostras: classe 1 (até $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Após 800 minutos de ensaio, a amostra foi totalmente consumida, pois as condições adotadas aqui, como a temperatura interna do forno e a vazão de ar no nível 3, eram favoráveis para a propagação da frente incandescente. A amostra queimou por inteiro, restando apenas cinzas. As massas inicial e final eram, respectivamente, 3,100 kg e 0,067 kg, fornecendo uma taxa média de consumo igual a 3,79 g/min. Foram 97,85 % da massa inicial consumidos. Para a taxa de queima heterogênea obteve-se 2,29 g/min.

Durante o experimento, os termopares T_2 e T_5 registraram as maiores temperaturas (441 e 462 °C), enquanto T_1 , T_3 e T_4 não ultrapassaram os 250 °C. Acredita-se que a própria temperatura interna do forno de ensaios (200 °C) pode ter ignitado outras regiões na amostra e a frente propagou-se de dentro para fora, devido às

fissuras presentes na madeira, rompendo o tronco e, conseqüentemente, soltando os termopares inseridos no corpo de prova. No gráfico da Figura 3.23 pode-se observar uma queda brusca de temperatura no instante $t = 690$ min., com o decaimento das curvas para uma temperatura de aproximadamente $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a temperatura interna do forno de ensaios), comprovando a provável ruptura do tronco. Para estas condições, registrou-se a maior velocidade média de propagação da frente de incandescência: $7,5\text{ cm/h}$.

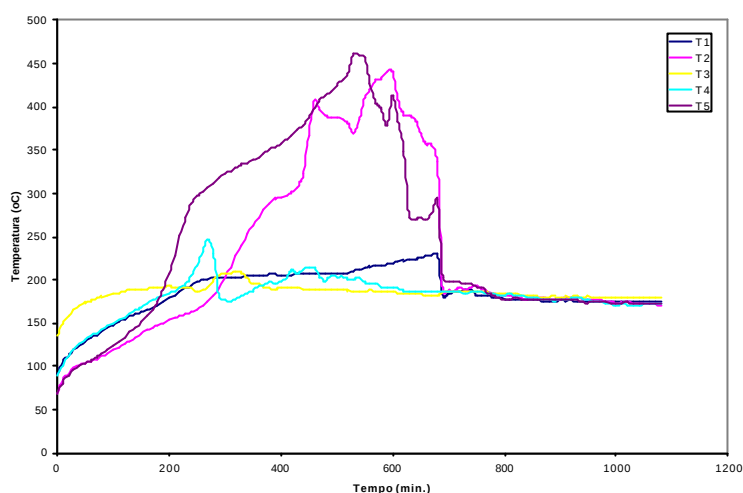


Figura 3.23 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.8.

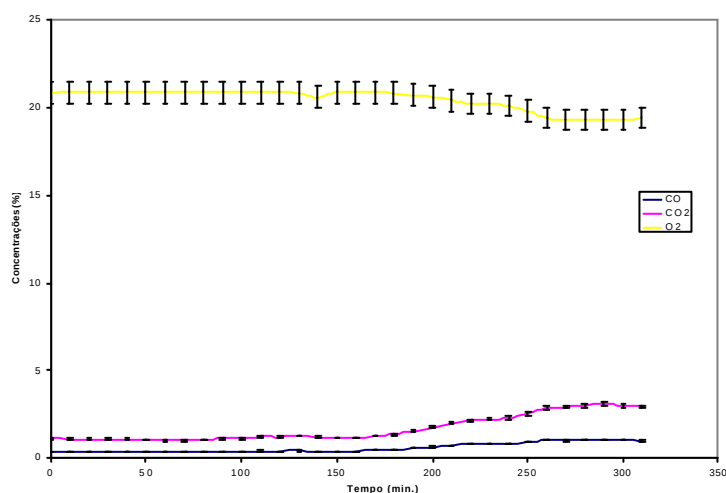


Figura 3.24 – Variação das concentrações de CO , CO_2 e O_2 em função do tempo, para o ensaio nº. 8.

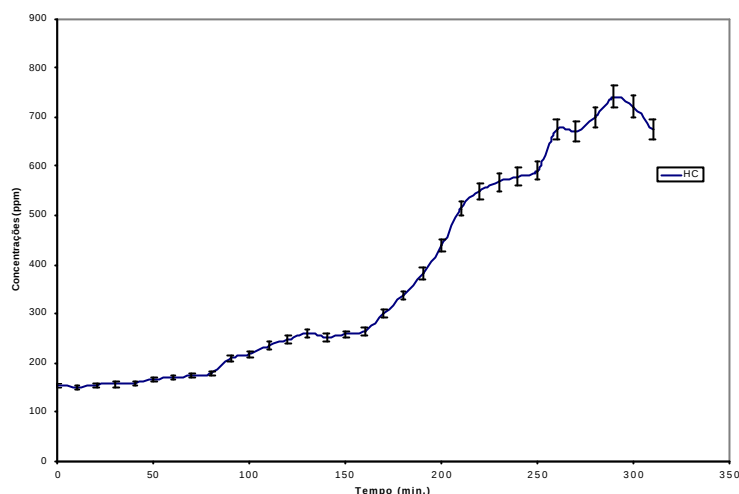


Figura 3.25 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 8.

Os pontos de máximo nas curvas referentes às concentrações dos gases CO, CO₂ e HC ocorrem no instante $t = 290$ min. e, correspondem aos valores 1,07 %, 3,08 % e 741 ppm, respectivamente, enquanto a curva referente à concentração do gás O₂ registra o seu valor mínimo neste mesmo instante, com 19,3 %. Através do gráfico da Figura 3.25, observa-se que a quantidade de hidrocarbonetos aumentou na medida em que o experimento se desenvolvia, até atingir um valor máximo e, então, a curva referente a este gás tende a decrescer.

9º. Experimento: Ensaio nº. 12 da Matriz Experimental

Para este ensaio foram adotados os seguintes parâmetros, conforme a matriz de experimentos:

Umidade da madeira: secagem em estufa.

Temperatura interna do forno de ensaios: ambiente.

Vazão de ar: 99 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “preta”.

Volume das amostras: classe 3 (de 52 a $83 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Os resultados são representados através dos gráficos das Figuras 3.26 a 3.28 e discutidos a seguir.

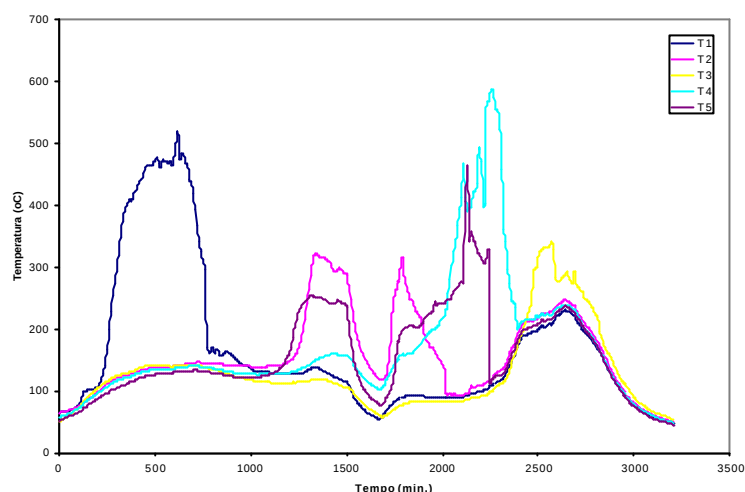


Figura 3.26 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.12.

A massa inicial da amostra era 21,50 kg e a final 0,706 kg. Portanto, a taxa de consumo verificada foi 6,5 g/min, totalizando 96,72 % de massa consumida. A taxa de queima heterogênea atingiu 3,82 g/min.

Através do gráfico da Figura 3.26, verifica-se a passagem da frente incandescente por todos os pontos onde estavam inseridos os termopares. A curva referente ao termopar 2 apresentou dois picos de temperatura, indicando que houve extinção da incandescência por alguns instantes. A máxima temperatura verificada, nestas condições, foi 589 °C, registrada pelo termopar T_4 . A velocidade média de propagação da frente de incandescência calculada para as condições adotadas neste experimento foi a menor de todas: 1,88 cm/h, provavelmente devido às resistências estarem desligadas.

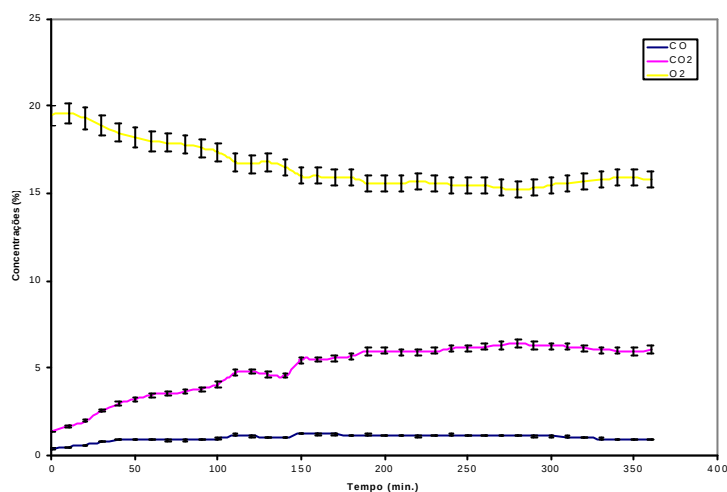


Figura 3.27 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 12.

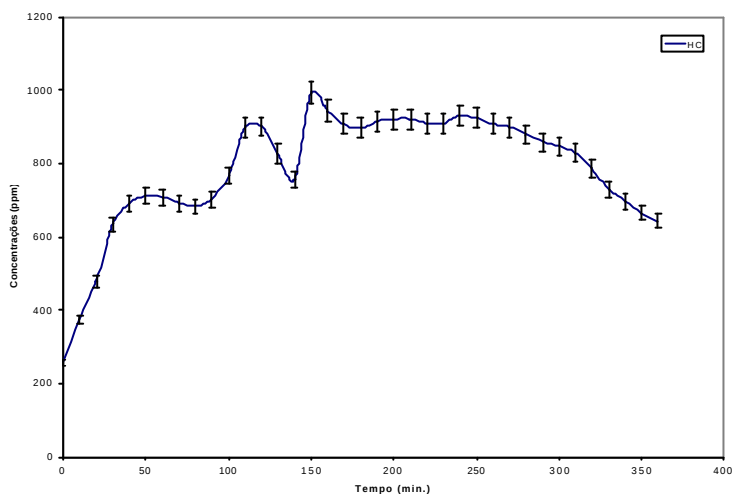


Figura 3.28 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.12.

As curvas referentes às concentrações de CO e CO₂ registraram os pontos de máximo em 1,27 % e 6,4 %, respectivamente e, no mesmo instante, a curva de O₂ registrava o valor mínimo em 15,2 %, como já era esperado, pois as concentrações dos gases CO e CO₂ atingindo altos valores, conseqüentemente, o oxigênio fornecido está sendo consumido na reação de combustão. A curva referente aos hidrocarbonetos registra um pico máximo no instante $t = 150$ min., com 993 ppm e depois, tende a decair, com valores próximos a 600 ppm.

10 °. Experimento: Ensaio nº. 13 da Matriz Experimental

O conjunto de resultados está representado nos gráficos das Figuras 3.29 a 3.31 e as condições adotadas em cada parâmetro estão descritas a seguir:

Umidade da madeira: secagem em estufa.

Temperatura interna do forno de ensaios: 100 °C.

Vazão de ar: 99 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “pata de anta”.

Volume das amostras: classe 2 (de 26 a $51 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Foram 1100 minutos de ensaio, onde 79,21 % da massa inicial (8,60 kg) foi consumida, restando 1,79 kg. Assim, obteve-se uma taxa de consumo de 6,19 g/min. e a taxa de queima heterogênea 3,78 g/min.

Após o ensaio, verificou-se que a casca do tronco manteve-se intacta, ocasionando valores de temperatura registradas por T_1 , T_2 e T_3 mais baixos, mas, ainda assim, foi possível detectar o instante em que a frente incandescente atingiu cada um dos termopares. A propagação da frente incandescente na região inferior do tronco ocorreu novamente devido às fissuras presentes no tronco seco. A temperatura máxima foi registrada pelo termopar lateral T_5 , atingindo 488 °C.

Verificou-se uma velocidade média de propagação da frente de incandescência de 5,45 cm/h. Inicialmente, ela propagou-se lentamente, acelerando com o tempo.

O ponto máximo da concentração de CO foi 1,86 %, correspondendo a concentrações de CO₂ e O₂ de 5,58 % e 15,3 %, respectivamente. O valor máximo referente à concentração de hidrocarbonetos foi atingido no início do teste com 691 ppm, embora no decorrer do ensaio os valores oscilassem entre 377 e 631 ppm.

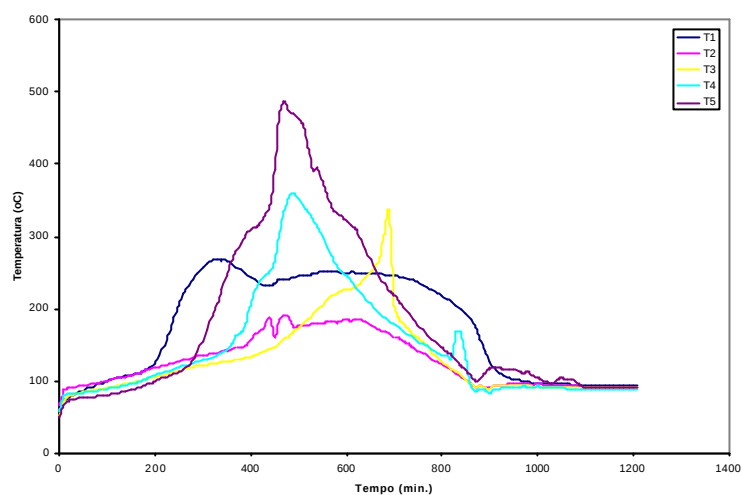


Figura 3.29 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.13.

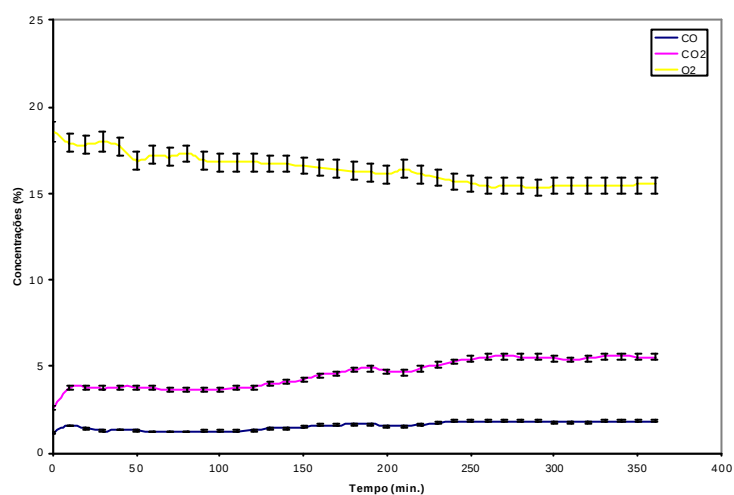


Figura 3.30 – Variação das concentrações de CO , CO_2 e O_2 em função do tempo, para o ensaio nº. 13.

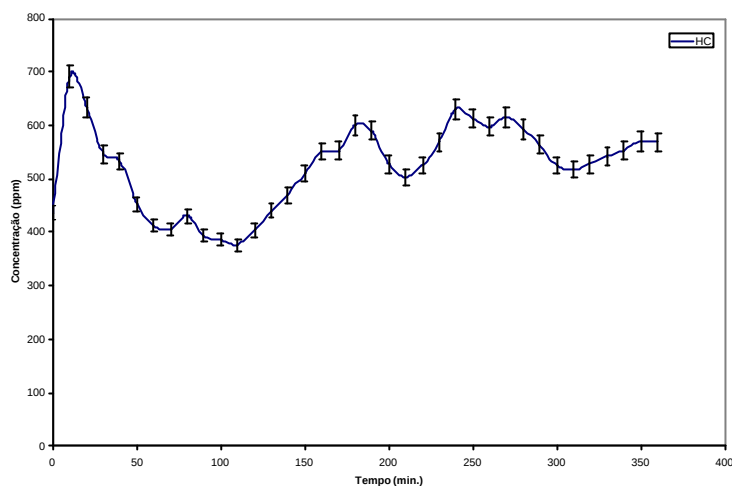


Figura 3.31 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.13.

11º. Experimento: Ensaio nº. 4 da Matriz Experimental

A seguir, encontram-se as condições adotadas neste ensaio e os resultados obtidos, representados pelos gráficos das Figuras 3.32, 3.33 e 3.34.

Umidade da madeira: secagem natural.

Temperatura interna do forno de ensaios: 100 °C.

Vazão de ar: 85 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “pata de anta”.

Volume das amostras: classe 3 (de 52 a 83x10⁻³ m³).

A amostra utilizada, com massa inicial igual a 19,500 kg, registrou, no término do teste 0,820 kg, restando apenas cinzas e partículas de madeira carbonizada. A duração do teste foi de 1730 minutos, acarretando uma taxa de consumo de 10,80 g/min, com 95,79 % da massa inicial sendo devolatilizada. Obteve-se uma taxa de queima heterogênea de 4,27 g/min, quando se considerou carbono puro no momento da reação.

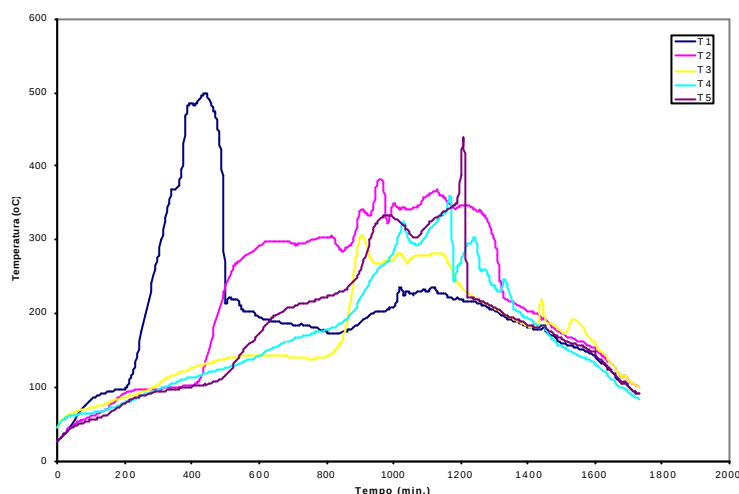


Figura 3.32 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.4.

A máxima temperatura, de 599 °C foi registrada pelo termopar T_1 . Em T_2 registrou-se temperaturas variando de 300 a 350 °C por um longo período. Em T_3 verificou-se temperaturas até 300 °C, indicando que esta região foi apenas pirolisada. Em T_4 e T_5 pode-se observar, após os picos de temperatura, uma queda abrupta na temperatura, indicando provavelmente, uma extinção da incandescência. Após alguns instantes percebe-se um crescente aumento na temperatura indicada pelo termopar T_4 , mas não atingindo os 300 °C, e então, ocorre o decréscimo de temperatura em todos os termopares, até atingir os 100 °C (temperatura interna do forno de ensaios), indicando o fim da combustão. A velocidade média de propagação da frente incandescente para este ensaio foi de 3,47 cm/h.

As máximas concentrações dos gases CO e CO₂ foram 2,67% e 7,46%, respectivamente, com O₂ registrando, simultaneamente, 13,7%. A concentração de HC também aumentou nestes instantes, atingindo um valor máximo de 820 ppm.

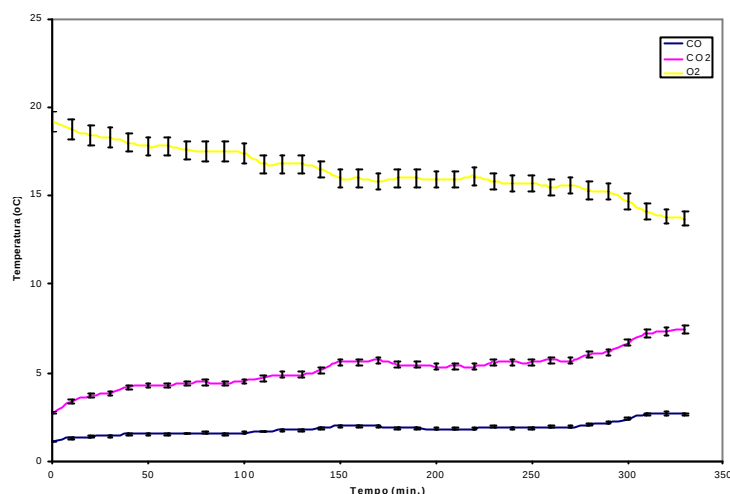


Figura 3.33 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 4.

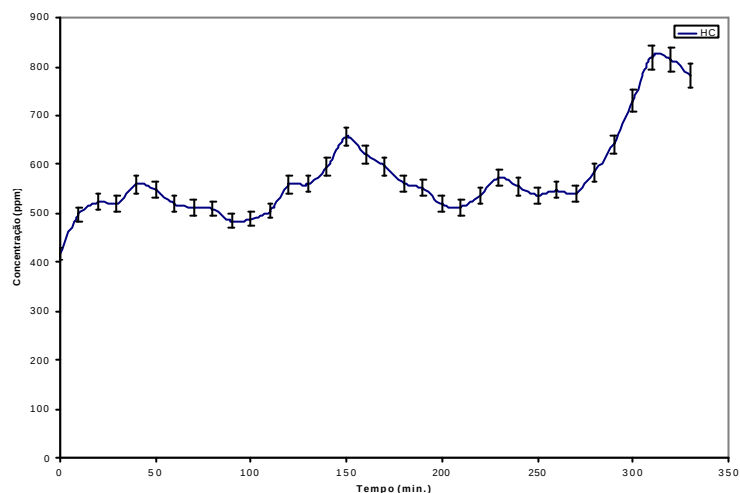


Figura 3.34 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 4.

12º. Experimento: Ensaio nº. 14 da Matriz Experimental

Seguem abaixo, as condições adotadas neste ensaio, bem como, as discussões e os resultados representados pelos gráficos das Figuras 3.35, 3.36 e 3.37.

Umidade da madeira: secagem em estufa.

Temperatura interna do forno de ensaios: 100 °C.

Vazão de ar: 113 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “preta”.

Volume das amostras: classe 3 (de 52 a $83 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

A amostra utilizada, com massa inicial de 16,50 kg foi inteiramente consumida durante 1600 minutos, restando apenas 0,554 kg de cinzas. Portanto, obteve-se uma taxa de consumo de 9,81 g/min. A porcentagem consumida foi de 96,6% em relação à massa inicial. Para estas condições obteve-se 4,03 g/min. de taxa de queima.

Através do gráfico da Figura 3.35 observa-se a passagem da onda incandescente através dos picos de temperatura registrados pelos cinco termopares, na ordem em que eles se posicionavam. A máxima temperatura, 500 °C, foi registrada pelo termopar 1, após 90 minutos de ensaio.

A velocidade de propagação da frente incandescente para este experimento foi 3,75 cm/h.

As concentrações para os gases CO e CO₂ foram, respectivamente, 0,98 % e 6,02 %, enquanto o gás O₂ atingiu 15,5 %. A concentração de HC esteve acima de 600 ppm durante todo o experimento, atingindo o máximo valor em 746 ppm.

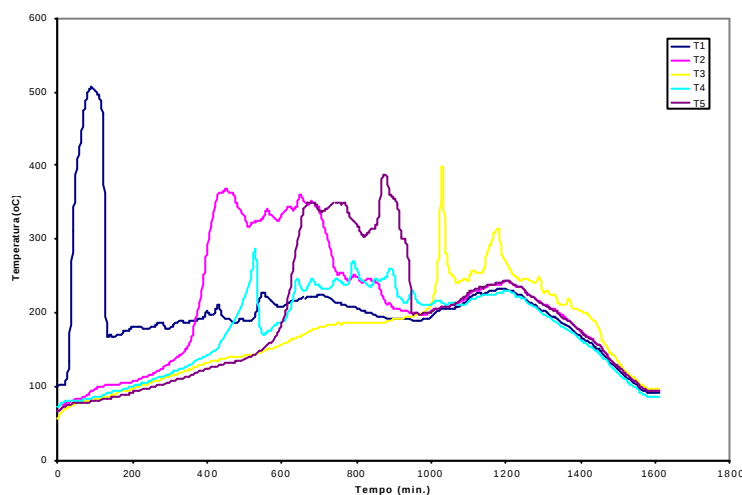


Figura 3.35 – Variação das temperaturas T₁ a T₅ em função do tempo, para o ensaio nº.14.

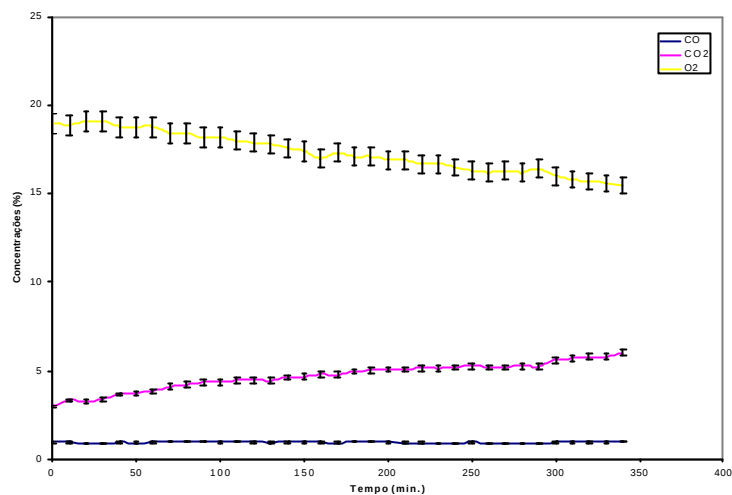


Figura 3.36 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 14.

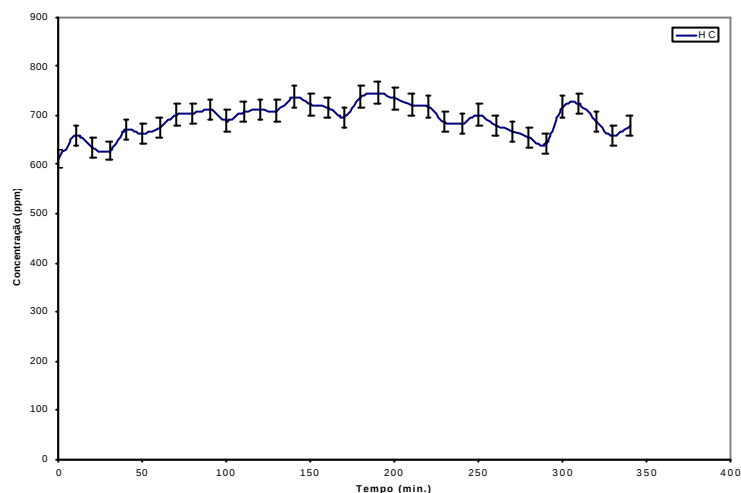


Figura 3.37 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.14.

13º. Experimento: Ensaio nº. 17 da Matriz Experimental

Apresentam-se nas Figuras 3.38, 3.39 e 3.40 os resultados obtidos neste ensaio. Os parâmetros adotados foram os seguintes:

Umidade da madeira: secagem em estufa.

Temperatura interna do forno de ensaios: 200 °C.

Vazão de ar: 85 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “branca”.

Volume das amostras: classe 3 (de 52 a $83 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Com massa inicial de 12 kg , os processos de pirólise e incandescência consumiram toda a amostra, em 1400 minutos, restando apenas cinzas com massa final igual a $0,290 \text{ kg}$. Portanto, registrou-se uma taxa de consumo de $8,36 \text{ g/min}$, onde $97,58 \%$ da massa inicial foi consumida. Para a taxa de queima heterogênea obteve-se $6,20 \text{ g/min}$.

Apesar da temperatura interna fixada para o forno de ensaios ser alta (200°C), as temperaturas registradas pelos termopares não atingiram 400°C . A máxima, de 396°C foi registrada pelo termopar lateral T_5 . Através da visualização do gráfico, nota-se uma queda brusca de temperatura aferida pelos termopares T_4 e T_5 , e a manutenção da temperatura interna do forno, indicando o desprendimento destes termopares da amostra. A velocidade média de propagação da frente de incandescência obtida para estes parâmetros foi $4,29 \text{ cm/h}$.

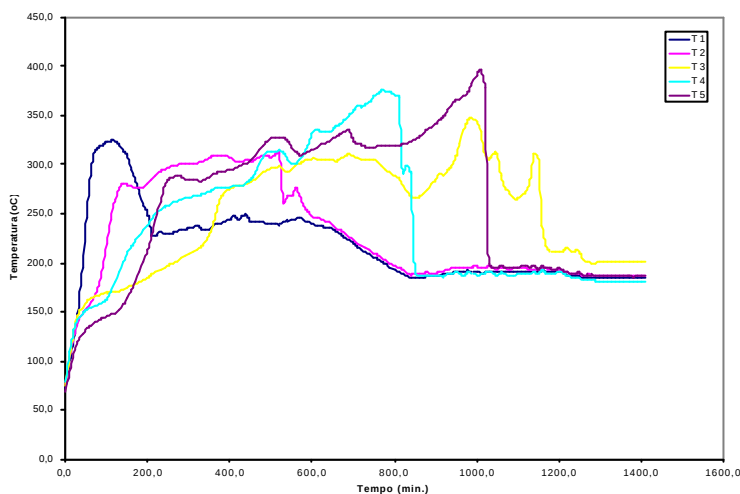


Figura 3.38 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio n.º.17.

O consumo de O_2 foi bastante alto, gerando concentrações altas para CO_2 e CO durante o decorrer do experimento. Após 260 minutos de ensaio, a concentração de O_2 caiu para 10% , enquanto os gases CO e CO_2 atingiram $3,77 \%$ e $11,58 \%$, respectivamente. Os hidrocarbonetos também foram emitidos em elevada concentração. Durante todo o ensaio foram registrados mais de 1000 ppm , atingindo o valor máximo

de 1997 ppm, após 130 minutos de teste. Acredita-se que a alta temperatura interna do forno e a vazão de ar no nível 1 propiciaram estas concentrações. Neste ensaio observou-se o maior consumo de O_2 e as mais elevadas concentrações registradas para os gases CO, CO_2 e HC, em relação aos outros experimentos.

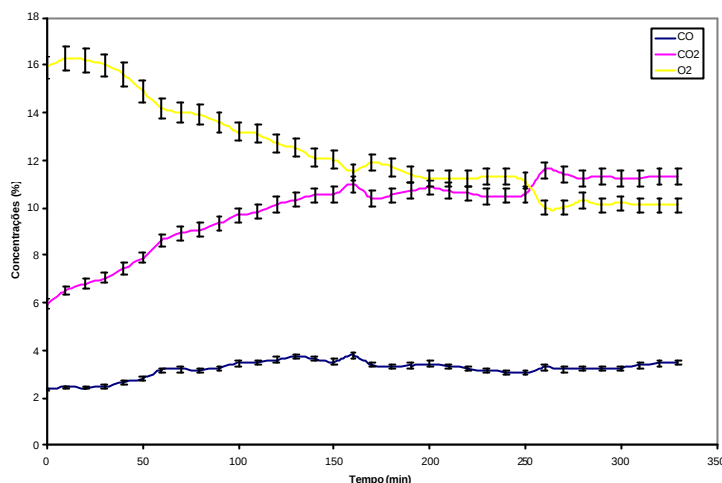


Figura 3.39 – Variação das concentrações de CO, CO_2 e O_2 , em função do tempo, para o ensaio nº. 17.

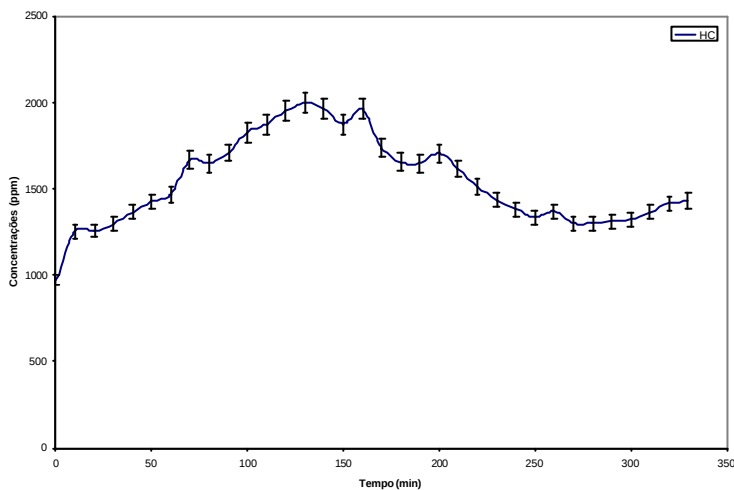


Figura 3.40 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 17.

14º. Experimento: Ensaio nº. 16 da Matriz Experimental

O conjunto de parâmetros adotados neste ensaio é apresentado a seguir, bem como os gráficos das Figuras 3.41, 3.42 e 3.43, com os resultados obtidos.

Umidade da madeira: secagem em estufa.

Temperatura interna do forno de ensaios: 200 °C.

Vazão de ar: 113 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “preta”.

Volume das amostras: classe 2 (de 26 a $51 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Este experimento teve uma duração mais rápida devido às condições adotadas, como por exemplo, temperatura interna do forno e vazão de ar com valores máximos (nível 3). A amostra ensaiada, com massa de 10 kg, foi consumida durante um tempo médio de 1000 minutos, restando apenas cinzas com massa final de 0,365 kg. Portanto, verificou-se uma taxa de consumo de 9,64 g/min. e 96,35 % de massa devolatilizada. Para a taxa de queima heterogênea calculou-se 6,99 g/min, a maior de todas em relação aos outros ensaios.

A temperatura máxima foi atingida pelo termopar 1, registrando 657 °C. Os picos de temperatura (Figura 3.41) estão posicionados muito próximos, indicando que a velocidade de propagação da onda de incandescência foi mais rápida em relação aos outros ensaios, 6 cm/h.

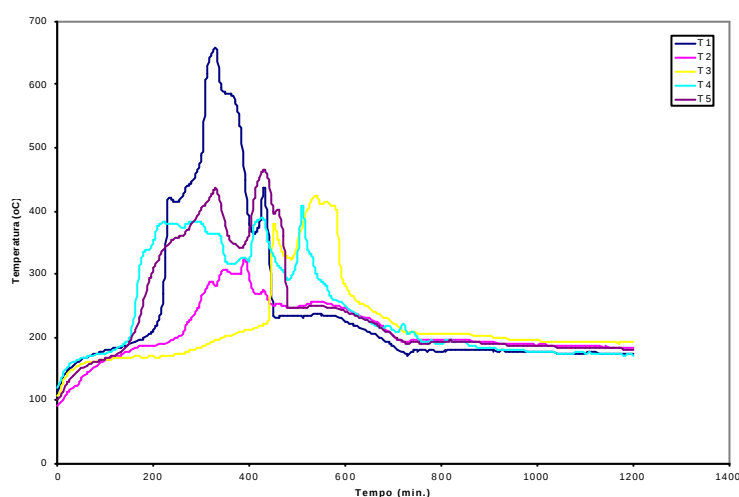


Figura 3.41 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.16.

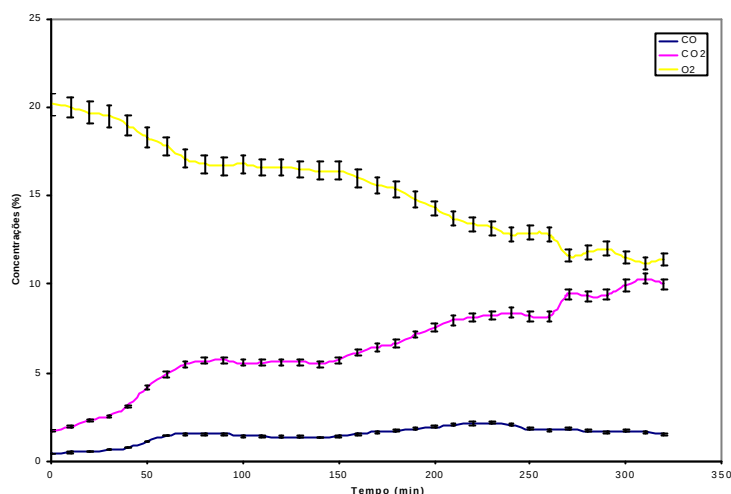


Figura 3.42 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 16.

Durante o desenvolvimento do ensaio, a concentração de CO₂ atingiu valores máximos próximos a 10,3 %, enquanto o CO registrou 2,13 % e, simultaneamente, a concentração de O₂ caiu para 11,2 % devido ao consumo de oxigênio durante a reação de combustão. Estes valores ocorreram após 310 minutos de ensaio. O pico de emissões de hidrocarbonetos foi atingido em outro instante, em $t = 200$ minutos, com 1630 ppm.

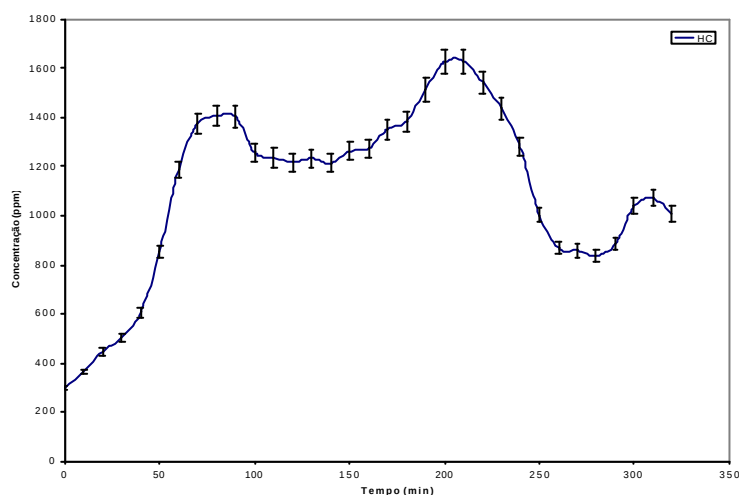


Figura 3.43 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.16.

15º. Experimento: Ensaio nº. 10 da Matriz Experimental

Para este novo ensaio foi adotado outro conjunto de parâmetros que está descrito a seguir. Os resultados encontrados estão representados nas Figuras 3.44 a 3.46.

Umidade da madeira: secagem em estufa.

Temperatura interna do forno de ensaios: ambiente.

Vazão de ar: 113 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “branca”.

Volume das amostras: classe 1 (até $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

A amostra utilizada possuía massa inicial igual a 4,6 kg e, após o término do ensaio, restaram cinzas e a casca superior do tronco, perfazendo 0,524 kg de massa final. Novamente, a frente de incandescência propagou-se pelas ranhuras da madeira, deixando a casca superior apenas carbonizada. Foram 88,61 % da madeira consumidos em 1160 minutos, registrando uma taxa de consumo de 3,51 g/min, enquanto a taxa de queima heterogênea ficou bem próxima, com 3,45 g/min.

Durante o decorrer do ensaio, a máxima temperatura foi atingida pelo termopar T_4 que registrou 407°C . No entanto, T_1 e T_5 também registraram temperaturas próximas a 400°C , enquanto T_2 e T_3 , posicionados na casca superior do tronco (apenas pirolisada), aferiram temperaturas em torno de 250°C . A velocidade de propagação da frente de incandescência, para estas condições, foi 5,17 cm/min.

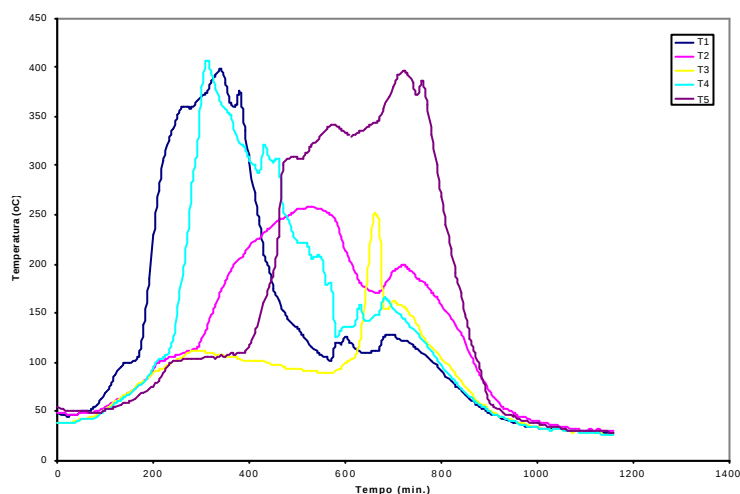


Figura 3.44 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.10.

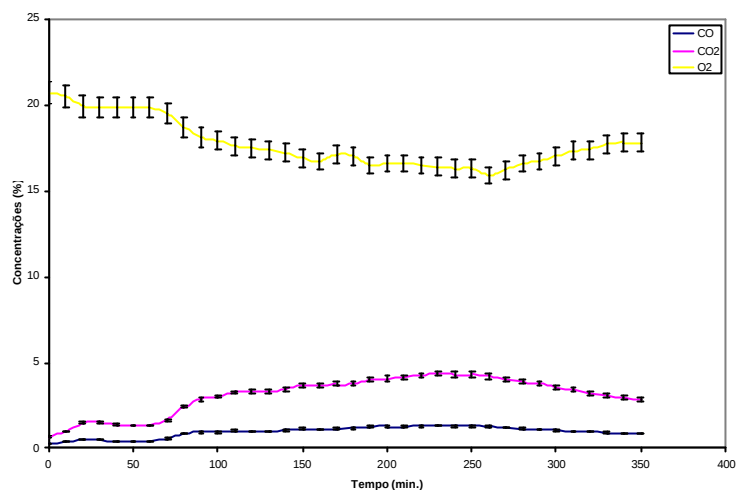


Figura 3.45 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 10.

As máximas concentrações de CO e CO₂, 1,33 % e 4,38 %, respectivamente, foram registradas no instante $t = 230$ minutos, acarretando a diminuição da concentração do O₂ para o valor mínimo de 15,9 %. As emissões de hidrocarbonetos também aumentaram neste instante, atingindo 545 ppm como valor máximo neste experimento.

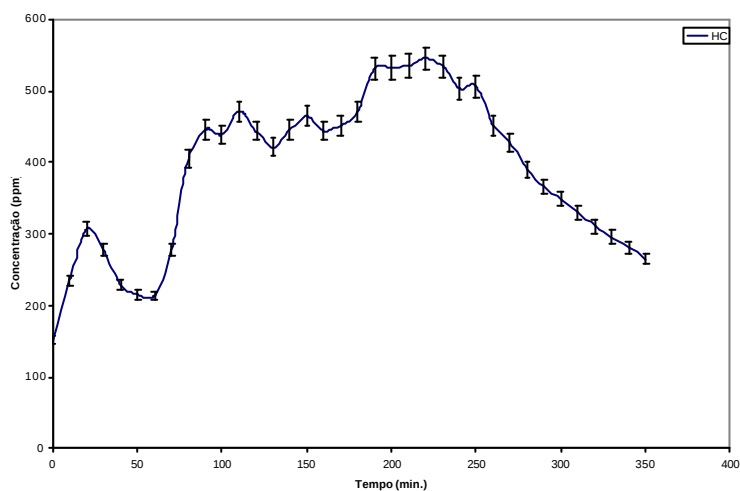


Figura 3.46 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.10.

16º. Experimento: Ensaio nº. 18 da Matriz Experimental

Nas Figuras 3.47 a 3.49 estão representados os gráficos com os resultados da variação da temperatura e da concentração dos gases com o tempo para as seguintes condições:

Umidade da madeira: secagem em estufa.

Temperatura interna do forno de ensaios: 200 °C.

Vazão de ar: 99 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “pata de anta”.

Volume das amostras: classe 1 (até $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Utilizou-se uma amostra com massa inicial de 4,800 kg. Após os processos de pirólise e incandescência restaram 0,164 kg em cinzas e partículas de madeira carbonizadas. O ensaio teve duração de 1610 minutos, acarretando uma taxa de consumo de 2,88 g/min. e taxa de queima igual a 1,79 g/min.

Os cinco termopares registraram temperaturas acima de 440 °C, isto é, a frente atingiu todos os pontos na ordem em que eles se posicionavam. A máxima temperatura foi atingida pelo termopar 2, com 548 °C. A velocidade média de propagação da frente incandescente obtida para estas condições foi 3,73 cm/h.

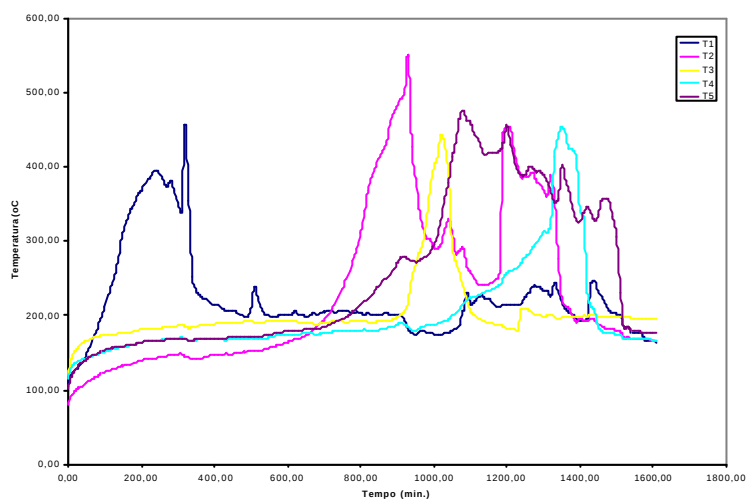


Figura 3.47 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.18.

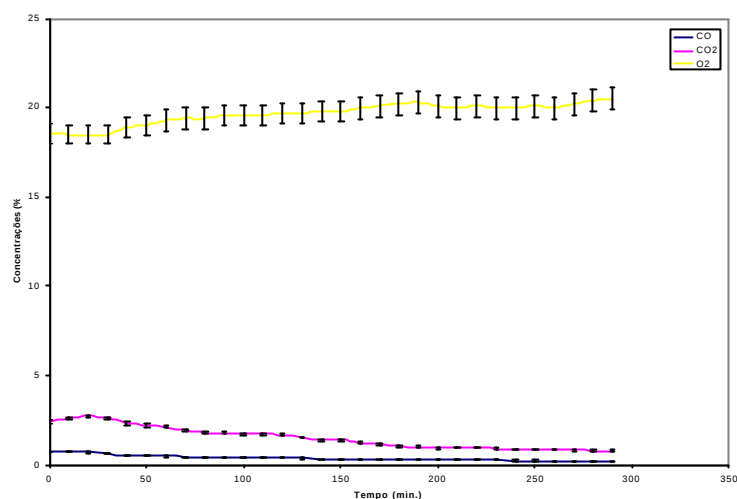


Figura 3.48 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 18.

Os valores máximos correspondentes às concentrações de CO e CO₂ ocorreram após 20 minutos de ensaio e foram, respectivamente, 0,76 % e 2,72 %, acarretando 18,5 % de concentração de O₂. Para os hidrocarbonetos registrou-se 403 ppm, também logo no início do ensaio, ocorrendo, em seguida uma diminuição das emissões, até atingir um patamar próximo a 100 ppm. Os valores encontrados neste experimento, referentes às concentrações de gases, parecem não ser tão significativos se comparados a outros, mas isto ocorreu devido ao pequeno volume da amostra ensaiada. Os números aqui encontrados são semelhantes àqueles do ensaio nº.1, onde o volume da amostra também pertencia ao nível 1.

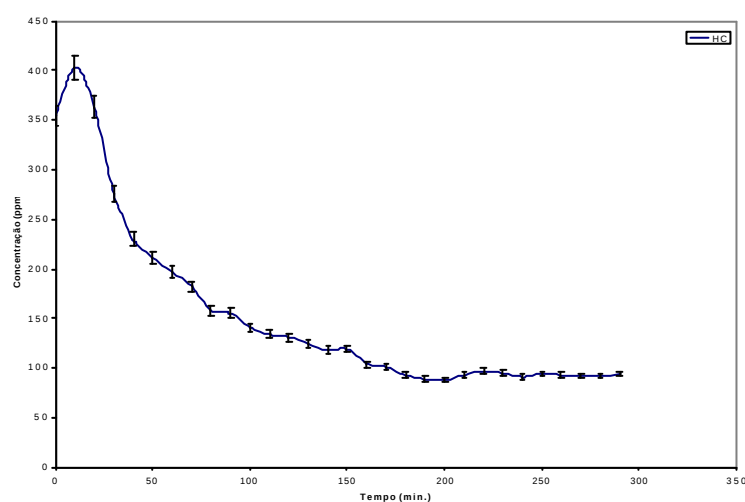


Figura 3.49 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº.18.

17º. Experimento: Ensaio nº. 6 da Matriz Experimental

Nas Figuras 3.50 a 3.52 têm-se os gráficos gerados neste ensaio, com as variações das concentrações de gases e temperatura em função do tempo. As condições adotadas foram as seguintes:

Umidade da madeira: secagem natural.

Temperatura interna do forno de ensaios: 100 °C.

Vazão de ar: 113 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “branca”.

Volume das amostras: classe 2 (de 26 a $51 \times 10^{-3} \text{ m}^3$).

Novamente, após o término do ensaio restaram apenas 0,250 kg em pedaços pequenos de carvão e cinzas da amostra de 15 kg. O tempo necessário para o desenvolvimento do teste foi de 1900 minutos, gerando uma taxa de consumo de 7,76 g/min. A taxa de queima calculada para este caso foi de 3,78 g/min.

Através das curvas referentes aos termopares, é possível visualizar os picos de temperatura, representando a passagem da frente incandescente no tronco. No final do ensaio, o decaimento da temperatura ocorre simultaneamente até a temperatura interna do forno (100 °C). A máxima temperatura foi atingida pelo termopar 1, com 485 °C. A velocidade de propagação da frente de incandescência, para estes parâmetros foi de 3,16 cm/h.

As concentrações dos gases CO e CO₂ aumentaram gradualmente até atingir valores máximos de 1,52 % e 5,03 %, respectivamente, e, simultaneamente, a concentração de O₂ diminuía, atingindo um valor mínimo de 16,2 %, no instante t = 260 minutos. Após 160 minutos de ensaio, a curva referente à concentração de hidrocarbonetos atingiu o valor máximo de 615 ppm.

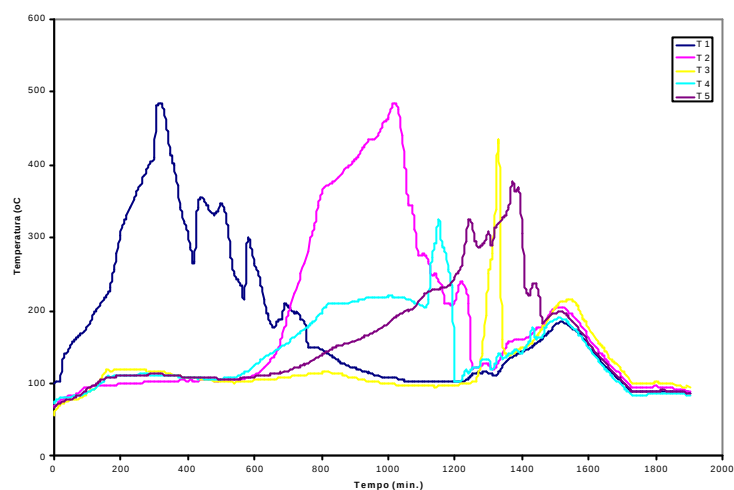


Figura 3.50 – Variação das temperaturas T_1 a T_5 em função do tempo, para o ensaio nº.6.

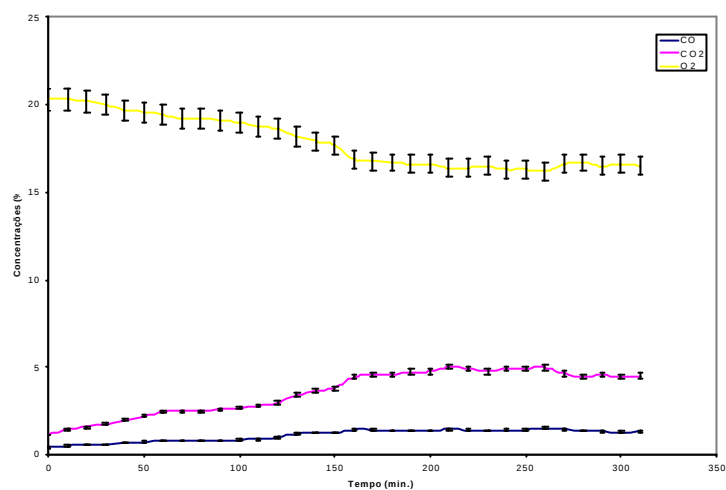


Figura 3.51 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 6.

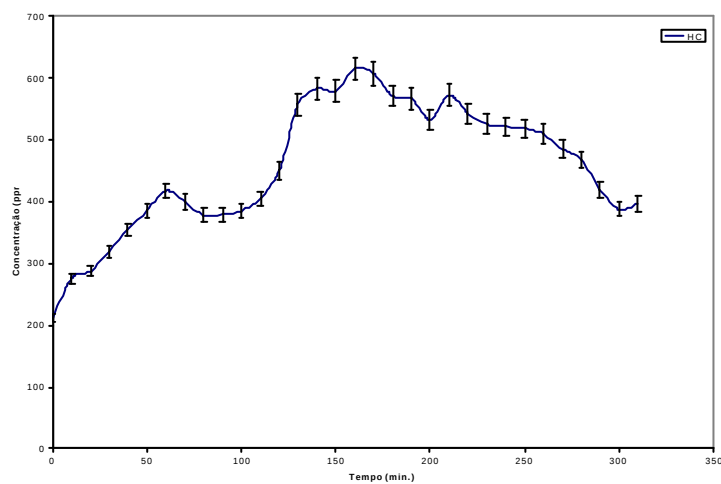


Figura 3.52 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 6.

18º. Experimento: Ensaio nº. 7 da Matriz Experimental

Os resultados obtidos, nestas condições estão representados nos gráficos das Figuras 3.53 a 3.55, onde foram adotados os seguintes parâmetros:

Umidade da madeira: secagem natural.

Temperatura interna do forno de ensaios: 200 °C.

Vazão de ar: 99 L/min.

Espécie da madeira: embaúba “branca”.

Volume das amostras: classe 3 (de 52 a 83x10⁻³ m³).

A amostra com massa inicial de 26,500 kg foi consumida durante 2670 minutos, restando apenas 0,284 kg em cinzas e partículas de madeira carbonizadas. Portanto, a taxa de consumo foi 9,82 g/min., enquanto para a taxa de queima heterogênea obteve-se 2,59 g/min.

Através da disposição das curvas do gráfico da Figura 3.53, concluiu-se que os termopares 1 e 2, provavelmente se soltaram do tronco, pois registraram temperaturas não superiores a 200 °C. Os picos de temperatura foram delineados após o instante t = 1500 minutos, registrados pelos termopares 3, 4 e 5; este último atingindo a temperatura máxima de 485 °C. Para este caso, a velocidade de propagação da frente de incandescência foi muito baixa se comparada aos resultados anteriores, obtendo-se apenas 2,25 cm/h.

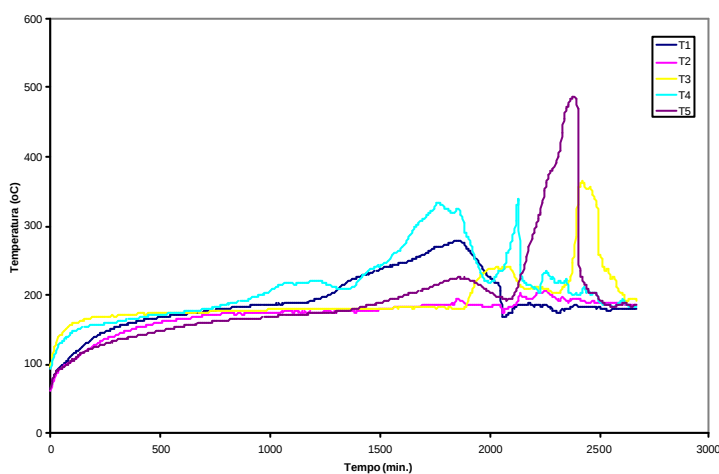


Figura 3.53 – Variação das temperaturas T₁ a T₅ em função do tempo, para o ensaio nº.7.

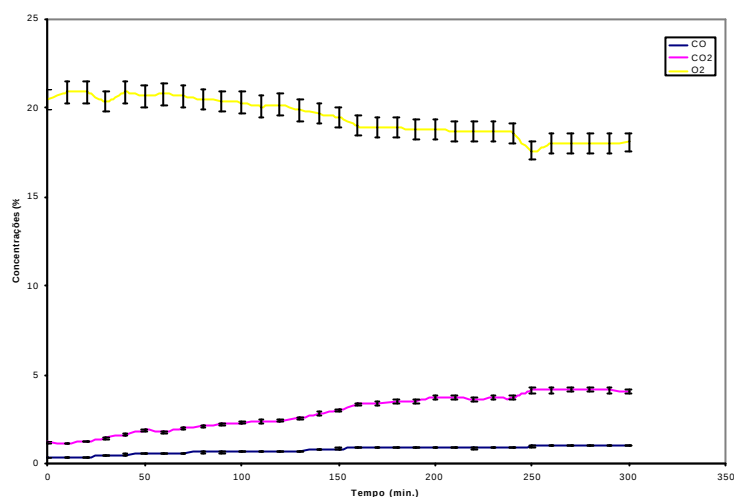


Figura 3.54 – Variação das concentrações de CO, CO₂ e O₂ em função do tempo, para o ensaio nº. 7.

No instante $t = 250$ minutos, a curva referente à concentração de O₂ registra o valor mínimo atingido durante o decorrer do teste com 17,6 %; simultaneamente ocorre um ligeiro aumento nas curvas referentes aos gases CO e CO₂, até atingir valores máximos de 1,04 e 4,17 %, respectivamente. A curva referente aos hidrocarbonetos registra o valor máximo no instante $t = 170$ minutos com 459 ppm, decrescendo logo em seguida, para 350 ppm.

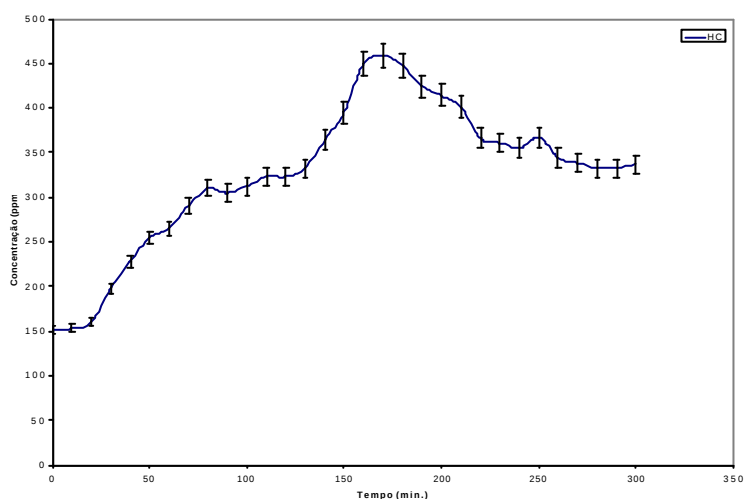


Figura 3.55 – Variação da concentração de HC em função do tempo, para o ensaio nº. 7.

3.2. Análise dos Resultados Utilizando “Planejamento de Experimentos”

Para uma melhor visualização dos resultados, foram inseridas na Tabela 3.1 todas as respostas obtidas em cada um dos ensaios realizados em laboratório.

Tabela 3.1 – Valores obtidos nas respostas para os 18 ensaios realizados.

Ensaio	V _{média} (cm/h)	Taxa Q. (g/min.)	T _{máx.} (°C)	[CO] _{máx.} (%)	[CO ₂] _{máx.} (%)	[HC] _{máx.} (ppm)	[O ₂] _{mín.} (%)
1	4,03	1,62	671	0,46	3,2	321	18,0
2	4,88	2,94	340	1,38	4,39	528	16,7
3	3,5	3,04	451	1,28	3,86	433	16,9
4	3,47	4,27	499	2,67	7,46	820	13,7
5	3,59	2,13	618	0,60	3,54	412	17,7
6	3,16	3,78	485	1,52	5,03	615	16,2
7	2,25	2,59	485	1,04	4,17	459	17,6
8	7,50	2,29	462	1,07	3,08	741	19,3
9	5,22	3,27	491	1,22	6,22	864	14,8
10	5,17	3,45	407	1,33	4,38	545	15,9
11	4,47	2,53	267	1,37	4,25	704	16,2
12	1,88	3,82	589	1,27	6,4	993	15,2
13	5,45	3,78	488	1,86	5,58	691	15,3
14	3,75	4,03	500	0,98	6,02	746	15,5
15	3,57	2,42	447	1,33	4,26	799	17,0
16	6,00	6,99	657	2,13	10,3	1630	11,2
17	4,29	6,20	396	3,77	11,58	1997	10,0
18	3,73	1,79	548	0,76	2,72	403	18,5

A partir destes dados foi realizado o cálculo dos efeitos dos fatores para cada um dos três níveis, em todas as respostas. Os efeitos indicam a intensidade da interferência de cada nível sobre a resposta final. Para o cálculo dos efeitos, considera-se a média das respostas de cada nível. Estes valores indicarão uma influência considerável ou desprezível, dependendo do valor da média geral referente à resposta em questão. Os resultados dos efeitos sobre as respostas seguem na Tabela 3.2. Por exemplo, a média geral para a variável vazão de ar (C) é $\overline{M_C} = 4,22$ cm/h obtida de todos os ensaios (1 a 18) na Tabela 3.1, coluna 2, V_{média}. O efeito de C no nível 1 é obtido dos ensaios 1, 4, 9, 11, 15 e 17, perfazendo 4,18. Para o cálculo do efeito de C no nível 2 empregam-se os ensaios 2, 5, 7, 12, 13 e 18, obtendo-se 3,63. Finalmente, para o efeito de C no nível 3, empregam-se os testes 3, 6, 8, 10, 14 e 16, cuja média é 4,85. Portanto, verifica-se que a resposta, no experimento, referente à variável velocidade aumenta para o fator C no nível 3 e permanece abaixo da média para os níveis 1 e 2.

Respostas	Velocidade (cm/h) $\overline{M} = 4,22$			Taxa de Queima (g/min.) $\overline{M} = 3,39$			Temperatura Máxima (°C) $\overline{M} = 489$			Concentração Máxima de CO (%) $\overline{M} = 1,45$			Concentração Máxima de CO ₂ (%) $\overline{M} = 5,36$			Concentração Máxima de HC (ppm) $\overline{M} = 761$			Concentração Mínima de O ₂ (%) $\overline{M} = 15,87$		
Efeitos Fatores	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃	M ₁	M ₂	M ₃
Umidade (A)	4,18	4,26	---	2,88	3,89	---	500	477	---	1,25	1,64	---	4,55	6,17	---	577	945	---	16,77	14,98	---
Temperatura (B)	3,99	3,83	4,83	2,90	3,40	3,86	454	506	506	1,18	1,49	1,67	4,41	5,32	6,35	587	680	1016	16,48	15,9	15,23
Vazão de ar (C)	4,18	3,63	4,85	3,38	2,84	3,93	462	511	494	1,80	1,15	1,39	6,16	4,47	5,44	917	581	785	14,95	16,83	15,83
Espécie (D)	4,08	3,89	4,69	3,64	3,56	2,95	588	427	452	1,11	1,73	1,50	5,95	5,64	4,49	828	824	632	15,4	15,57	16,65
Volume (E)	4,60	4,86	3,19	2,28	3,88	3,99	525	455	487	0,93	1,58	1,84	3,53	5,96	6,58	537	839	908	17,73	15,07	14,82

Tabela 3.2 – Resultados dos Efeitos sobre as Respostas.

$\overline{M}$: é a média geral para cada variável, obtida através de todos os ensaios.

M₁, M₂ e M₃ são os valores médios dos efeitos obtidos para cada variável, nos níveis 1, 2 e 3, respectivamente.

3.3. Comentários sobre os Resultados Usando “Planejamento de Experimentos”

Para uma melhor compreensão do desenvolvimento da incandescência em troncos de madeira, descreve-se, a seguir, a análise da influência que cada parâmetro exerceu sobre as 7 respostas obtidas nos 18 experimentos realizados em laboratório. A análise é baseada na técnica Projeto de Experimentos.

1ª. Resposta: Velocidade

Considerando, primeiramente a resposta referente à velocidade da frente de incandescência, concluiu-se que a variação do fator umidade registrou uma mínima interferência na resposta, os valores encontrados para os níveis 1 e 2, secagem ao natural e secagem em estufa, respectivamente, foram bastante próximos à média calculada (4,22 cm/h).

A temperatura no nível 3 (200 °C) proporcionou um aumento na velocidade da frente, enquanto os níveis 1 (temperatura ambiente) e 2 (100 °C) registraram respostas abaixo da média. Assim, aumentando-se a temperatura interna do forno, a velocidade de propagação da frente de incandescência é maior.

A vazão no nível 3 ($v = 113$ L/min.) aumentou a velocidade, enquanto os níveis 1 (85 L/min.) e 2 (99 L/min.) acarretaram, nesta resposta, efeitos com valores abaixo da média. Portanto, com o aumento da vazão obteve-se uma velocidade de propagação maior.

A espécie do nível 3, “embaúba Pata de Anta”, produziu uma velocidade de queima superior às outras. As espécies dos níveis 1 (“embaúba preta”) e 2 (“embaúba branca”) registraram efeitos abaixo da média verificada.

Para o volume nos níveis 1 (até $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$) e 2 (de 26 a $51 \times 10^{-3} \text{ m}^3$) as respostas indicaram valores acima da média, ou seja, para volumes menores a velocidade da frente de incandescência era maior, devido ao tamanho menor do diâmetro do tronco.

2ª. Resposta: Taxa de Queima

Para a variável umidade, no nível 2 (secagem em estufa) o valor da resposta referente à taxa de queima foi maior que no nível 1 (secagem ao natural). Neste, a porcentagem de umidade era de aproximadamente 3%, enquanto no nível 2 era de até 1%. De certa forma, esta pequena variação influenciou a resposta final, ocasionando uma taxa de queima 35% superior nas amostras em processo de secagem em estufa.

A variável temperatura apresentou comportamento já esperado: quanto maior a temperatura interna do forno de ensaios, maior era a taxa de queima, ou seja, aumentando-se a temperatura ocorre um maior consumo de biomassa, como pode ser constatado pelos valores descritos na Tabela 3.2.

A vazão de ar no nível 3 propiciou um aumento significativo na taxa de queima resultante, enquanto nos níveis 1 e 2 foram obtidos valores abaixo da média. Portanto, para vazões de ar maiores, a taxa de queima também aumentou. Conforme os resultados obtidos, concluiu-se que as espécies dos níveis 1 (“embaúba preta”) e 2 (“embaúba branca”) forneceram taxas de queima superiores à média calculada. Geralmente, estas eram maiores para a espécie do nível 1, a qual apresentava uma uniformidade maior em suas fibras, propiciando uma queima mais eficiente.

O fator volume foi a variável que mais influenciou a taxa de queima. Ela aumentou à medida que o volume da amostra foi aumentado, como pode ser verificado pelos dados da Tabela 3.2.

3ª. Resposta: Temperatura máxima

Nos ensaios onde foram adotadas as condições de secagem ao natural obteve-se uma temperatura máxima superior em apenas 2% em relação ao valor médio. Portanto, o fator umidade exerceu uma pequena influência sobre a variável resposta referente à máxima temperatura atingida durante o ensaio.

Considerando o fator temperatura, percebe-se claramente o forte efeito da temperatura de aquecimento do forno: as temperaturas máximas atingidas na amostra

durante os ensaios eram superiores à média calculada apenas nos casos em que as resistências eram acionadas para aquecimento interno do forno. Isto ocorreu nos ensaios para os níveis 2 e 3, ocasionando temperaturas máximas com valores bastante próximos entre si.

Para os níveis 2 e 3 da variável vazão de ar, verificou-se um ligeiro aumento da temperatura média registrada, enquanto no nível 1 (vazão mínima), a resposta ficou abaixo da média.

Considerando o fator espécie, observou-se que nos ensaios com a espécie 1 (“embaúba preta”) as temperaturas máximas foram superiores às atingidas pelas espécies da Floresta Amazônica (níveis 2 e 3). Estas, depois de secas, apresentavam ranhuras e quando sujeitas à ignição a frente de incandescência propagava-se, normalmente, por estas fendas, onde as condições de flamabilidade são mais favoráveis. Assim, os troncos eram queimados apenas na metade inferior, ou seja, a casca superior permanecia intacta. Como 3 termopares eram inseridos na parte superior do tronco, eles não eram atingidos diretamente pela frente incandescente, registrando assim, temperaturas um pouco mais baixas. Este fato não ocorria na espécie 1, por tratar-se de uma madeira com uma disposição de fibras mais uniforme.

As espécies com volume menor (nível 1) registraram temperaturas mais elevadas. Para os níveis 2 e 3, os valores permaneceram abaixo da média.

4ª. Resposta: Concentração máxima de CO (%)

Nos ensaios onde a secagem foi realizada em estufa (nível 2) verificou-se uma maior concentração de CO. Portanto, uma pequena variação de umidade na amostra influenciou a resposta final (% CO).

Nos níveis 2 e 3, com temperaturas internas de 200 e 300 °C, respectivamente, teve-se uma maior concentração de CO. À medida que se aumentava a temperatura interna do forno, havia uma maior formação deste gás. Para temperatura ambiente (nível 1), os valores ficaram abaixo da média.

Para a variável vazão de ar verificou-se que os ensaios com vazões no nível baixo produziam maior concentração de CO. Nos níveis médio e intermediário observou-se uma concentração inferior ao valor médio, devido ao excesso de oxidante presente na reação.

A concentração de CO foi maior, ou, acima da média, para as espécies da Amazônia (níveis 2 e 3). Os troncos da espécie “embaúba preta” (regional) apresentaram valores de concentrações menores.

A produção de CO é diretamente proporcional ao volume da amostra. Para ensaios com amostras de volume do nível 3, o aumento na emissão foi de 27% em relação à média calculada.

5ª. Resposta: Concentração máxima de CO₂ (%)

Novamente, nos ensaios onde a secagem foi realizada em estufa obteve-se uma maior concentração de CO₂. Portanto, uma pequena variação de umidade nas amostras também afetou esta resposta.

Conforme os dados da Tabela 3.2 pode-se concluir novamente que quanto maior a temperatura interna do forno de ensaios, maior era a formação de CO₂. O efeito de B no nível 3 (200 °C) foi bastante significativo para esta resposta.

Considerando a influência do fator C (vazão de ar) sobre esta resposta, verificou-se uma formação de CO₂ bastante significativa para o nível 1. Nos demais, os valores ficaram abaixo da média registrada, repetindo o que ocorreu na resposta referente à concentração de CO.

A concentração de CO₂ foi superior à média para as espécies dos níveis 1 e 2. Para a espécie 3 (“embaúba pata de anta”) a formação deste gás foi mais baixa. Portanto, as amostras das espécies “embaúba branca” e “embaúba preta” emitiram maior quantidade de CO₂ durante os ensaios.

O fator volume interferiu na produção de CO_2 durante o processo de incandescência. Quanto maior o volume da amostra, maior era a concentração deste gás, assim como para o gás CO. Para ensaios com amostras de volume do nível 3, o aumento na emissão deste gás foi de 23% em relação à média obtida.

6ª. Resposta: Concentração máxima de HC (ppm)

A variável umidade no nível 2 (secagem em estufa) aumentou a produção de HC, ou seja, uma mínima diminuição na umidade da amostra propiciou um aumento de 64% na emissão de hidrocarbonetos em relação ao nível 1.

O fator B (temperatura) teve uma influência significativa sobre a produção de HC. Na medida em que se aumentava a temperatura interna do forno de ensaios, as concentrações de HC também tornavam-se maiores. Para ensaios com temperatura no nível 3, o aumento na emissão foi de 73% em relação ao nível 1.

O fator C no nível 1 registrou o maior valor para esta resposta, ou seja, para a vazão no nível baixo (85 L/min) houve maior formação de HC.

Nos ensaios com troncos das espécies dos níveis 1 e 2, “embaúba preta” e “embaúba branca”, respectivamente, ficou evidente o aumento na quantidade de hidrocarbonetos.

Considerando o fator E (volume), as concentrações dos gases gerados foram acima do valor médio para os níveis 2 e 3, ou seja, quanto maior o volume da amostra, maior era a formação de hidrocarbonetos, repetindo o que já havia ocorrido com as emissões de CO e CO_2 .

7ª. Resposta: Concentração mínima de O_2 (%)

O fator umidade no nível 2 produziu uma combustão com maior consumo de O_2 . Portanto, quando a secagem era realizada em estufa, a concentração de O_2 era minimizada, caracterizando uma combustão mais completa.

O fator B (temperatura) no nível 3 acarretou menor concentração de O₂. Através dos dados da Tabela 3.2, pode-se concluir que quanto maior a temperatura, maior o consumo de O₂ durante a combustão.

Analisando a variável C, observou-se o que já era esperado, a menor concentração de O₂ ocorreu no nível 1, onde a vazão de ar era menor (85 L/min.). Para os níveis 2 (99 L/min.) e 3 (113L/min.) os efeitos ficaram acima da média.

As espécies dos níveis 1 e 2 produziram, durante os ensaios, valores de concentrações de O₂ mais baixas. Portanto, para as espécies “embaúba preta” e “embaúba branca” obteve-se uma combustão mais eficiente. Estes valores abaixo do percentual do oxigênio atmosférico são devidos à queima heterogênea.

Conforme os valores obtidos, a concentração de O₂ era minimizada na medida em que o volume era aumentado. Para amostras com volume na faixa de 52 a 83×10⁻³ m³ houve maior consumo de O₂. Assim, concluiu-se novamente que o fator volume é um parâmetro que influenciou as respostas referentes às concentrações.

De um modo geral, todos os parâmetros interferiram nas respostas finais obtidas. Alguns acarretaram efeitos maiores e outros menores, mas a variação de um nível para outro provocava alterações nas respostas consideradas neste processo.

3.4. Resultado da Análise de Cromatografia do Alcatrão

O alcatrão possui consistência espessa, “xaroposa” e de cor escura. A princípio, ele é um gás formado por hidrocarbonetos de alto peso molecular que se condensa quando em contato com temperaturas mais baixas. É originado principalmente durante a pirólise. Através de análise de cromatografia pôde-se detectar várias substâncias presentes no alcatrão coletado em apenas um dos ensaios realizados. A análise foi executada em um cromatógrafo a gás HP 6890 GC, com um detector HP 5973 (“mass selective”). Retirou-se 5 ml da amostra original e colocou-se em um balão volumétrico de 25 ml, completando o volume com etanol absoluto (isento de água). Desta solução preparada, tomou-se 5 microlitros com uma seringa e introduziu-se no cromatógrafo. A

temperatura inicial foi fixada em 45 °C, com rampa de temperatura de 30 °C/min e temperatura final de 300 °C. Foi utilizado o gás Hélio como gás de arraste.

As principais substâncias identificadas foram:

- 80,75 % de ácido acético;
- 3,17 % de fenóis;
- 1,95 % de butirólactona;
- 1 % de ácido propanóico;
- 0,28 % de 2-metil, 2-ciclopentenona-1.

Outras substâncias foram registradas, mas em porcentagens menores que 0,50 %.

3.5. Análises de CHN das Cinzas e de Composição de Elementos da Madeira e das Cinzas Produzidas

Foram coletadas amostras das cinzas de cada espécie ensaiada para que fossem realizadas análises do teor de CHN e da composição de elementos. Na Tabela 3.3 encontram-se as porcentagens de carbono, hidrogênio e nitrogênio presentes nas cinzas. Na Tabela 3.4 estão elencados os elementos encontrados com suas respectivas concentrações.

Tabela 3.3 – Resultado da análise de CHN nas cinzas (% em massa).

Amostras	C (%)	H (%)	N (%)
Embaúba “preta”	8,01	1,48	0,27
Embaúba “pata de anta”	9,57	0,94	0,16
Embaúba “branca”	12,81	1,79	0,23

Tabela 3.4 – Resultados da análise de composição de elementos das cinzas (% em massa).

Elemento	Concentração (%)		
	“Preta”	“Pata de Anta”	“Branca”
Ca (CaO)	10,0 (14,0)	19,5 (27,3)	14,4 (20,1)
Na (Na ₂ O)	0,21 (0,28)	0,57 (0,77)	0,51 (0,69)
K (K ₂ O)	30,0 (36,1)	18,8 (22,6)	19,4 (23,4)
Mg (MgO)	11,9 (19,7)	10,9 (18,0)	6,59 (10,9)
Al (Al ₂ O ₃)	0,04 (0,07)	0,09 (0,17)	0,30 (0,57)
Fe (Fe ₂ O ₃)	0,06 (0,08)	0,15 (0,21)	0,72 (1,03)
Sr (SrO)	0,10 (0,12)	0,61 (0,72)	0,40 (0,47)
B (B ₂ O ₃)	0,008 (0,026)	0,030 (0,10)	0,024 (0,077)
Ba (BaO)	0,080 (0,089)	0,051 (0,06)	0,048 (0,054)
Mn (MnO ₂)	0,41 (0,65)	2,71 (4,29)	10,4 (16,4)
Ti (TiO ₂)	0,003 (0,005)	0,007 (0,012)	0,014 (0,023)
V (VO ₃)	---	---	0,004 (0,008)
Cu (CuO)	0,006 (0,008)	0,015 (0,019)	0,018 (0,023)
Zn (ZnO)	0,009 (0,011)	0,028 (0,035)	0,037 (0,046)
Li (Li ₂ O)	0,001 (0,002)	0,003 (0,007)	0,003 (0,056)
S (SO ₄)	0,15 (0,46)	1,57 (7,70)	1,21 (3,62)
P (PO ₄)	0,98 (3,0)	1,26 (3,90)	0,82 (2,50)
Si (SiO ₂)	0,96 (2,06)	0,23 (0,50)	1,01 (2,16)
Perda ao fogo/1000 °C	27,2	30,0	25,5
Acumulado em óxidos	103,9	113,4	107,6

Observações:

- O teor acumulado em óxidos compreende óxidos + CO₂ + carbono.
- Nas três espécies verificadas, constatou-se maior concentração dos seguintes elementos: Ca, K e Mg. Nas espécies da Amazônia (Embaúbas “pata de anta” e “branca”) verificou-se também quantidades significativas de Mn, S e P. Portanto, estes foram os seis principais elementos encontrados nas cinzas geradas após o processo de incandescência.

- A embaúba “branca” foi a espécie onde se obteve maior teor de carbono e hidrogênio presentes nas cinzas.

Na Tabela 3.5 seguem os resultados da análise de composição de elementos para as 3 espécies de Embaúba utilizadas.

Tabela 3.5 – Resultados da análise de composição de elementos da madeira utilizada

Elemento	Madeiras, mg/kg		
	“Preta”	“Pata de Anta”	“Branca”
Ca	3700	560	790
Na	70	70	70
K	2300	1300	2300
Mg	3000	460	580
Al	1100	30	20
Fe	440	70	40
Sr	---	---	---
B	10	20	10
Ba	20	4	10
Mn	100	300	70
Ti	8	0,6	0,5
V	---	---	---
Cu	2	3	3
Zn	7	5	5
Li	---	---	---
S	150	80	140
P	330	60	60
Si	5900	190	120

3.6. Comparação dos valores de velocidade da frente incandescente da literatura com àqueles encontrados nos ensaios de laboratório.

Nos ensaios realizados, a velocidade da frente de incandescência variou de 1,88 cm/h a 7,50 cm/h. Segundo Puri (1993), em materiais celulósicos, a velocidade da onda

de propagação é de 40 cm/h, um valor que é 10 vezes maior que aquele encontrado nos experimentos realizados. No entanto, Brenden e Schaffer (1980) determinaram velocidades de incandescência para os materiais descritos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Velocidade da frente de incandescência para diversos materiais.

Material	Velocidade (cm/h)
Serragem de madeira (<i>Família Fagaceae</i>), 200h	6,0
Carvão, < 104µm	6,0
Cacau, < 40 µm	9,6
Licopódio (<i>Família Lycopodiácea</i>), < 40 µm	11,4
Fibra plástica, 0,27 g/cm ³	12,0
Serragem úmida, 76-152 m	14,4
Cigarro, entre sopros	18,0
Rolo de papel, Ø = 0,66 cm, 40 °C	18,0
Rolo de papel, Ø = 0,4 cm, 40 °C	26,4
Papelão, 1 cm de largura, 0,076 cm de espessura, 60 °C	36,0
Fio de algodão, Ø = 0,028 cm; 0,7 g/cm ³	324,0
Barbante de algodão Ø = 0,045 cm; 0,22 g/cm ³	648,0

CAPÍTULO 4

OBSERVAÇÕES SOBRE INCANDESCÊNCIA EM QUEIMADA FLORESTAL

4.1 Local do Ensaio

O teste de queimada florestal foi realizado no dia 20 de agosto de 2001, em uma área de 200x200 m² localizada na Fazenda Caiabi, município de Alta Floresta, a 800 km ao norte de Cuiabá, no estado de Mato Grosso. O intuito era simular uma queimada feita no interior da floresta tropical. O local foi escolhido por estar situado entre a floresta amazônica intocada e a região de ocupação humana. A área do ensaio era plana, com densidade florística típica da região amazônica, isto é, floresta tropical. As coordenadas do local da queimada são: S 9° 58' 24" e W 56° 20' 75".

Após a queimada, alguns troncos permaneceram queimando em processo de incandescência por mais algumas horas e, dependendo de determinadas características da madeira, como por exemplo, a porosidade, queimaram por vários dias. Há dados de um tronco, de grandes dimensões, que permaneceu queimando sem chamas por até 45 dias. No dia seguinte à queimada havia 59 troncos incandescentes. Destes, foram escolhidos 11 para realizar o monitoramento do processo de incandescência, ilustrados com fotos tiradas com câmera digital, marca Kodak, modelo DC 290. O acompanhamento do desenvolvimento da frente de incandescência foi feito até três dias após a queimada (23/08).

4.2 Tipos de incandescência observados após a queimada florestal

Após o período de chamas, foram observados e fotografados vários tipos de incandescência. O processo inicia-se quando um tronco recebe calor iniciando as reações de combustão (ignição). Uma vez iniciado, e, garantidas algumas condições, o processo torna-se auto-sustentável. No processo de incandescência, são produzidos gases combustíveis (voláteis) e produtos da reação heterogênea gás-sólido. As propriedades físico-químicas da madeira determinam o grau de toxicidade da matéria volátil. O processo de incandescência pode, em função das condições locais, migrar para queima com predominância na fase gasosa (incêndio). A queima ocorre de maneira

muito semelhante a um cigarro aceso podendo, em alguns casos, consumir a matéria orgânica quase na totalidade, restando apenas cinzas.

As queimadas são um dos maiores emissores de CO₂ na atmosfera. Só na Amazônia devasta-se 20.000 km² por ano, e a porcentagem maior do consumo de biomassa é por combustão sem chama (Ward et al, 1992).

Além dos onze troncos que foram monitorados, outros foram fotografados para melhor ilustrar os fenômenos ocorridos após o período de chamas, cada um deles com uma característica peculiar. Nas fotos das Figuras 4.1 a 4.18 têm-se os vários tipos de incandescência encontrados nesta queimada florestal.



Figura 4.1 – Tronco incandescente ilustrando os diferentes processos na incandescência.

Na Figura 4.1 estão ilustradas as três principais fases do processo de queima sem chama homogênea: secagem, pirólise e incandescência. A zona de reação heterogênea ocorre logo após a camada de cinza. O calor produzido nesta frente reativa, é conduzido longitudinalmente no sentido da parte fria do tronco. Duas regiões são então formadas:

(i) a região de pirólise que se caracteriza pela emissão de voláteis (fumaça branca) com carbonização da biomassa e (ii) região de secagem adjacente à região de pirólise. Este é um caso típico de queima sem chama em florestas tropicais.

Na Figura 4.2 pode-se observar a formação de cinzas com estrutura diferentes daquela na Figura 4.1. Naturalmente as taxas de transferência de calor e massa através das camadas de cinzas são diferentes, e, portanto, os troncos estarão sujeitos a velocidades de propagação distintas.



Figura 4.2 – Troncos fibrosos queimando por incandescência.

Comparando-se as queimas da Figura 4.3 com as anteriores, verifica-se, claramente, a ocorrência de uma nova estrutura de cinzas, bem como um avanço da frente incandescente, que tem peculiaridades em relação às queimas ilustradas nas Figuras 4.1 e 4.2.



Figura 4.3 – Tronco em brasa, produzindo grande quantidade de cinzas.

Nas fotos seguintes, Figuras 4.4 a 4.6, foram registrados troncos incandescentes em pontos de cruzamento. Pode-se observar que esta disposição de troncos facilita a manutenção da frente incandescente, pelo menos nos períodos iniciais do processo. Após queimarem por um certo tempo, esta geometria (cruzamento) deixa de existir favorecendo a extinção. Na Figura 4.4 pode-se ver um tipo clássico de queima em cruzamentos.

Na Figura 4.5 observa-se a ocorrência de incandescência em cruzamento de troncos com diâmetros distintos.

Na Figura 4.6, o processo se desenvolveu com a presença de vários troncos. Devido ao excesso de biomassa a queima parece ser mais lenta que nos casos apresentados anteriormente. A presença de fumaça indica que existem frentes incandescentes em vários pontos dos cruzamentos.



Figura 4.4 – Incandescência no cruzamento de dois troncos.



Figura 4.5 – Incandescência em cruzamento de troncos de diferentes diâmetros.

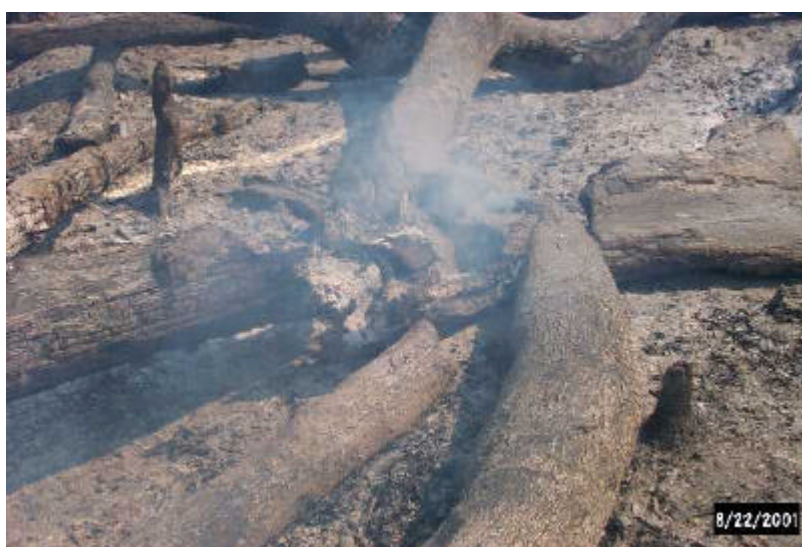


Figura 4.6 – Incandescência em cruzamento com vários troncos.

Um outro tipo característico de geometria de queima pode ser visto na Figura 4.7. Neste caso a frente se propaga na parte mais inferior do tronco. Os processos combinados de transferência de calor e massa são determinantes na manutenção do processo com estas características.



Figura 4.7 – Onda de incandescência propagando-se apenas na metade inferior do tronco.

Os processos de transferência de calor e massa são determinantes na estabilidade e sustentação da incandescência. Na Figura 4.8, verifica-se um modo particular de propagação com formato cônico presente em troncos com cavidade interna axial. Neste tipo de propagação a perda de calor para o meio tanto por convecção quanto por radiação são minimizadas. Em contrapartida, o fluxo de ar para a zona de reação heterogênea é minimizado, porém suficiente para manter a queima. As cinzas provenientes da queima são depositadas na parte interior do tronco, contribuindo também na minimização das perdas de calor.



Figura 4.8 – Tronco oco, de 30 cm de diâmetro, queimando sem chamas, internamente, com as cinzas sendo depositadas em sua casca inferior.

Em troncos com baixo índice de porosidade, a manutenção de uma frente estável e auto-sustentada é mais difícil. Na Figura 4.9, mostra-se um tronco com estas características. A presença de uma quantidade modesta de fumaça indica a ocorrência de propagação com velocidades menores. Observa-se, também, o formato cônico na frente de queima heterogênea. Conforme discutido, esse formato minimiza as perdas de calor para o meio.



Figura 4.9 – Tronco maciço, com 26 cm de diâmetro, queimando lentamente como um cigarro.

A incandescência pode também se propagar em direções que não sejam predominantemente axiais. A Figura 4.10 apresenta um tipo de propagação que ocorre nas duas direções, transversal e longitudinal. Essa parte lateral do tronco em incandescência recebeu grandes quantidades de calor pela queima de biomassa nas imediações. A intensidade da queima foi tal que estabeleceu uma região de queima com dimensões suficientes para permitir a propagação em ambas as direções. Algo semelhante ocorreu no tronco da Figura 4.11.



Figura 4.10 – Propagação da onda de incandescência na casca de um tronco de 53 cm de diâmetro.



Figura 4.11 – Incandescência na lateral de tronco com 25 cm de diâmetro.

Em alguns casos, a queima da biomassa nas vizinhanças do tronco estabelece diversos focos de propagação de queima heterogênea. Isto pode ser visto na Figura 4.12. Verifica-se, também, um longo depósito de cinzas provenientes da combustão por incandescência na base do tronco. Dadas as características deste tronco, o processo de queima alterna-se entre chama visível na fase gasosa (homogênea) e na fase heterogênea (incandescência). O vigor da queima, com essa alternância, é comprovado pela Figura 4.13, onde se percebe a queima quase completa do tronco num espaço de 24 horas.



Figura 4.12 – Tronco com vários pontos em incandescência.



Figura 4.13 – Tronco da Figura 12 após 24 horas de queima.

A emissão de gases tóxicos é um fenômeno de grande importância na queima incandescente. Em alguns casos as condições de queima favorecem esta produção intensa. Isto pode ser observado na Figura 4.14. Comparando-se os dois focos principais em incandescência, pode se observar que a emissão de fumaça é maior na parte superior da figura. Na parte inferior, a taxa de reação é mais intensa, de forma que parte dos voláteis é consumida por queima homogênea.



Figura 4.14 – Tronco com pontos incandescentes e chama, produzindo muita fumaça.

Na Figura 4.15, verifica-se uma grande quantidade de cinzas ao redor do tronco incandescente, funcionando como isolante térmico que favorece a manutenção do processo. Ao mesmo tempo, as cinzas são permeáveis, permitindo a passagem do oxigênio necessário para a combustão heterogênea.



Figura 4.15 – Tronco incandescente sobre um “tapete” de cinzas.

A importância na investigação de fenômenos de incandescência se dá pelo elevado grau de queima da biomassa em comparação com a fase de chama, onde apenas folhas e galhos queimam com mais eficiência. Pelas dimensões do tronco da Figura 4.16 pode-se ter uma idéia da quantidade de emissões de CO e CO₂ lançadas no ambiente.



Figura 4.16 – Tronco (comprimento: 20 m) após algumas horas em incandescência.

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam uma visão panorâmica do sítio queimado onde pode-se verificar o grande número de focos de queima do tipo incandescente. Em alguns instantes foi possível identificar mais de 50 pontos distintos em incandescência.



Figura 4.17 – Vista panorâmica onde focos de incandescência são identificados.



Figura 4.18 – Outra vista panorâmica dos focos de incandescência.

4.3. Descrição dos Dados de Temperatura e Velocidade de Queima nos Troncos

Os troncos incandescentes escolhidos para monitoramento foram identificados através de placas numeradas de 1 a 11 que facilitaram a localização dos mesmos nas medições. A escolha de um número maior de troncos tem diversas implicações. Um número excessivo significa medições com menor frequência. Dadas as dificuldades em se localizar os troncos e obter-se as medições, eram necessários três membros na equipe. Por questões de segurança, a identificação foi realizada no dia seguinte à queimada (21/08), na parte da manhã

Metodologia

As temperaturas características do processo de incandescência foram obtidas com um pirômetro ótico a laser da marca Raytek, modelo ST6, com confiabilidade de medida até 600 °C. As temperaturas obtidas são de regiões próximas à incandescência (a cada 5 cm, até 50 cm) e região de cinzas, conforme mostra o esquema da Figura 4.19 abaixo. O ângulo de propagação (α) da frente de incandescência em relação à normal ao solo também foi estimado.

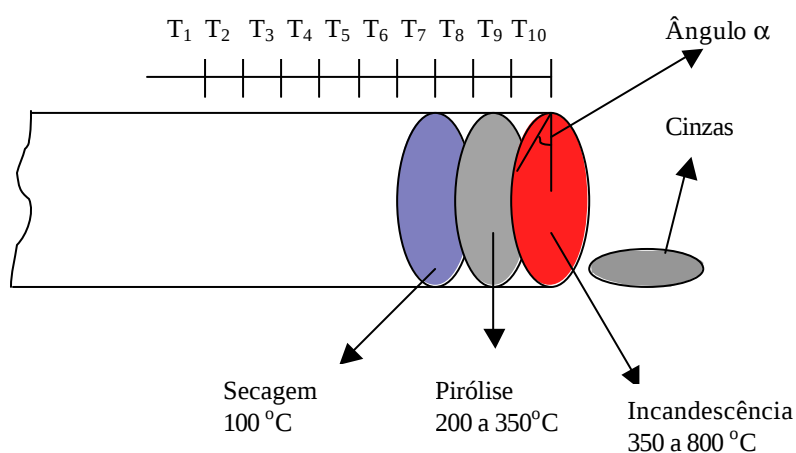


Figura 4.19 – Esquema de monitoramento dos troncos.

T₁, T₂, T₃, ... T₁₀: Temperaturas obtidas através do pirômetro.

Durante o monitoramento mediam-se as temperaturas próximas à região de combustão, bem como, o comprimento da frente de incandescência (L_s) e, se fosse o caso, o comprimento atingido através da frente de chama (L_c). Os valores de temperatura encontrados foram semelhantes; no gráfico da Figura 4.20, tem-se o perfil típico dos troncos monitorados. Para o cálculo das velocidades de frente de incandescência considerou-se o eixo do tronco como a dimensão característica e foram determinadas a partir dos dados das tabelas referentes a cada amostra.

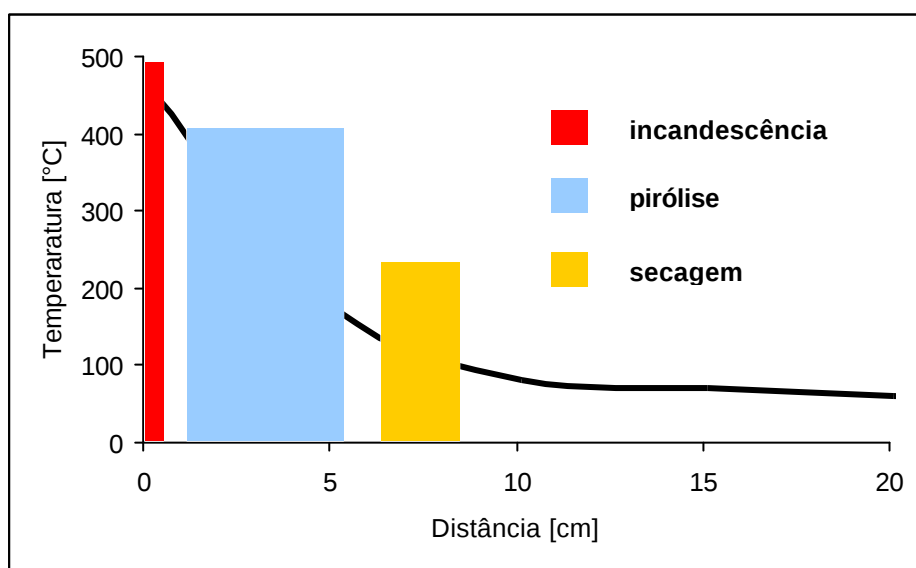


Figura 4.20 – Perfil de temperatura na região da extremidade em incandescência.

Tronco n.º 1.

Diâmetro = 17,30 cm

Observações:

Neste tronco, inicialmente, havia uma frente de incandescência paralela à frente de chama, produzindo um rastro de chamas com características diferentes, como pode ser observado pelas fotografias das Figuras 4.21 a 4.23. A frente de chama encontra-se na parte central do tronco enquanto a frente de incandescência se posiciona na periferia. Após o segundo dia, a frente de chama se extinguiu, restando apenas a queima sem chama. É importante ressaltar que este tronco posicionava-se em uma região de sombra, fora da área da derrubada, onde a temperatura era mais baixa e a umidade maior.



Figura 4.21 – Fotografia do tronco nº. 1, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.22 – Fotografia do tronco nº. 1, dois dias após a queimada.



Figura 4.23 - Fotografia do tronco nº. 1, três dias após a queimada.

As velocidades médias registradas são as seguintes:

- 1) Referente ao primeiro dia, $V_{21} = 6,25 \text{ cm/h}$
- 2) Período da noite até o dia seguinte, $V_{21-22} = 7,5 \text{ cm/h}$
- 3) Referente ao segundo dia, $V_{22} = 1,41 \text{ cm/h}$
- 4) Período da segunda noite, $V_{22-23} = 4,67 \text{ cm/h}$.

Após o primeiro dia, verificou-se que a queima homogênea no interior do tronco extinguiu-se permanecendo apenas a queima heterogênea, mais lenta. Desta forma a velocidade de propagação da frente de queima diminuiu no dia seguinte.

Tronco nº. 2

Diâmetro = 23,71 cm

Observações:

Na região deste tronco havia pouca ventilação, portanto, a queima ocorria em um ritmo mais lento, mas com uma velocidade relativamente constante, como pode-se observar pelos dados abaixo:

Velocidades médias registradas referente:

- 1) Ao primeiro dia, $V_{21} = 0,38 \text{ cm/h}$
- 2) Ao período da noite até o dia seguinte, $V_{21-22} = 0,75 \text{ cm/h}$
- 3) Ao segundo dia, $V_{22} = 0,77 \text{ cm/h}$
- 4) Ao período da segunda noite, $V_{22-23} = 0,69 \text{ cm/h}$.

As fotografias das Figuras 4.24 a 4.26 ilustram o desenvolvimento do processo neste tronco.



Figura 4.24 – Fotografia do tronco nº. 2, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.25 – Fotografia do tronco nº. 2, dois dias após a queimada.



Figura 4.26 – Fotografia do tronco nº. 3, três dias após a queimada.

Tronco nº. 3

Diâmetro: 53,16 cm

Observações:

Como pode ser observado pelas fotos das Figuras 4.27 a 4.29, nesta amostra houve incandescência em vários pontos de cruzamento de troncos. Acredita-se que isto se deva ao fato de no ponto de encontro os troncos não dissiparem calor para o ambiente, propiciando o atingimento de condições de flamabilidade auto-sustentada.

Como a queima não ocorria no sentido longitudinal e sim, radial, não foi determinada a velocidade de queima, portanto, foram coletados apenas dados de temperatura e tiradas fotos digitais, nas quais pode-se perceber a evolução do processo.



Figura 4.27 – Fotografia do tronco nº. 3, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.28 – Fotografia do tronco nº. 3, dois dias após a queimada.



Figura 4.29 – Fotografia do tronco nº. 3, três dias após a queimada.

Tronco nº. 4

Diâmetro: 27,22 cm

Observações:

Para este tronco, a velocidade da frente de incandescência também foi mais lenta. A partir do segundo dia ocorreu um ligeiro aumento e observou-se uma grande quantidade de cinzas. Este tronco permaneceu suspenso, durante o monitoramento do processo de queima, isto é, não esteve em contato com o solo. Constatou-se que os troncos que permaneciam em contato com o solo apresentaram velocidade de queima superior àqueles que mantiveram-se suspensos. Isto deve-se ao fato de que na região de contato, as temperaturas mantêm-se mais elevadas, devido ao isolamento causado pelo solo, acelerando assim, a velocidade de propagação da frente incandescente. Através dos dados coletados foi possível verificar a velocidade média de propagação da frente incandescente.

Velocidades médias registradas referente:

- 1) Ao primeiro dia, $V_{21} = 0,533 \text{ cm/h}$
- 2) Ao período da noite até o dia seguinte, $V_{21-22} = 0,38 \text{ cm/h}$
- 3) Ao segundo dia, $V_{22} = 2,5 \text{ cm/h}$
- 4) Ao período da segunda noite, $V_{22-23} = 0,42 \text{ cm/h}$.

Nas fotos das Figuras 4.30 a 4.32 têm-se o desenvolvimento do processo durante os três dias de monitoramento.



Figura 4.30 – Fotografia do tronco nº. 4, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.31 – Fotografia do tronco nº. 4, dois dias após a queimada.



Figura 4.32 – Fotografia do tronco nº. 4, três dias após a queimada.

Tronco nº. 5

Diâmetro: 38,20 cm

Observações:

Este tronco apresentava duas regiões incandescentes: na extremidade e ao meio. Para o monitoramento foi escolhida a primeira. Após 3 dias queimando, o tronco rompeu e foi ao solo devido a outra frente de incandescência e continuou em processo de combustão (sem chamas).

Velocidades médias registradas referente:

- 1) Ao primeiro dia, $V_{21} = 1,43 \text{ cm/h}$
- 2) Ao período da noite até o dia seguinte, $V_{21-22} = 1,81 \text{ cm/h}$
- 3) Ao segundo dia, $V_{22} = 1,63 \text{ cm/h}$
- 4) Ao período da segunda noite, $V_{22-23} = 0,82 \text{ cm/h}$.

Nesta amostra, a frente de incandescência propagou-se ao longo da metade inferior do tronco. Através das fotos das Figuras 4.33 a 4.35 pode-se observar o avanço da frente no tronco. A primeira (na extremidade) propagou-se pela parte interna, onde as condições são mais favoráveis para a continuidade do processo. Nas Figuras 4.34 e 4.35 verifica-se a outra frente ao meio do tronco (não monitorada).



Figura 4.33 – Fotografia do tronco nº. 5, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.34 – Fotografia do tronco nº. 5, dois dias após a queimada.



Figura 4.35 – Fotografia do tronco nº. 5, três dias após a queimada.

Tronco nº. 6

Diâmetro = 37,56 cm

Observações:

Nesta amostra, a frente avançou para o interior do tronco formando um cone. Durante o desenvolvimento do processo houve oscilação entre chama e incandescência em um ponto. Segundo Ohlemiller, a transição da incandescência para a chama requer uma mistura de gases e ar que estejam dentro de seus limites de flamabilidade e uma corrente de calor suficiente para ignitar esta mistura. No entanto, estes dois requisitos devem ser satisfeitos no mesmo local e ao mesmo tempo (Ohlemiller, 1995). As fotos das Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 demonstram o avanço da frente neste tronco.

Velocidades médias registradas referente:

- 1) Ao primeiro dia, $V_{21} = 2 \text{ cm/h}$
- 2) Ao período da noite até o dia seguinte, $V_{21-22} = 1,73 \text{ cm/h}$
- 3) Ao segundo dia, $V_{22} = 4 \text{ cm/h}$
- 4) Ao período da segunda noite, $V_{22-23} = 1,18 \text{ cm/h}$.

Pode-se notar através da Figura 4.37 a espessa fumaça esbranquiçada na região da queima, esta é uma característica marcante em quase todos os troncos em processo de incandescência, ocorrendo principalmente durante a pirólise, onde a maior parte dos voláteis são eliminados.



Figura 4.36 – Fotografia do tronco nº. 6, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.37 – Fotografia do tronco nº. 6, dois dias após a queimada.



Figura 4.38 – Fotografia do tronco nº. 6, três dias após a queimada.

Tronco nº. 7

Diâmetro = 33,70 cm

Observações:

Após a queimada, havia chama em uma extremidade e incandescência na outra ponta do tronco. Neste caso, a frente incandescente propagou-se através do orifício do tronco, mas dois dias após a queimada, extinguiu-se. As fotos das Figuras 4.39 a 4.41 ilustram a frente de incandescência neste tronco. As fotografias foram tiradas no dia seguinte à queimada (21/08).

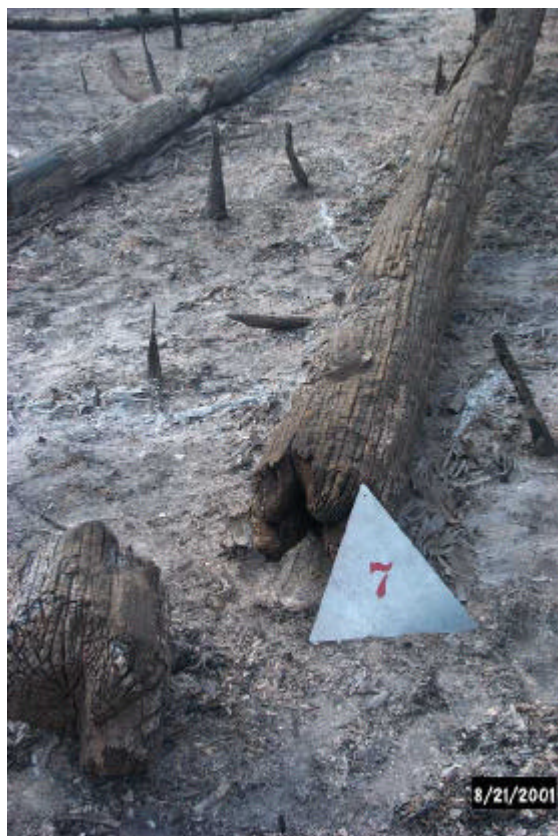


Figura 4.39 – Fotografia do tronco nº. 7, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.40 – Fotografia do tronco nº. 7, focalizando a região (cruzamento) com oscilações entre chama e incandescência.



Figura 4.41 – Fotografia do tronco nº. 7, na extremidade incandescente.

Tronco nº. 8

Diâmetro = 26,10 cm

Observações:

Nesta amostra, a frente incandescente produziu uma grande quantidade de cinzas na região, o que mantinha a temperatura alta (cerca de 384 °C), favorecendo a continuidade do processo. No entanto, quando a camada de cinzas é muito espessa, dificulta a passagem do oxigênio, provocando a extinção, o que, neste caso não ocorreu. As Figuras 4.42 a 4.44 ilustram o desenvolvimento do processo neste tronco.

Velocidades médias registradas referente:

- 1) Ao primeiro dia, $V_{21} = 3,07 \text{ cm/h}$
- 2) Ao período da noite até o dia seguinte, $V_{21-22} = 1 \text{ cm/h}$
- 3) Ao segundo dia, $V_{22} = 3,2 \text{ cm/h}$
- 4) Ao período da segunda noite, $V_{22-23} = 0,65 \text{ cm/h}$.

Conforme pode ser observado pelos valores acima obtidos, verificou-se que, normalmente, a velocidade da frente de incandescência é maior durante o dia, pela influência da luz solar e menor umidade do ar.



Figura 4.42 – Fotografia do tronco nº. 8, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.43 – Fotografia do tronco nº. 8, dois dias após a queimada.



Figura 4.44 – Fotografia do tronco nº. 8, três dias após a queimada.

Tronco n.º 9

Diâmetro = 68,44 cm

Observações:

Este tronco, dentre os que foram monitorados, possuía o maior diâmetro. Seu processo de queima oscilou entre incandescência e chama, conforme a direção e intensidade do vento. Segundo Moussa, a incandescência transiente é seguida por chama quando há altos valores de fração molar de oxigênio ambiente e pressão parcial (Moussa et al, 1976).

Velocidades médias registradas referente:

- 1) Ao primeiro dia, $V_{21} = 0,5 \text{ cm/h}$
- 2) Ao período da noite até o dia seguinte, $V_{21-22} = 3,38 \text{ cm/h}$
- 3) Ao segundo dia, $V_{22} = 2,67 \text{ cm/h}$
- 4) Ao período da segunda noite, $V_{22-23} = 0,88 \text{ cm/h}$.

As fotografias das Figuras 4.45 a 4.47 representam o desenvolvimento da frente de incandescência para o tronco n.º 9.



Figura 4.45 – Fotografia do tronco nº. 9, no dia seguinte à queimada.

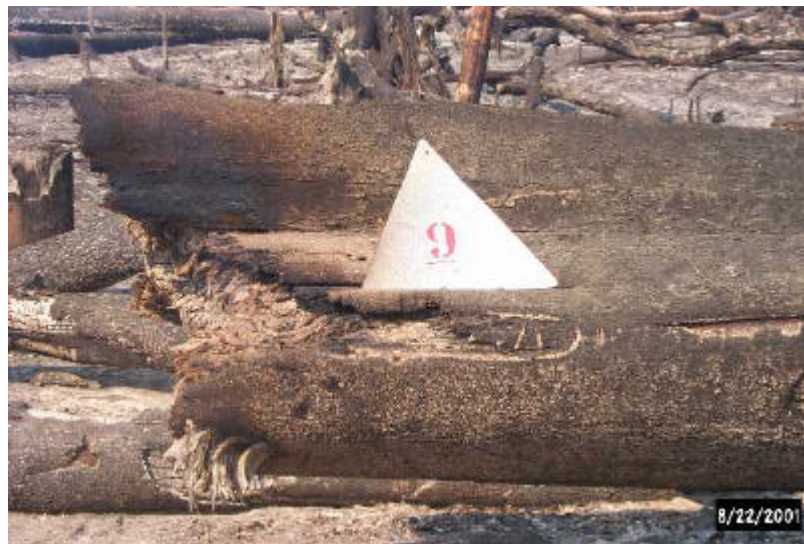


Figura 4.46 – Fotografia do tronco no. 9, dois dias após a queimada.



Figura 4.47 – Fotografia do tronco no. 9, três dias após a queimada.

Tronco n.º 10

Diâmetro: 38,20 cm

Observações:

Havia uma espessa camada de cinzas na região incandescente, com temperatura de cerca de 353 °C e a combustão depende da difusão do oxigênio através desta camada permeável de cinzas. A liberação de fumaça é notada em todas as fotografias, como pode ser observado pelas Figuras 4.48 a 4.50.



Figura 4.48 – Fotografia do tronco n.º. 10, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.49 – Fotografia do tronco n.º. 10, dois dias após a queimada.

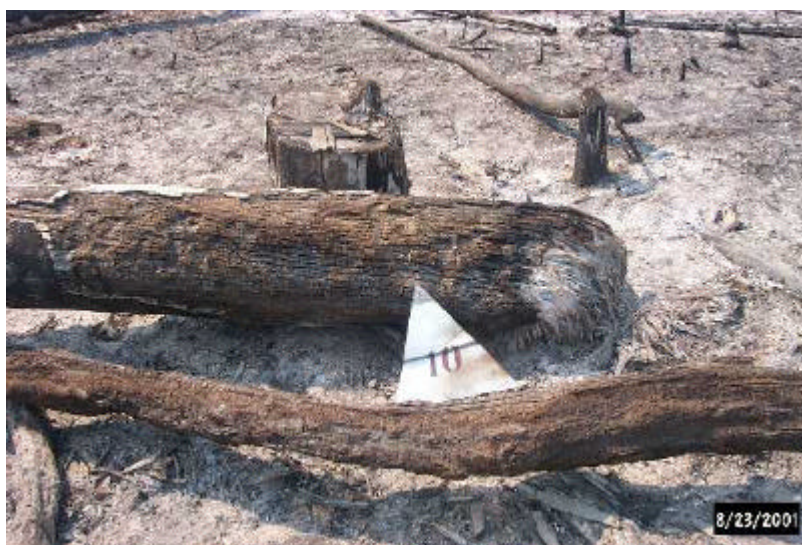


Figura 4.50 – Fotografia do tronco n.º. 10, três dias após a queimada.

Velocidades médias registradas referente:

- 1) Ao primeiro dia, $V_{21} = 1,67 \text{ cm/h}$
- 2) Ao período da noite até o dia seguinte, $V_{21-22} = 0,48 \text{ cm/h}$
- 3) Ao segundo dia, $V_{22} = 1,43 \text{ cm/h}$
- 4) Ao período da segunda noite, $V_{22-23} = 0,82 \text{ cm/h}$.

Tronco nº. 11

Diâmetro: 29,67 cm

Observações:

Novamente, o vento fazia a transição para a chama em alguns instantes, mas na maior parte do tempo havia apenas a queima sem chama. Conforme Leach et al, um aumento da velocidade de propagação que eventualmente ocasiona chama é típico de Incandescência Direta, ou seja, a zona de reação propaga-se na mesma direção do escoamento do oxidante (Leach et al, 2000). Os limites entre a incandescência e a queima com chama são muito tênues, assim como os limites entre a incandescência e a extinção. Após o terceiro dia a queima se extinguiu, conforme pode ser observado pela foto da Figura 4.53. Nas Figuras 4.51 a 4.53 observam-se as características desta queima.



Figura 4.51 – Fotografia do tronco nº. 11, no dia seguinte à queimada.



Figura 4.52 – Fotografia do tronco nº. 11, dois dias após a queimada.



Figura 4.53 – Fotografia do tronco nº. 11, três dias após a queimada.

Velocidades médias registradas referente:

- 1) Ao primeiro dia, $V_{21} = 3,63 \text{ cm/h}$
- 2) Ao período da noite até o dia seguinte, $V_{21-22} = 1,06 \text{ cm/h}$
- 3) Ao segundo dia, $V_{22} = 2 \text{ cm/h}$

4.4. Conclusões sobre os Experimentos de Campo

Com base nos dados obtidos, calculou-se a velocidade média da frente de propagação de incandescência para cada tronco monitorado, considerando o comprimento e tempo total de queima (até o dia 23/08). Seguem relacionadas na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Velocidade média dos troncos monitorados.

Tronco	Diâmetro (cm)	Velocidade média (cm/h)
1*	17,30	3,79
2	23,71	0,67
3	53,16	–
4	27,22	0,77
5	38,20	1,32
6*	37,56	1,88
7	33,70	–
8	26,10	1,54
9*	68,44	1,92
10	38,20	0,88
11*	29,67	1,79

(*) Troncos que oscilaram entre chama e incandescência.

A velocidade média registrada variou de 0,67 a 3,79 cm/h, onde os valores maiores foram obtidos quando havia transição de chama e incandescência no tronco monitorado. Outro fator que influencia a velocidade é a porosidade da madeira; para verificação deste parâmetro foram feitas análises de porosimetria para cada amostra. Foram analisados também os seguintes parâmetros: teor de CHN, umidade e massa específica.

Para uma melhor visualização dos dados obtidos, eles foram inseridos em um gráfico, tempo (h) X comprimento de queima (cm), conforme mostra a Figura 4.54. Assim, pode-se observar o perfil de velocidade da onda de incandescência em cada tronco. A curva LS_1 representa o perfil do tronco nº. 1, LS_2 corresponde ao de nº. 2 e, assim, sucessivamente, até o tronco nº. 11. Os troncos de nºs. 3 e 7 não foram

representados abaixo, por não ter sido possível o cálculo da velocidade de propagação de suas frentes.

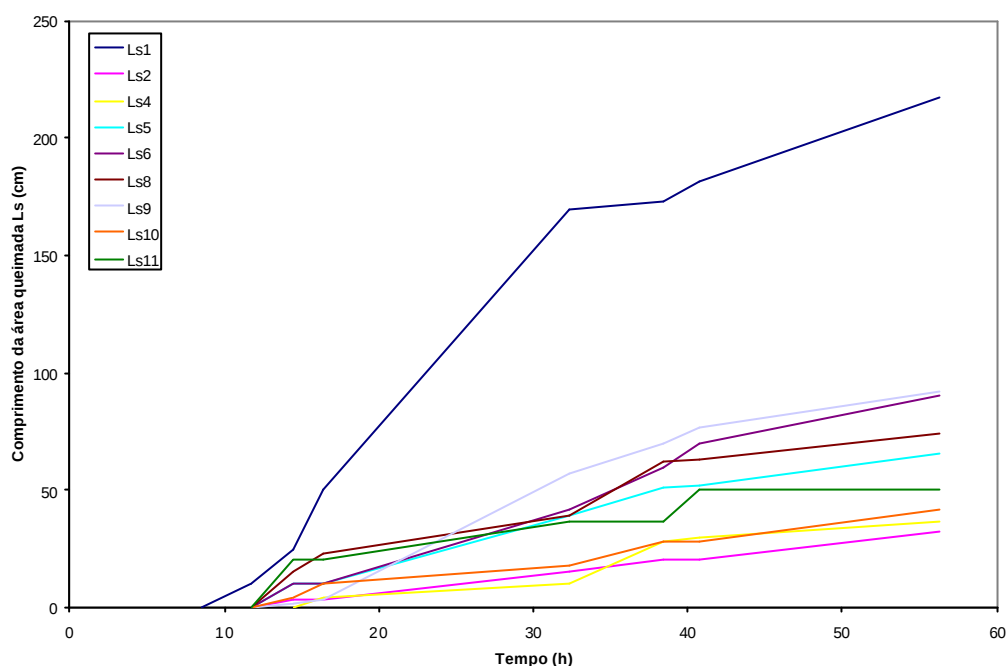


Figura 4.54 – Perfil de velocidade da frente de incandescência dos troncos monitorados.

Para verificação da influência da umidade durante o processo incandescente, foram retiradas pequenas amostras de cada tronco monitorado e em seguida colocadas em sacos plásticos hermeticamente fechados (para conservação da umidade). Este procedimento foi adotado após o período de chamas. Em laboratório, foram pesadas e mantidas em estufa até não apresentarem variação no peso. Assim, pode-se estimar a porcentagem de umidade em cada tronco, durante a queima incandescente, com valores relacionados na Tabela 4.2.

Observando-se o gráfico acima, concluiu-se que a porcentagem de água presente no tronco não interferiu na velocidade de queima. O tronco n.º 5 (curva azul) possuía a menor umidade, enquanto o de n.º 11 (curva verde) registrou o maior teor de umidade; entretanto, as curvas referentes a eles estão bem próximas. Acredita-se que outros fatores como: velocidade de vento na região, porosidade e massa específica da madeira tenham influências mais significativas no desenvolvimento do processo de incandescência em campo. As amostras retiradas dos troncos monitorados também

foram utilizadas para análises de porosimetria, picnometria (massa específica real) e teor de CHN (Carbono, Hidrogênio e Oxigênio), com resultados na Tabela 4.2.

Ao considerar o diâmetro do tronco, pode-se verificar que o tronco com menor diâmetro (nº.1) obteve a maior velocidade de queima; no entanto, este oscilou entre chama e incandescência e, a velocidade da queima com chamas é superior à outra. Outro fato observado: os troncos de nºs. 2, 4 e 8, com menos de 30 cm de diâmetro registraram baixos valores para as velocidades médias de propagação. Portanto, conforme os dados obtidos, não se pode concluir que troncos com diâmetros menores queimam com maior intensidade no campo.

A intensidade e direção do vento (oxidante) afetam sensivelmente a velocidade de propagação da frente. Isto pôde ser verificado através do monitoramento do tronco nº. 2, onde se registrou a menor velocidade de propagação. Devido à sua posição, o fluxo de ar que chegava até o local era mínimo, apenas suficiente para manter o processo, constatando-se, portanto, que as velocidades de propagação eram maiores onde a ventilação era mais intensa.

Na maior parte dos troncos monitorados, a velocidade de propagação da frente de incandescência diminuía à noite, em virtude da queda na temperatura do ar e ao aumento da sua umidade.

Incandescência em cruzamentos de troncos foi observado também nesta queimada experimental. Verificou-se que um tronco de grandes dimensões queima lentamente quando isolado. Contudo, se ele estiver vizinho a outros de menor tamanho, ele queima com mais intensidade. Este fenômeno ocorre devido à diminuição do ar e o aumento de calor na região e à queima de voláteis no espaço entre os troncos (não dissipando calor para o ambiente), propiciando condições de flamabilidade. As Figuras 4.4 a 4.6 (página 87) ilustram tal fenômeno.

A liberação de fumaça ocorre durante todo o processo. Através das fotos das Figuras 4.17 e 4.18 observam-se os vários pontos de incandescência, onde há presença de fumaça, a qual tem características diferentes daquela proveniente da queima com chama. A fumaça, presente na foto, é mais branca (originária dos voláteis na pirólise),

menos flutuante e não se dispersa eficientemente, prejudicando a visibilidade e aumentando a poluição local, além de produzir forte impacto na atmosfera.

A fumaça altamente tóxica proveniente da incandescência é um dos maiores problemas decorrentes do desenvolvimento desta queima. Outra consequência do processo é a exposição do solo a altas temperaturas, por longos períodos, afetando a sua capacidade de conservar umidade e outros nutrientes necessários ao desenvolvimento de sementes, tornando o solo improdutivo.

Os resultados obtidos nas análises de caracterização das amostras monitoradas, bem como os seus teores de umidade e velocidade média de propagação da frente foram inseridos na Tabela 4.2. Para complementar a caracterização da madeira foram realizadas análises termogravimétricas nos 11 troncos monitorados. Tais análises foram executadas em uma termobalança da marca Shimadzu TGA-50H. Fixou-se a temperatura inicial em 30 °C e a final em 700 °C, na taxa de 10 °C por minuto, em atmosfera inerte (nitrogênio). Na Tabela 4.3 tem-se a porcentagem de massa perdida, em função da temperatura.

Tabela 4.2 – Características dos troncos monitorados.

Tronco	Diâmetro (cm)	V_m (cm/h)	Umidade (%)	CHN (%)	Porosida- dade (Å)	Massa específica (kg/m³)
1	17,30	3,79	12,32	44,87; 6,20; 0,16	10 ² <D _p <10 ³	1499
2	23,71	0,67	20,95	42,58; 6,05; 0,50	10 ² <D _p <10 ³	1126
3	53,16	—	15,97	43,24; 5,90; 0,17	10 ² <D _p <10 ³	1207
4	27,22	0,77	23,80	42,44; 5,78; 0,15	10 ³ <D _p <10 ⁴	1256
5	38,20	1,32	11,41	44,76; 5,84; 0,13	10 ³ <D _p <10 ⁴	1617
6	37,56	1,88	25,71	43,72; 5,99; 0,35	10 ³ <D _p <10 ⁴	1593
7	33,70	—	17,41	45,23; 6,01; 0,15	10 ⁴ <D _p <2x10 ⁴	2028
8	26,10	1,54	15,42	44,40; 5,70; 0,19	10 ² <D _p <10 ³	1285
9	68,44	1,92	18,92	35,68; 4,58; 0,64	10 ³ <D _p <10 ⁴	1224
10	38,20	0,88	26,40	42,50; 5,83; 0,29	10 ³ <D _p <10 ⁴	1647
11	29,67	1,79	31,79	41,25; 5,66; 0,34	10 ² <D _p <10 ³	1756

Obteve-se resultados bastante semelhantes nas 11 amostras. A maior variação de massa é observada a partir dos 200 até os 375 °C, quando ocorre a pirólise com maior liberação de voláteis; após este ponto, a perda de massa continua gradualmente, restando no fim, apenas de 10 a 33 % da massa inicial.

Observações:

- As amostras com diâmetros de poros variando entre $10^2 < D_p < 10^3$ (Å) e $10^3 < D_p < 10^4$ (Å) são consideradas madeiras meso-porosas e aquelas com valores entre $10^4 < D_p < 2 \times 10^4$ (Å) são macro-porosas. Dentre as amostras coletadas não foram encontrados troncos de madeira com $D_p < 10^2$ Å (micro-porosas). Portanto, concluiu-se que a propagação da incandescência ocorre apenas em troncos com média e alta porosidade.
- As massas específicas obtidas são referentes à massa específica volumétrica real de cada amostra, as quais oscilaram entre 1126 e 2028 kg/m³.
- Os valores encontrados para o teor de CHN nas amostras foram semelhantes, com exceção do tronco n^o. 9 que apresentou menores teores de C e H.

Tabela 4.3 – Resultados das Análises Termogravimétricas (Taxa de 10 °C/min.).

TRONCO	M _i (mg)	% de massa volatizada até 200 °C	% de massa volatizada de 200 a 600 °C	% de massa volatizada de 600 a 700 °C	% Total de massa volatizada
1	5,824	- 6,619	- 75,042	- 4,786	- 86,447
2	6,424	- 5,133	- 72,019	- 3,748	- 80,900
3	7,629	- 5,192	- 76,030	- 3,208	- 84,430
4	6,383	- 4,684	- 69,862	- 3,692	- 78,238
5	8,138	- 5,623	- 69,003	- 2,890	- 77,516
6	9,496	- 5,804	- 68,700	- 2,773	- 77,277
7	3,880	- 3,048	- 83,369	- 5,373	- 91,79
8	7,963	- 4,059	- 70,288	- 3,246	- 77,593
9	11,22	- 9,414	- 54,307	- 3,345	- 67,066
10	10,85	- 6,094	- 65,905	- 2,687	- 74,686
11	11,63	- 6,869	- 71,133	- 2,459	- 80,461

CAPÍTULO 5

MODELO NUMÉRICO PARA A PROPAGAÇÃO DA INCANDESCÊNCIA EM TRONCOS DE MADEIRA

5.1 Introdução – Modelos Disponíveis

A incandescência é um modo importante de combustão, o que tem motivado pesquisas analíticas e experimentais no que diz respeito à segurança de incêndio. Definida como uma oxidação heterogênea exotérmica auto-sustentável do sólido, a combustão por incandescência tem sido modelada mais explicitamente em termos das propriedades intrínsecas do sólido, como também comparada com modelos de expansão de chama. Usando modelos cinéticos simplificados, referenciados como “cinéticos globais”, a iniciação do processo de incandescência tem sido estudada completa e extensivamente do ponto de vista termo-físico. Estes estudos são baseados nos modelos unidimensionais de degradação sólida, nos quais os efeitos da transferência de calor e massa na fase gasosa são desprezados, ou tratados empiricamente. A propagação da frente de incandescência subsequente à ignição é consideravelmente mais complexa e muito menos estudada analiticamente. Os modelos analíticos/numéricos disponíveis não podem descrever estes efeitos quantitativamente. A transição da incandescência para chama é ainda mais complexa, e não tem sido modelada em nenhum detalhe. A complexidade adicional origina-se da presença simultânea de reações heterogêneas e homogêneas, as quais fazem as ligações entre a reação química e a geração de calor, e transporte de calor e espécies gasosas mais interligadas. Portanto, uma descrição realística da transição da incandescência para a chama requereria consideração dos processos termo-físicos e químicos presentes e a ligação entre eles (Moallemi et al., 1993).

Muramatsu et al. (1979) desenvolveram um modelo matemático unidimensional para balanço de calor e massa proposto para elucidar as mudanças que ocorrem na temperatura e densidade na zona de pirólise e evaporação em um cigarro naturalmente incandescente. Este modelo considera: 1) pirólise do tabaco obedecendo à cinética de Arrhenius; 2) evaporação da água do tabaco seguida de processos de transferência de massa com taxa determinada; 3) perda do peso do tabaco devido à pirólise e

evaporação; 4) transferência de calor interno caracterizado por condutividade térmica efetiva; 5) perdas de calor atribuídas à convecção livre e radiação da superfície externa do cigarro e endotermicidade do processo de evaporação; e 6) velocidade da incandescência. Estes processos foram expressos em equações diferenciais ordinárias simultâneas e foram resolvidas numericamente pelo Método de Runge-Kutta-Gill. Conforme as bases do modelo, as influências de vários parâmetros físicos como perfis de temperatura e velocidade são previstos. A conformidade entre os resultados teóricos e experimentais sugere que o modelo proposto está qualificado para calcular os processos de evaporação e pirólise fundamentais que ocorrem em um cigarro naturalmente incandescente. Além disso, o modelo pode ser usado para estimar as grandezas relativas de muitos parâmetros que governam as formas dos perfis de temperatura e densidade.

Kailasanath e Zinn (1981) desenvolveram um modelo unidimensional transiente que considera a queima de um combustível poroso, o qual é externamente irradiado em uma de suas faces. Os vários processos considerados neste modelo incluem; 1) transferência de calor radiativo para a superfície do sólido; 2) condução de calor nas fases sólida e gasosa; 3) pirólise do sólido; e 4) convecção dos produtos da pirólise através do sólido poroso. O sistema de equações foi convertido para um sistema de equações algébricas não-lineares usando uma formulação de diferenças finitas e resolvida através do Método de Newton-Raphson. O modelo desenvolvido é usado para investigar a interação entre a condução de calor, a reação nos sólidos porosos e o escoamento dos produtos de reação através do sólido que está sendo pirolisado.

O modelo termo-físico para propagação da combustão de incandescência formulado por Ohlemiller (1985) considerou vários mecanismos de transporte (difusão e convecção de energia, oxigênio e voláteis) no sólido, no carvão, nas cinzas e no gás. Este modelo é baseado na hipótese de quantidade contínua de sólido/gás na escala de sub-partícula do combustível sólido, mas considerou-se existência simultânea de espécies e gradientes de temperatura na escala de partícula sólida e na escala da frente de reação. A complexidade das equações resultantes tem feito o caso geral intratável, e o modelo não é resolvido. Mas os resultados experimentais de Ohlemiller indicam a importância de processos de transporte na fase gasosa na incandescência de camadas de

combustível permeáveis e em incandescência reversa e direta na presença de escoamento forçado.

No modelo matemático formulado por Moallemi et al. (1993) é apresentada uma solução numérica para a simulação de combustão sem chama de um sólido em uma corrente de ar. O problema é formulado através das equações de conservação de massa, espécies, momentum e energia. A modelagem considera condução no sólido, radiação térmica do sólido, convecção natural e forçada do escoamento e transferência de calor na corrente gasosa. O modelo transiente e bidimensional é resolvido por um procedimento numérico iterativo. O resultado das simulações é apresentado em termos de variações do campo de velocidade, composição e temperatura do gás na câmara de teste, a distribuição da temperatura no sólido e cinzas, a posição temporal e a velocidade da frente de incandescência.

Bilbao et al. (1999) desenvolveram um modelo matemático para prever o tempo de ignição e o tempo de incandescência do material, considerando as degradações do sólido, os efeitos caloríficos da evaporação da mistura, o resfriamento convectivo da superfície do sólido e o uso da temperatura de superfície como critério de ignição. O modelo é unidimensional e transiente. Nele, supõe-se que uma superfície sólida é exposta a um fluxo de calor radiante e as perdas de calor da superfície são devidas à radiação, convecção e condução em direção ao sólido.

Costa and Sandberg (2001) apresentaram um novo modelo de incandescência em troncos de madeira, descrevendo a propagação unidimensional, não transiente de frentes infinitamente finas de secagem, pirólise e oxidação do carvão em um tronco semi-infinito e horizontal. Os efeitos de variações de vários parâmetros são estimados, tais como temperatura de pirólise, calor de incandescência, calor de pirólise, densidade do combustível, a razão densidade do combustível/densidade do carvão, conteúdo da mistura, diâmetro do tronco e a massa do oxigênio ambiente. As taxas de queima calculadas neste modelo mostraram uma boa concordância com dados experimentais disponíveis para taxas de incandescência de troncos e outros materiais celulósicos.

5.2 Descrição do Modelo

O seguinte sistema de equações foi utilizado na solução do problema:

- Conservação Energia, condução de calor num substrato sólido;
- Conservação de Massa Total;
- Condições de Contorno, camada limite térmica de convecção natural.

Assume-se que a geometria é unidimensional e o problema foi tratado como transiente. As seguintes equações auxiliares complementam o modelo matemático:

- Equação Cinética para a pirólise da biomassa (modelo CPDNLG - Grant, 1999);
- Equações para as reações heterogêneas na superfície (oxidação do coque);
- Equações para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção (h), e massa, baseado nos números de Nusselt (Nu) e de Sherwood (Sh), respectivamente, para a camada limite térmica;
- Equações paramétricas para o cálculo das propriedades de transporte termo-físicas.

5.2.1 Solução Numérica

A equação da energia foi discretizada pelo Método dos Volumes-Finitos (Patankar, 1980) com malha não uniforme. O domínio físico (tronco) foi dividido em, pelo menos, 30 volumes de controle.

Sejam as seguintes equações:

- Equação da Energia de condução de calor unidimensional transiente com termos de fonte:

$$\frac{\partial(rT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{c} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (5.1)$$

onde T é a temperatura, t o tempo, K a condutividade térmica, c o calor específico, ρ a massa específica e S o termo de fonte.

- Equação de Conservação de Massa Interna:

$$\rho_a = \rho_b + \rho_c + \rho_w, \quad (5.2)$$

onde ρ_a é a massa específica total, ρ_b a massa específica da biomassa virgem, ρ_c a massa específica do coque, e ρ_w a massa específica da água.

Portanto, tem-se a equação auxiliar para o consumo do coque ($\dot{m}_{CO}'' + \dot{m}_{CO_2}''$), para os voláteis e para a secagem:

$$\dot{m}'' = \dot{m}_{CO}'' + \dot{m}_{CO_2}'' + \dot{m}_v'' + \dot{m}_w'', \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_{CO}'' = \frac{12}{16} K_2 \rho_c Y_{O_2,s} \longrightarrow C + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow CO + 218 \text{ MJ/kmol} \quad (5.4)$$

$$\dot{m}_{CO_2}'' = \frac{12}{32} K_1 r_c Y_{O_2,s} \longrightarrow C + O_2 \longrightarrow CO_2 + 394 \text{ MJ/kmol} \quad (5.5)$$

onde:

$$K_2 = A_2 \cdot \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad (5.4.a)$$

$$K_1 = A_1 \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), a \quad (5.5.a)$$

$Y_{O_2,s}$: fração mássica de O_2 na superfície reagente.

A, E: pesquisados na literatura disponível.

$\dot{m}_v''$ pode ser calculado a partir da expressão:

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} = -K_p (\rho_b - \rho_c) \quad (5.6)$$

onde:

$$K_p = A_p \exp\left(-\frac{E_p}{RT}\right)$$

Na secagem pode ser utilizada a fórmula empírica (Muramatsu et al., 1979):

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -K_w (\rho_w - \rho_{w_{eq}})^\beta \quad (5.7)$$

onde:

$$K_w = A_w \exp\left(-\frac{E_w}{RT}\right)$$

Contudo, em função do método numérico de solução (volumes finitos), pode-se simplificar esta equação assumindo-se que na temperatura de vaporização, todo calor transferido será utilizado para a mudança de fase.

5.2.2 Condições de Contorno:

Para o cálculo do coeficiente de calor por convecção (h) serão utilizadas formulações baseadas na geometria do problema, em termos do número de Nusselt (Muramatsu et al., 1979):

$$Nu = \frac{2rh}{K_a} = 0,53(Gr.Pr)^{0,25} \quad (5.8)$$

Em condições de temperatura ambiente e pressão atmosférica, tem-se:

$$h = 8 * 10^{-5} \left(\frac{T - T_{\infty}}{r} \right)^{0,25} \quad (5.9)$$

onde r é o raio do tronco

Na superfície, tem-se:

$$x = x_0: T = T_0$$

$$x = x_s: K_{ef} \frac{dT}{dx} \Big|_{x_s} = \dot{m}_C Q_r - h(T_s - T_{\infty}) - \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (5.10)$$

onde: $K_{ef} = K_{cond} + K_{rad}$, e Q_r é o calor de reação ou de combustão heterogênea,

x_s : x na superfície

T_s : temperatura na superfície

Para o gás, tem-se, assumindo $Le = 1$:

$$Nu = Sh,$$

$$\text{onde: } Sh = 2,6(ReSc)^{0,38}$$

5.3 Conservação de Energia e o Transporte de um Escalar

A lei de conservação de Energia para o transporte de um escalar em um escoamento transiente tem a forma geral:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_{\phi}. \quad (5.11)$$

O primeiro termo da equação representa a taxa de variação com o tempo, sendo zero para escoamentos não-transientes. Na resolução do problema de modelagem do processo de incandescência em troncos de madeira, por tratar-se de um processo transiente, este termo será considerado no processo de discretização. O segundo termo

considera a convecção, mas no caso em questão, trata-se de um sólido (madeira), portanto, não considera-se o processo de convecção, conseqüentemente, $\mathbf{u} = 0$. Γ é o coeficiente de difusão e S é o termo fonte.

A condução de calor em regime transiente e unidimensional é governada pela equação:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S . \quad (5.12)$$

Além das variáveis usuais, tem-se c , o calor específico do material (J/kg/K).

Considerando o volume de controle unidimensional da Figura 5.1, após a integração da equação 1.2 no intervalo de tempo $t + \Delta t$, obtém-se:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV dt + \int_t^{t+\Delta t} \int_{CV} S dV dt . \quad (5.13)$$

Esta equação pode ser escrita como:

$$\int_w^e \left[\int_t^{t+\Delta t} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dt \right] dV = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right)_e - \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right)_w \right] dt + \int_t^{t+\Delta t} \bar{S} \Delta V dt . \quad (5.14)$$

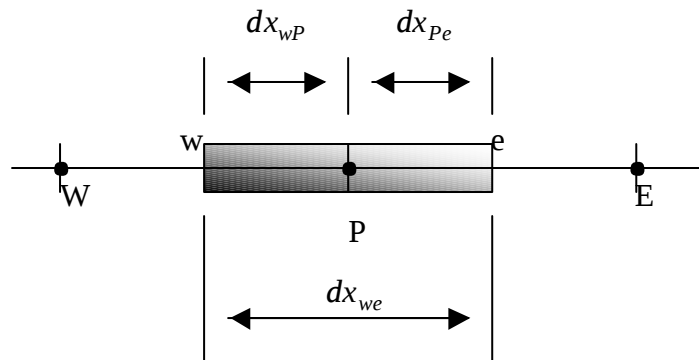


Figura 5.1 – Volume de controle unidimensional para discretização dos pontos.

Se a temperatura em um nó é adotada para prevalecer sobre todo o volume de controle, então, o lado esquerdo da equação pode ser escrito como:

$$\int_{CV} \left[\int_t^{t+\Delta t} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dt \right] dV = \rho c (T_P - T_P^0) \Delta V \quad (5.15)$$

Se for feita a diferenciação para os termos de difusão, no lado direito, a equação (1.4) pode ser escrita como:

$$\rho c (T_P - T_P^0) \Delta V = \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(k_e A \frac{T_E - T_P}{\delta_{xPE}} \right) - \left(k_w A \frac{T_P - T_W}{\delta_{xWP}} \right) \right] dt + \int_t^{t+\Delta t} \bar{S} \Delta V dt \quad (5.16)$$

Para estimar o lado direito desta equação é necessário fazer suposições sobre as variações de T_P , T_E e T_W com o tempo. Poderia-se usar temperatura no tempo t ou $t + \Delta t$ para calcular a integral ou, alternativamente, uma combinação das temperaturas no tempo t e $t + \Delta t$. Pode-se generalizar a aproximação por meio de um parâmetro θ variando entre 0 e 1 e escrever a integral I_T da temperatura T_P com o tempo:

$$I_T = \int_t^{t+\Delta t} T_P dt = [\theta T_P + (1 - \theta) T_P^0] \Delta t \quad (5.17)$$

Assim:

θ	0	$\frac{1}{2}$	1
I_T	$T_P^0 \Delta t$	$\frac{1}{2} (T_P + T_P^0) \Delta t$	$T_P \Delta t$

Têm-se os seguintes valores da integral I_T :

- se $\theta = 0$ é usada a temperatura no nível t (formulação explícita);
- se $\theta = 1$ é utilizada a temperatura no nível $t + \Delta t$ (formulação implícita);

- se $\theta = \frac{1}{2}$, as temperaturas em t e $t + \Delta t$ são igualmente consideradas (Crank-Nicolson).

Usando a equação (5.17) para T_w e T_E na equação (5.16), e dividindo por $A\Delta t$, obtém-se:

$$\begin{aligned} \rho c \left(\frac{T_P - T_P^0}{\Delta t} \right) \Delta x = \theta \left[\frac{k_e (T_E - T_P)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_w (T_P - T_W)}{\delta x_{WP}} \right] \\ + (1 - \theta) \left[\frac{k_e (T_E^0 - T_P^0)}{\delta x_{PE}} - \frac{k_w (T_P^0 - T_W^0)}{\delta x_{WP}} \right] + \bar{S} \Delta x, \end{aligned} \quad (5.18)$$

gerando a seguinte equação:

$$\begin{aligned} \left[\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} + \theta \left(\frac{k_e}{\delta x_{PE}} + \frac{k_w}{\delta x_{WP}} \right) \right] T_P \\ = \frac{k_e}{\delta x_{PE}} [\theta T_E + (1 - \theta) T_E^0] + \frac{k_w}{\delta x_{WP}} [\theta T_W + (1 - \theta) T_W^0] \\ + \left[\rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} - (1 - \theta) \frac{k_e}{\delta x_{PE}} - (1 - \theta) \frac{k_w}{\delta x_{WP}} \right] T_P^0 + \bar{S} \Delta x \end{aligned} \quad (5.19)$$

Os coeficientes T_w e T_E foram identificados como a_w e a_E e escritos na equação 5.19 de forma familiar:

$$\begin{aligned} a_P T_P = a_W [\theta T_W + (1 - \theta) T_W^0] + a_E [\theta T_E + (1 - \theta) T_E^0] \\ + [a_P^0 - (1 - \theta) a_W - (1 - \theta) a_E] T_P^0 + b \end{aligned} \quad (5.20)$$

onde:

$$a_P = \theta (a_W + a_E) + a_P^0 \quad (5.20.a)$$

e

$$a_p^0 = \rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5.20.b)$$

com:

a_w	a_e	B
$\frac{k_w}{\delta x_{wp}}$	$\frac{k_e}{\delta x_{pe}}$	$\bar{S}\Delta x$

A forma exata da equação final discretizada depende do valor de θ . Quando θ é zero, são usadas somente as temperaturas T_p^0 , T_w^0 e T_e^0 no tempo t antigo do lado direito da equação 1.10 para estimar T_p no novo tempo t ; o esquema resultante é chamado explícito. Quando $0 < \theta \leq 1$, as temperaturas no tempo novo são usadas em ambos os lados da equação; o esquema resultante é chamado implícito. O caso extremo, quando $\theta = 1$ é denominado completamente implícito e o caso correspondente a $\theta = \frac{1}{2}$ é chamado de esquema de Crank-Nicolson.

O modelo implícito é incondicionalmente estável, e por isso foi escolhido neste trabalho ($\theta = 1$), onde a equação algébrica é:

$$a_p T_p = a_w T_w + a_e T_e + a_p^0 T_p^0 + S_u \quad (5.21)$$

onde

$$a_p = a_p^0 + a_w + a_e - S_p \quad (5.21.a)$$

e

$$a_p^0 = \rho c \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5.21.b)$$

com:

a_w	a_e
$\frac{k_w}{\delta x_{wp}}$	$\frac{k_e}{\delta x_{pe}}$

Ambos os lados da equação contém temperaturas no intervalo de tempo novo, e um sistema de equações deve ser resolvido a cada intervalo de tempo. O procedimento começa com um campo inicial de temperaturas T^0 dadas. O sistema de equações é resolvido após selecionar o intervalo de tempo Δt . Na próxima solução, T é designado como T^0 e o procedimento é repetido para o aperfeiçoamento da solução para um novo intervalo de tempo.

Pode ser observado que todos os coeficientes são positivos, o que faz do esquema implícito incondicionalmente estável para qualquer intervalo de tempo. O método implícito é recomendado para resolução de cálculos transientes por causa de sua robustez e incondicional estabilidade.

O sistema de equações é resolvido por um programa computacional implementado em Fortran 90. A listagem do programa principal pode ser vista no Anexo 1.

A validação do modelo foi feita para problema simples de transferência de calor unidimensional, transiente, com condições de contorno de primeira espécie para ambas as extremidades. Os resultados obtidos foram sempre fisicamente plausíveis. Após a validação passou-se a empregar o modelo para a predição da queima por incandescência de troncos de madeira típicos da Amazônia. Para tal, foram adotadas os seguintes parâmetros físico-químicos e de integração, conforme aparecem no programa (unidades no SI):

- $\alpha = .25$, coeficiente de relaxação;
- $N_{nodes}=30$, número de nós da malha unidimensional;
- $C_{p0}= 1670$, calor específico inicial da biomassa;
- $Dens_0= 550$, massa específica inicial da biomassa;
- $Dens_f= 80$, massa específica final da biomassa;
- $Cond_0= .500$, condutibilidade térmica inicial da biomassa;
- $X_{min} = 0.005$, largura do primeiro volume de controle, próximo da zona de reação,;
- $G_{ef}= 1.05$, coeficiente de expansão para a largura dos volumes de controle seguintes;
- $dt= .5$, incremento de tempo na integração;
- $T_f=5000*dt$, tempo final de integração;
- $Diam=0.5$, diâmetro do tronco;
- $YO_{2i}= 0.23$, fração mássica de oxigênio no ar atmosférico;
- $g_0= 9.8$, aceleração da gravidade;
- $Toor= 1000.$, temperatura da fonte de ignição externa devido à radiação;
- $Too= 1000 .$, temperatura da fonte de ignição externa devido à convecção;
- $\epsilon=0.7$, emissividade da madeira,
- $A_1= 7.60e3$, fator pré-exponencial da reação (5.4);
- $E_1= 146.e6$, energia de ativação da reação (5.4);
- $A_2= 1.9e7$, fator pré-exponencial da reação (5.5);
- $E_2= 198.e6$, energia de ativação da reação (5.5);
- $R_g= 8314.$, constante universal dos gases;
- $H_{pyro} = -0.5e6$, calor de pirólise;
- $poros= 2.$, fator de correção de área de reação devido a porosidade da madeira;
- $D_{porei}= 0.00005$, diâmetro inicial dos poros;
- $D_{poref}= 0.0005$, diâmetro final dos poros;
- $\nu_{ar}= 0.785$, viscosidade do ar;
- $Dens_g= 0.456$, massa específica do ar,
- $cond_g=0.056$, condutibilidade térmica do ar;

Na sub-rotina para o cálculo das taxas de pirólise (CPDNLG) foram adotados os coeficientes calculados para celulose, lignina e hemicelulose por Sheng e Azevedo (2002):

O programa inicia com a leitura das variáveis listadas anteriormente, e para cada incremento de tempo realiza o processo iterativo de forma que o resíduo, isto é, a diferença entre a integração atual e a anterior seja menor que um dado valor. Satisfeita esta condição o programa passa para o tempo seguinte. Os parâmetros que variam com o tempo, tais como, temperatura, massa específica e propriedades de transporte e físicas são atualizadas em função do grau de degradação térmica da biomassa. No processo iterativo, resolve-se, simultaneamente, o problema de camada limite térmica com reação química, que é uma condição de contorno do problema. Alguns arquivos armazenam as principais variáveis em função do tempo de integração. Alguns resultados são mostrados a seguir. Os dados necessários são aqueles listados anteriormente.

A Figura 5.2 apresenta a distribuição de temperatura do tronco próximo do regime permanente. Observa-se que neste instante, a temperatura da zona de reação heterogênea se encontra próxima dos 850 K. Como a biomassa é um mau condutor de calor, obtém-se um gradiente acentuado referente ao decaimento da temperatura. Tal perfil também foi obtido nas medições realizadas no trabalho de campo.

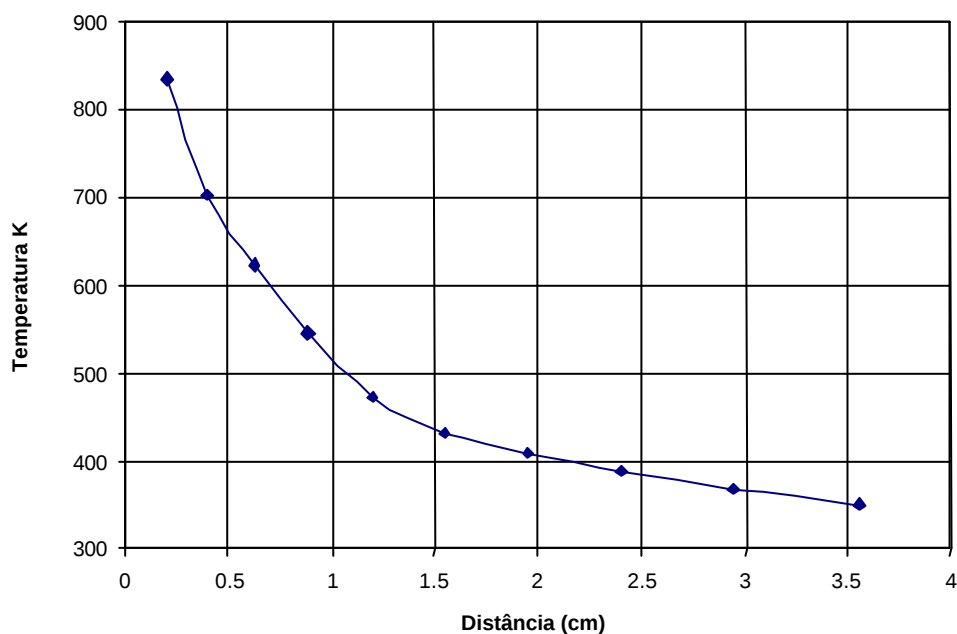


Figura 5.2 – Estimativa numérica para a distribuição da temperatura no tronco.

A velocidade de propagação da frente de chama é função de inúmeros fatores. Nas simulações mantiveram-se os dados físico-químicos constantes e estimou-se a velocidade para uma dada temperatura da zona de reação. A Figura 5.3 apresenta a velocidade de propagação da frente de incandescência, calculada pelo modelo, em função da temperatura da frente de incandescência. Pode-se verificar que a velocidade estimada pelo modelo, entre 840 e 980 K, varia de 0,5 a 12 cm/h. Medidas de temperatura realizadas no campo, em troncos de dimensão similar a utilizada na predição numérica indicavam valores entre 850 a 923 K. Houve, contudo, predominância de frentes de propagação com temperatura média da ordem de 875 K. As velocidades registradas no campo variaram de 0,7 a 3,8 cm/h. A média obtida em laboratório foi 4,22 cm/h; portanto, os valores obtidos em uma simulação do programa estão muito semelhantes àqueles verificados na queimada florestal e em laboratório.

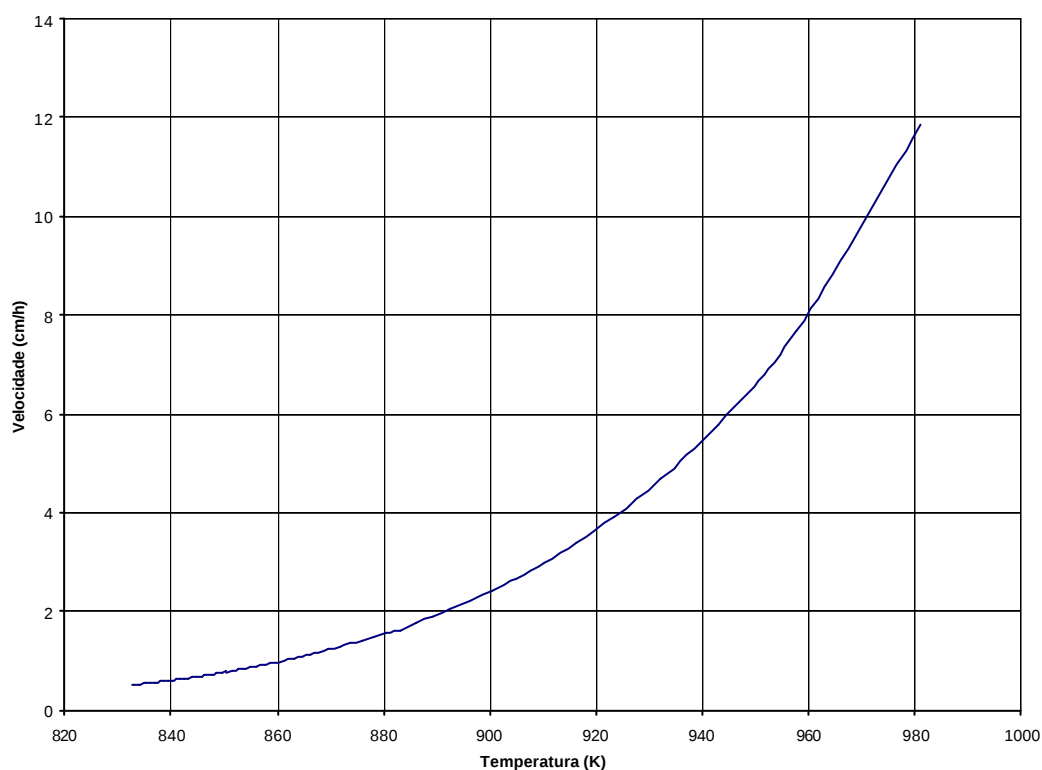


Figura 5.3 – Distribuição da velocidade de propagação da frente de incandescência no tronco.

Uma análise teórica mais extensa variando-se os parâmetros de maior interesse pode ser conduzida com relativa facilidade. Contudo, tal estudo paramétrico não foi realizado de forma a não tornar este capítulo demasiado longo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTURO

6.1 – Conclusões Gerais

O objetivo principal deste trabalho foi investigar as características da queima sem chama (incandescência) em troncos de madeira, em condições controladas em laboratório e, em condições naturais, em uma queimada real, e através de um modelo numérico.

As principais observações decorrentes dos ensaios foram:

- As concentrações de O₂, CO₂ e CO mantiveram-se nas faixas de 10 a 19 %, 3 a 11,5 % e 0,5 a 4 %, respectivamente.
- Em altas temperaturas, quedas acentuadas foram observadas nas concentrações de O₂, com o conseqüente aumento das concentrações de CO e CO₂.
- A taxa de queima heterogênea variou de 1,62 a 6,99 %. A queima foi maior nos ensaios com temperatura fixada em 200 °C.
- Normalmente durante o processo de queima, as temperaturas não ultrapassavam 600 °C.
- Registrou-se velocidade de queima maior para os experimentos onde a temperatura interna do forno era fixada em 200 °C.
- As concentrações de HC tornavam-se maiores para as temperaturas fixadas em 200 °C.
- De modo geral, todos os parâmetros interferiram nas respostas finais obtidas.

Nos testes realizados em campo (Carvalho Jr. et al, 2001), em 1999, a velocidade média da incandescência variou de 0,552 a 2,412 cm/h. Mais tarde, em 2001, o processo foi estudado com maiores detalhes e a velocidade média encontrada foi de 0,7 a 3,8 cm/h. Neste experimento foram encontrados 59 troncos incandescentes, sendo escolhidos 11 para monitoramento. Os principais fatores que influenciaram a velocidade de propagação da incandescência foram: (i) período do dia; (ii) composição física e química da madeira; (iii) posição do tronco no local e em relação ao solo; (iv) a frente incandescente ocorre somente se a madeira é meso ou macro-porosa.

Em campo, a incandescência ocorre geralmente na região interna de troncos ocos. Isto se deve ao fato do calor não se dissipar para o ambiente, propiciando condições de queima auto-sustentada no tronco. Esta linha de raciocínio foi usada na montagem experimental (câmara de aquecimento e ignição com queimador infravermelho) para reproduzir as condições observadas no campo. As temperaturas medidas por termopares nos testes de laboratório estiveram muito próximas às temperaturas medidas através do pirômetro ótico no campo. As velocidades registradas também foram da mesma ordem de grandeza, o que indica que as condições foram adequadamente reproduzidas e o objetivo alcançado.

O modelo numérico desenvolvido fornece a distribuição de temperatura em um tronco e apresenta o perfil de velocidade de propagação da frente de incandescência em função da temperatura da superfície, com valores semelhantes àqueles encontrados em campo e em laboratório.

6.2 – Recomendações para Trabalho Futuro

Na parte experimental, propõe-se um experimento de pequena escala, com pirólise forçada, em ambiente inerte. Pirólise forçada seria aquela em que a fonte de calor não provém da reação heterogênea, mas de fonte externa, com a utilização de lâmpadas e lentes. A radiação proveniente deste conjunto estabelece uma frente de pirólise que, em ambiente inerte, emite voláteis que não se contaminam com os produtos da combustão. Desta forma, os gases CO₂, CO, etc. que fossem lidos nos aparelhos seriam exclusivamente da frente de pirólise. O mesmo experimento deverá ser

replicado, em atmosfera oxidativa e a comparação dos dois forneceria a velocidade de propagação da frente de incandescência por meio da reação $C + \frac{1}{2} O_2 \leftrightarrow CO_2$. As temperaturas serão aferidas com sensor infravermelho com saída para computador.

Ainda na área experimental, propõe-se também, uma análise da incandescência em uma variedade maior de espécies de árvores, utilizando o mesmo equipamento experimental.

Na parte teórica, recomenda-se o aprimoramento do modelo utilizado, onde seriam acrescentados o processo de secagem e conteúdo de cinzas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Bilbao, R.; Mastral, J.F.; Lana, J.A.; Aldea, M.E.; Ceamanos, J.; Betrán, M. A model for the prediction of the time of smouldering and ignition of wood including convective effects. *Interflam 99*, 1447-1453, (1999).
- Brenden, J.J., Schaffer, E.L., Smoldering Wave-Front Velocity in Fiberboard, *Research Paper FPL 367*, Forest Products Laboratory, Forest Service, USDA, (1980).
- Carvalho Jr., J.A.; Costa, F.S.; Veras, C.A.G.; Sandberg, D.V.; Alvarado, E.C.; Gielow, R.; Serra, A.M.; Santos, J.C. Biomass fire consumption and carbon release rates of rainforest-clearing experiments conducted in northern Mato Grosso, Brazil, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16):17877-17887, (2001).
- Carvalho, E. R.; Gurgel Veras, C.A.; Carvalho Jr., J.A. Experimental investigation of smouldering in biomass, *Biomass and Bioenergy* 22(4), 283-294, (2002).
- Changdong Sheng and J.L.T. Azevedo. *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 29, 2002/ pp.102-111. Modeling Biomass Devolatilization Using the Chemical Percolation Devolatilization Model for the Main Components.
- Costa, F.S. and Sandberg, D. Smoldering of a semi-infinite log, *Ph.D. Thesis*, Forest Service, U.S., (2001).
- Ferguson, S.A.; Hardy C.C.; Modeling smoldering emissions from prescribed broad cast burns in the Pacific Northwest, *Int. J. Wildland Fire* 4(2):135-142 (1994).
- Grant, D.M.; Pugmire, R.J.; Fletcher, T.H. and Kerstein, A.R., *Energy and Fuels*, v. 13, pp. 175-186, 1989, An Advanced Model of Coal Devolatilization Based on Chemical Structure, M.S. Thesis, Brigham Young University, Provo, USA, 1999.

- Kailasanath, K. and Zinn, B.T. A theoretical investigation of the smoldering combustion of porous solids. *Proceedings of the Fluids Engineering Conference*, 81-86, (1981).
- Kanury, A.M.; Blackshear, P.L.; Some Considerations Pertaining the Problem of Wood-burning. *Combustion Science and Technology*, 2(3-4):339-355 (1970).
- Leach S.V.; Rein G.; Ellzey J.L.; Ezekoye O.A.; Torero J.L.; Kinetic and Fuel Property Effects on Forward Smoldering Combustion, *Combustion and Flame*, 120:346-358 (2000).
- Moallemi, M.K.; Zhang, H.; Kumar S., Numerical Modeling of Two-Dimensional Smoldering Processes, *Combustion and Flame*, 95:170-182 (1993).
- Moussa, N.A.; Toong, T.Y.; Garris, C.A. Mechanism of Smoldering Cellulosic Materials. *Proc of the Sixteenth International Symposium on Combustion*, 1447-1448 (1976).
- Muramatsu, M.; Umemura, S.; Okada, T. A mathematical model of evaporation pyrolysis processes inside a naturally smoldering cigarette. *Combustion and Flame*, 36(3):245-262, (1979).
- National Fire Protection Association (NFPA); Fire Detection Systems in Dwellings, Los Angeles: Fire Department Tests, (1963).
- Numm, T. R.; Howard, J. B.; Longwell, J. P.; Peters, W. A. Product compositions and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood, *Industrial Engineering Chemical Processes Des. Development*, v. 24, n. 3, p. 836-844, (1985).
- Ohlemiller, T.J.; Rogers, F.E.; A Survey of Several Factors Influencing Smoldering Combustion in Flexible and Rigid Polymer Foams, *Fire Flammability*, 9:489-509 (1978).

- Ohlemiller, T.J.; Lucca D.A.; An Experimental Comparison of Forward and Reverse Smolder Propagation in Permeable Fuel Beds; *Combustion and Flame*, 54:131-147 (1983).
- Ohlemiller, T.J., Modeling of Smoldering Combustion Propagation, *Prog. Energy Combustion Science*, 11, 277-310 (1985).
- Ohlemiller, T.J., Smoldering Combustion, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2^a. Edição, Capítulo 11, Seção 2, 2/171-179 (1995).
- Patankar, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation, McGraw-Hill Book Company, (1980).
- Puri, I.K., ed. *Environmental Implications of Combustion Processes*. Boca Raton: CRC Press, (1993).
- Ross, P. J. *Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade*, Editora McGraw-Hill Ltda, (1991).
- Salazar, C.M.; Connor, M.A.: “Kinetic Studies of Pyrolysis of Wood, with Particular Reference to Eucalyptus Regnans”, *Proc. Of the Eleventh Australian Conference on Chemical Engineering*, paper 22b, pp.753-761, (1983).
- Shafizadeh, F.; Sekiguchi Y.; Oxidation of Chars During Smoldering Combustion of Cellulosic Materials, *Combustion and Flame*, 55: 171-179 (1984).
- The Condensed Chemical Dictionary. 8^a. Ed. New York: Van Nostrand Reinhold (1971).
- Torero, J.L.; Fernandez-Pello, A.C.; Experimental Observations of the Effect of Gravity Changes on Smoldering Combustion, *AIAA Journal*, 32(5):991-996 (1994).
- Yokelson, R.J.; Susott, R.; Ward, D.E.; Reardon, J.; Griffith, D.W.T.; Emissions from Smoldering Combustion of Biomass Measured by Open-path Fourier Transform

Infrared Spectroscopy, *Journal of Geophysical Research*, vol. 102, no. D15, pp. 18865-18877 (1997).

Ward, D.E.; Susott, R.A.; Kauffman, J.B.; Babbitt, R.E.; Cummings, D.L.; Dias, B.; Holben, B.N.; Kaufman, Y.J.; Rasmussen, R.A.; Setzer, A.W.; Smoke and Fire Characteristics for Cerrado and Deforestation Burns in Brazil: BASE-B experiment, *Journal of Geophysical Research*, 97, 14,601-14,619 (1992).

ANEXO 1

**LISTAGEM DO PROGRAMA COMPUTACIONAL IMPLEMENTADO EM
FORTRAN 90**