

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá

1997



"COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM MICROQUEIMADAS E EM ESCALA REAL"

AGUINALDO MARTINS SERRA JÚNIOR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A CONTIÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. [Assinatura] Araújo [Assinatura]

***"Combustão de Biomassa em
Microqueimadas e em Escala
Real"***

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
[Assinatura]

AGUINALDO MARTINS SERRA JÚNIOR

Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
[Assinatura]

79

Prof. Dr. FERNANDO DE SOUZA COSTA
[Assinatura]



"COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM MICROQUEIMADAS E EM ESCALA REAL"

AGUINALDO MARTINS SERRA JÚNIOR

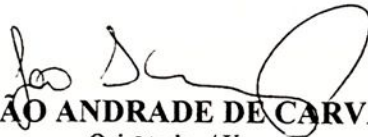
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

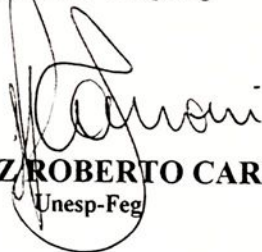
ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Mauricio Araujo Zanardi
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Unesp-Feg

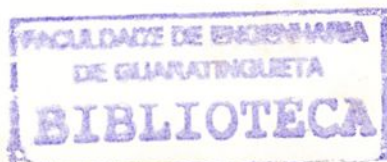

Prof. Dr. FERNANDO DE SOUZA COSTA
INPE

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

355

355

Dezembro de 1997



T662.6JJ.2(043)
S487c

DADOS CURRICULARES

AGUINALDO MARTINS SERRA JUNIOR

NASCIMENTO 19/10/54 – JUNDIAÍ – SP

FILIAÇÃO Aguinaldo Martins Serra
Geny Machado Martins Serra

1978/1982 Curso de Graduação
Escola de Engenharia Industrial de São José dos
Campos – Engenheiro Mecânico



À minha família.



AGRADECIMENTOS

Ao Dr. João Andrade de Carvalho Jr., que mais do que como mestre e orientador, orientou-me como amigo;

Ao José Carlos dos Santos, amigo, colega e colaborador, pela ajuda e colaboração no apoio logístico por todo o andamento deste trabalho;

Ao Dr. Carlos Alberto Gurgel Veras, pelas excelentes discussões, informações e literatura fornecidas;

Ao Dr. Demétrio Bastos Netto, por ceder tempo em seu projeto para que esta dissertação fosse concluída;

Ao Carlos Alberto dos Santos, pela colaboração e amizade durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho;

Ao Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE, pelas facilidades e apoio oferecidos para a realização das microqueimadas;

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, processos 96/11742-0 e 96/05002-4, respectivamente;

À prefeitura de Alta Floresta, em especial ao prefeito Dr. Vicente da Riva e ao Arq. Alberto Lopes Batista;

Ao Sr. Antonio Costa, gerente da Fazenda Caiabi, pelo apoio e colaboração em Alta Floresta;

Ao pessoal de apoio na fazenda (Seu Zé, João, Polaco, Valdeci, Paulo, Raimundo e Gil).



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE SÍMBOLOS.....	13
Resumo.....	14
Abstract.....	15
CAP. 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Posicionamento do Problema.....	16
1.2 - Caracterização da Biomassa.....	20
1.3 - Processo de Decomposição Térmica da Biomassa durante a Queima..	22
1.4 - As Taxas de Perda de Massa.....	27
1.5 - A Energia de Ativação e o Fator de Frequência.....	31
1.6 - Combustão sem Chama ("Smoldering").....	36
1.7 - Objetivos do Trabalho.....	38
CAP. 2 - EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS DE TESTES EM LABORATÓRIO	
2.1 - Descrição do Equipamento.....	39
2.2 - Preparação da Balança.....	40
2.3 - Levantamento do Perfil de Velocidades do Vento na Saída do Túnel..	41
2.4 - Levantamento da Curva de Calibração da Balança com Células de Carga.....	42
2.5 - Determinação da Temperatura nas Células de Carga na Microqueimada.....	45
2.6 - Preparação das Amostras.....	46
2.7 - Realização das Microqueimadas.....	47
2.8 - Escolha das Amostras.....	47



2.9 - Procedimento do Ensaio.....	48
CAP. 3 - PROCEDIMENTOS PARA O ENSAIO DE CAMPO	
3.1 - O Local do Ensaio.....	50
3.2 - Preparação do Local de Ensaio.....	51
3.3 - Preparação para a Queimada.....	52
3.4 - Início da Queimada.....	55
CAP. 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO DO ENSAIO DE LABORATÓRIO	
4.1 - Considerações Iniciais.....	58
4.2 - Microqueimada sem Vento.....	58
4.3 - Microqueimada com Vento.....	63
4.4 - Comparação de Taxas de Combustão sem e com Vento.....	65
4.5 - Comentários Gerais.....	67
CAP. 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO DO ENSAIO DE CAMPO	
5.1 - Desenvolvimento da Combustão na Área de Teste.....	72
5.2 - Observações durante a Queimada.....	73
5.3 - Observações após a Queimada.....	75
CAP. 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHO FUTURO	
6.1 - Conclusões Gerais.....	82
6.2 - Recomendações para Trabalho Futuro.....	83
REFERÊNCIAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema da estrutura molecular da celulose.....	21
Figura 1.2 – Esquema das fases da queima da biomassa.....	25
Figura 1.3 – Esquema da madeira durante sua queima, mostrando as trincas na superfície e o fluxo de voláteis.....	26
Figura 1.4 – Mudanças, durante a pirólise, do peso da amostra (W), taxa de perda de peso (R) e da temperatura do gás (T).....	28
Figura 1.5 – Variação com o tempo do peso da amostra (A), taxa de perda de peso (B), temperatura do gás (C) e temperatura média da amostra (D).....	29
Figura 1.6 – Curvas para os três componentes principais da madeira	30
Figura 1.7 – Temperatura no interior e na superfície do tronco durante aquecimento em atmosfera inerte.....	35
Figura 2.1 – Esquema do prato da balança.....	39
Figura 2.2 – Perfis de velocidade do ar para a seção média (—) e a seção superior da fresta (---). A cota refere-se à distância medida a partir de um dos lados da fresta de saída do túnel de vento.....	43
Figura 2.3 – Curva de calibração da balança no conjunto em condições de trabalho	44

Figura 2.4 – Aspecto da célula de carga simulada com a proteção de amianto já apropriadamente montada em sua volta.....	46
Figura 3.1 – Disposição das amostras de biomassa em secador de cacau.....	52
Figura 3.2 – Disposição dos troncos seleccionados na área de teste.....	54
Figura 3.3 – Esquema mostrando o procedimento de iniciação da queimada.....	55
Figura 3.4 – Pontos de fogo no instante da passagem do satélite no dia anterior ao teste.....	56
Figura 4.1 – Aspecto da biomassa colocada sobre o prato da balança, imediatamente antes de se iniciar o ensaio sem vento.....	59
Figura 4.2 – Chamas durante o ensaio sem vento. Percebe-se claramente uma concentração das chamas no centro da pilha de material.....	60
Figura 4.3 – A permeabilidade maior na direção longitudinal e o aumento da pressão no interior do tronco provoca o escape de gases formados no interior pela sua extremidade.....	61
Figura 4.4 – Aspecto do material após o término da combustão. A eficiência de combustão foi bem maior no centro que nas beiradas da pilha de material.....	62
Figura 4.5 – Material pronto para a microqueimada com vento.....	63
Figura 4.6 – Desvio da pluma para a direita, em virtude da ação do vento provocado.....	64

Figura 4.7 – Aspecto do material após o término da combustão. A eficiência de combustão foi bem maior que no primeiro ensaio.....	65
Figura 4.8 – Curvas para as duas microqueimadas realizadas: sem vento (●), com vento de 2,2 m/s (●) e com vento de 5,0m/s (●).....	66
Figura 5.1 – Início do processo de acendimento da biomassa.....	73
Figura 5.2 – Aspecto da queimada durante a fase mais intensa da combustão.....	74
Figura 5.3 – Gaseificação na extremidade de galho.....	75
Figura 5.4 – Aspecto da área de teste instantes antes da queimada.....	76
Figura 5.5 – Aspecto da área de teste no dia posterior à queimada.....	76
Figura 5.6 – Vista aérea do local do teste sete dias após a queimada.....	77
Figura 5.7 – Tronco em processo de “smoldering”.....	78
Figura 5.8 – Aspecto dos cruzamentos entre troncos após a queimada.....	79
Figura 6.1 – Dimensões e distância do solo sugeridas para troncos suspensos.....	84
Figura 6.2 – Montagem proposta para investigação em laboratório do processo de “smoldering”	85
Figura 6.3 – Montagem alternativa proposta.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Valores de E e A (experimentais).....34

Tabela 3.1 – Umidade, em termos de massa de água por massa total de material fresco, de algumas espécies encontradas na área de teste.....53

Tabela 5.1 – Resultados do teste de campo.....80



LISTA DE SÍMBOLOS

A :	fator de frequência [t^{-1}];
D_{O_2} :	difusividade do oxigênio [$L^2 t^{-1}$];
E :	energia de ativação [$W M^{-1}$];
L :	comprimento característico [L];
M :	teor de umidade [%];
N_{O_2} :	fluxo difusivo de oxigênio [$M t^{-1} L^{-2}$];
R :	constante do gás [$W M^{-1} T^{-1}$];
Q :	fluxo de calor na direção de propagação [$W t^{-1} L^{-2}$];
Q_C :	calor liberado por unidade de massa de oxigênio [$W M^{-1}$];
Q_{loss} :	fluxo de calor perdido por radiação e condução [$W M^{-1}$];
$\dot{q}_s''$:	taxa de transferência de calor [$W t^{-1}$]
t_{ig} :	tempo de ignição [t];
T_i :	temperatura crítica de ignição [T];
T_0 :	temperatura inicial do corpo [T];
V :	velocidade de propagação da frente de combustão [$L t^{-1}$];
w :	velocidade da frente de ignição [$L t^{-1}$];
W :	massa instantânea da amostra [M];
W_f :	massa final da amostra [M];
α :	permeabilidade térmica [L^2];
Δh :	diferença de entalpia [$W M^{-1}$];
$\Delta \rho_{O_2}$:	diferença de concentração [$M L^{-3}$];
ϕ :	porosidade [adimensional];
ρ :	massa específica [$M L^{-3}$];
ρ_b :	massa específica do material a ser queimado [$M L^{-3}$];
ρ_f :	massa específica do combustível [$M L^{-3}$];
ρ_{O_2} :	concentração do oxigênio (superfície frente de combustão [$M L^{-3}$]);
$\rho_{O_{\infty}}$:	concentração do oxigênio na atmosfera ambiente [$M L^{-3}$].

RESUMO

Este trabalho trata da combustão de biomassa em queimadas. Diferente de incêndios, queimadas são provocadas pelo homem, para transformar áreas de floresta natural em pastos e plantações.

O objetivo principal aqui é verificar a influência do vento e das características de troncos na eficiência de queima de biomassa. Isso foi observado de duas maneiras: experimentos de microqueimada e em ensaio em escala real.

O ensaio de microqueimadas foi feito em um túnel de vento, projetado e construído no INPE, em Cachoeira Paulista. Através de experimentos feitos com velocidades de vento diferentes, com o mesmo tipo de material, nas mesmas condições de secagem e dimensões, diferenças na eficiência de queima foram estudadas.

Além disso, observaram-se alguns aspectos peculiares de queimadas em um experimento em escala real, na fazenda Caiabi, município de Alta Floresta, MT, na fronteira da região de desmatamento da floresta Amazônica. Lá, o objetivo principal era observar-se a influência da geometria de troncos na eficiência de queima.

ABSTRACT

This work investigates combustion of biomass in forest clearing fires. Instead of natural fires, forest clearing fires are made by man to transform natural forests in pastures and planting areas.

The main goal of the study was to verify influence of trunk characteristics and wind in the burning efficiency. This matter was observed in two ways: in a micro-burning test and in a real size test.

The micro-burning test was performed in a wind tunnel, designed and built at INPE's installation, in Cachoeira Paulista. By means of tests performed with different wind velocities with the same kind of biomass, at the same natural drying conditions and average size, differences between burning rates and efficiencies were studied.

Furthermore, some particular aspects of burning were observed in a real size test, performed at Caiabi farm, Alta Floresta, MT, located at the deforestation and burning boundary in the Amazon region. The main goal there was to observe influence of trunk geometry in the burning efficiency.



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Posicionamento do Problema

O tema queimadas tem ocupado espaço em trabalhos de pesquisadores de uma maneira diferente nos dias de hoje do que era há algum tempo atrás. As pesquisas sobre queima de florestas, árvores ou qualquer outro tipo de vegetação, natural ou não, tinham como principal interesse a determinação de fatores ou parâmetros ligados a incêndios florestais. Nesta direção, existem muitos trabalhos sobre a queima de biomassa e até sobre a influência que o vento exerce sobre a variação da taxa de queima. Não existia, porém, preocupação em se caracterizar o processo físico da queima, tratando-se o material em combustão como outro qualquer, isto é, homogêneo e com uma fase de conversão simples.

Além disso, os resultados desses trabalhos, bem como suas diretrizes principais, não eram voltados a uma análise da influência dos incêndios sobre o meio ambiente, do ponto de vista da química da atmosfera, visto que este assunto não considerado era tão importante. O objetivo principal era o incêndio florestal em si e suas formas de propagação, visando-se estudar as melhores maneiras de combatê-lo e controlá-lo.

Neste trabalho, trataremos de queimadas de biomassa e não de incêndios. Chamamos de queimadas à combustão de material provocada com o intuito de se eliminar a vegetação que primitivamente existia sobre o solo de determinada região com fins de preparar o solo para pastagens ou para o plantio de espécies alimentares.

Para o fim a que se destina este trabalho, biomassa é o termo geral utilizado para se designar material orgânico vegetal, sob ou sobre o solo, vivo ou

não. Isto inclui árvores, plantações, grama ou mato, serrapilheira, raízes, troncos derrubados ou em pé, mortos ou frescos, etc.

As principais diferenças existentes entre os incêndios e as queimadas são:

- Incêndios são provocados por acidentes ou pela própria natureza, pela ação de raios, por exemplo. O combustível principal é formado por árvores em pé, frescas, e o material de serrapilheira, naturalmente seco. Os incêndios não escolhem hora, data ou local para acontecerem.
- Queimadas são provocadas pelo homem, com o objetivo acima descrito. O seu combustível principal é formado por material abatido e deixado para secar e material de serrapilheira como acima. As queimadas acontecem nas épocas de secas, quando seu combustível está mais fácil de ser consumido, e são iniciadas em data, hora e local previamente determinados.

Com a crescente preocupação com o meio ambiente, fala-se muito sobre as queimadas provocadas na Amazônia por agricultores e pecuaristas. Na análise dessas queimadas com vistas à sua influência sobre o meio ambiente, utilizaram-se de dados e fatores disponíveis no momento dos estudos sobre o assunto “Queima de Vegetação”. Os estudos realizados até então eram, conforme já foi dito, voltados para incêndios, que são eventos distintos das queimadas. Na adaptação de alguns deste dados à análise das queimadas, muitos erros foram produzidos, conduzindo a resultados disparatados e absurdos, às vezes.

Os dados sobre queimadas não podem ser confundidos com os de desmatamento ¹. Embora exista uma relação entre as duas e a mídia internacional ainda faça certa confusão, há uma diferença clara, sobretudo no que se refere ao monitoramento e ao cálculo dos parâmetros da destruição. Nem tudo que queima foi recentemente desmatado e nem toda área desmatada queima.

As queimadas brasileiras, em geral, são intencionais, usadas com “tecnologia agrícola” para limpeza do solo antes do plantio, redução de pragas e ervas daninhas, renovação de pastagens e como auxiliar na colheita de cana de açúcar.

Embora existam outras tecnologias agrícolas para substituir as queimadas, o fogo ainda é o meio mais barato. Por isso, é grande o número de áreas que são queimadas todos os anos, mesmo aquelas já desmatadas há muito tempo.

Esse fogo é monitorado com satélites meteorológicos, através dos sensores de temperatura, precisos na localização e na contagem do número de focos, mas não na delimitação da área queimada. O monitoramento por satélite foi concebido para ajudar os órgãos de fiscalização a localizar as piores concentrações de focos e ajustar os programas de controle legal ou mesmo de combate ao fogo.

Os desmatamentos são derrubadas de floresta, seguidos ou não da queima dos restos de vegetação. Muitas queimadas numa região de mata, sem história de ocupação humana, podem indicar novos desmatamentos. Mas não é possível calcular a área desmatada sem utilizar outros satélites: os de sensoriamento remoto, que medem a luz solar refletida pela superfície terrestre. Esses satélites (da série LANDSAT) foram usados no cálculo da área de desmatamento da Amazônia Legal, realizado pelo INPE de 1989 a 1991. Nos últimos anos, faltaram recursos e decisão política para a atualização desse levantamento de área.

Como dito anteriormente, os dados sobre combustão de biomassa que estão disponíveis na literatura são referentes a incêndio, com o processo de combustão fazendo parte de outro, maior. Assim, não existem informações sobre

o processo em si de queima de biomassa, ou, melhor ainda, sobre queima de biomassa da Amazônia.

Na literatura atual sobre combustão de biomassa não existe preocupação em se caracterizar o processo físico da queima, tratando-se o material em combustão como homogêneo e com uma fase de conversão simples. Isto se deve ao fato de os artigos escritos tratarem de outros assuntos como principais, com a queima de biomassa fazendo parte de um processo maior (incêndio florestal, poluição, liberação de CO_2 ou NO_x , efeito estufa, etc.). Aqui, procuraremos mostrar que a biomassa tem um comportamento singular durante a sua queima.

A queima da madeira no ar não é um processo monofásico. De fato, ocorre em fases distintas e cujo estudo e observação não têm sido realizados a fundo. Os primeiros estudos teóricos da queima de madeira tratavam-na como um meio contínuo e sólido, com constante de difusidade térmica constante, que recebia calor de uma fonte externa em uma superfície bem definida. As reações de pirólise eram consideradas como se fossem reações simples de primeira ordem, com calor de reação fixo ². Os perfis de temperatura e das zonas de reação eram determinados resolvendo-se as equações para condução e geração de calor, simultaneamente, com condições de contorno apropriadas.

Estudos mais recentes sobre pirólise de madeira envolvendo cinéticas de reações, a ocorrência de reações exotérmicas e endotérmicas no seu interior e propriedades térmicas do carvão em altas temperaturas, sugerem que as hipóteses assumidas nos estudos anteriores necessitam de modificações para situações práticas importantes. Atualmente os problemas associados com a queima de biomassa estão na formulação de um modelo matemático para os processos físicos e químicos complexos envolvidos e na aquisição de dados confiáveis para uso nestes modelos.



O objetivo principal deste trabalho é a determinação experimental das taxas de combustão de biomassa, considerando-se a influência do vento. Paralelamente, deverão ser feitas análises dos produtos da combustão e observações da variação de temperatura no interior dos troncos, durante o processo de combustão.

1.2 - Caracterização da Biomassa

A biomassa é constituída por cerca de 49% de carbono em peso de material seco, distribuídos em: 20 a 28% de lignina, 42 a 45% de celulose e 27 a 30% de hemicelulose ³.

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 $C_{42}H_{32}O_6(OH)_5(CH_3O)_5$ ⁴. É removida da madeira durante o processo de fabricação da polpa de celulose, e usada na indústria química com estabilizante de asfalto, dispersantes, aditivos em óleos, na fabricação da baunilha, e outros ⁵.

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 ⁴ e sua massa específica é da ordem de 1,5 g/cm³ ⁵. Não tem gosto ou cheiro. Fibras de algodão são formadas por pura celulose. É combustível, com ponto de ignição de aproximadamente 240 °C. Em algumas formas pode ser auto-inflamável. Tem bastante uso como papel, produtos de algodão (roupas, indústria, embalagens), e usos especializados, como rins artificiais, isolamentos térmicos e acústicos. A celulose modificada quimicamente transforma-se em rayon, celofane, produtos nitrados, éteres, etc. Um esquema de sua estrutura molecular é mostrado na Figura 1.1.

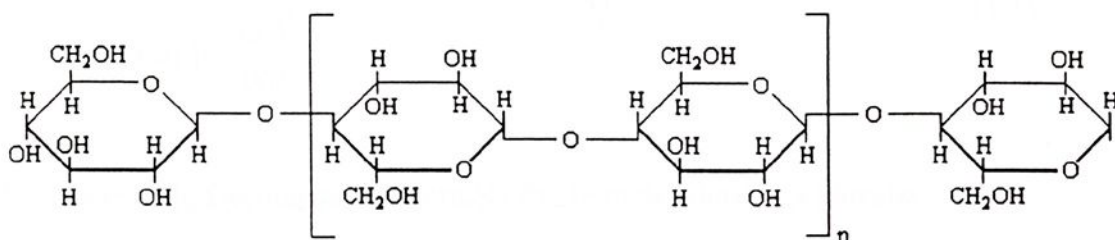


Figura 1.1 – Esquema da estrutura molecular da celulose.

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 ⁵. É solúvel em bases e facilmente transformada em sacarose por diluição em ácidos minerais. É usada como complemento alimentar para animais.

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 e as fibras, formadas por celulose e aglutinadas por lignina, dão resistência mecânica à madeira. Outras células acumulam amido, resinas, gorduras, etc.

A porosidade (razão entre o volume de poros e o volume ocupado pelo material) é de 40 a 75%. A influência da porosidade Φ e do teor de umidade M (baseado no peso da amostra seca em estufa) na densidade da madeira é dado pela relação⁴:

$$\rho = \frac{1,5 \left(1 - \frac{\Phi}{100}\right)}{1 + 0,0135M \left(1 - \frac{\Phi}{100}\right)} \quad (1.1)$$

1.3 - Processo de Decomposição Térmica da Biomassa durante a Queima

Na decomposição térmica de madeira, alguns fenômenos físicos e químicos ocorrem no tempo e espaço. Esses fenômenos incluem: secagem e pré aquecimento, liberação de material inflamável volátil, combustão do material gasoso liberado, e combustão incandescente do carbono fixado ⁶. Este processo de decomposição, que ocorre com aquecimento, é chamado de pirólise. As taxas de aquecimento, secagem, pirólise, ignição e queima vão depender da natureza do material, é claro, e muito também da atmosfera que está fornecendo o calor inicial (ambiente da estufa). O processo em si da queima de biomassa, onde observamos estes fenômenos, acontece em cinco fases distintas, descritas a seguir ⁴.

Fase 1 - Inicia-se o aquecimento da superfície e o calor propaga-se para o interior por condução. Já se tem um início da secagem na superfície. Vamos supor que a superfície, que estava a uma temperatura T_0 uniforme, receba calor de uma fonte a uma taxa constante e uniforme $\dot{q}_s''$. Inicialmente, este aquecimento só é visível em camadas próximas à superfície. A distribuição da temperatura através do sólido com o decorrer do tempo é dado pela solução de um problema de condução transiente em um sólido semi-infinito. Considerando $x=0$ nesta solução, teremos a temperatura na superfície em função do tempo.

Fase 2 - Inicia-se um processo de pirólise na superfície, e à condução somam-se as reações de pirólise nas camadas interiores. 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. Vamos supor que esta ignição

ocorra a uma temperatura crítica T_i (esta temperatura é aproximadamente 350 ou 400 °C para materiais com celulose). O tempo para a ignição será dado por ⁶:

$$t_{ig} = \frac{\pi}{\alpha} \left[\frac{k(T_i - T_0)}{2\dot{q}_s} \right]^2, \quad (1.2)$$

onde α é a permeabilidade térmica ($= k/(\rho_0 c_p)$, sendo ρ_0 a massa específica inicial da biomassa e c_p o seu calor específico) e onde k é a condutividade térmica da biomassa. Uma taxa de aquecimento alta e uma pequena diferença entre a temperatura inicial e a crítica fazem com que a ignição ocorra rapidamente. Por outro lado, t_{ig} é proporcional às propriedades de inércia térmica (k^2/α) do material.

Os gases produzidos na pirólise, ao fluir para fora, induzem uma convecção em direção oposta à condução. Sob a camada em pirólise, o sólido virgem continua a ser aquecido por condução, principalmente. Os constituintes condensáveis formados na camada em pirólise, apesar de a maior parte fluir para fora, parte deles acha passagem para o relativamente mais frio interior, 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 começam a ser re-evaporados, num processo com efeitos endotérmicos. A equação da energia nesta fase deve ter um termo que considere este processo endotérmico. Neste ponto, a combustão é auto-sustentada.

Fase 3 - Agora existem três camadas: a camada interior de material virgem, a camada intermediária em pirólise e a camada superficial, constituída por carvão. Quando o sólido é espesso e aquecido lentamente, os gradientes térmicos internos serão pequenos; em consequência, a espessura da camada em pirólise aumenta e a taxa de pirólise será uniforme. Se, porém, os gradientes térmicos são elevados, em virtude de altas taxas de aquecimento em materiais com baixa condutividade térmica, a espessura da camada em pirólise diminuirá. É claro que

um mesmo corpo teria um comportamento diferente em situações de aquecimento diferentes ⁷.

A camada de carvão é formada quando todos os voláteis forem removidos do sólido. Nesta camada a transferência de energia ocorre 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, quebram-se em gases mais leves. Quando esses gases, com massa molecular mais baixa e combustíveis, 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.

Fase 4 - A frente de pirólise alcança o eixo de simetria e o problema fica com duas camadas: uma em pirólise e a externa de carvão.

Fase 5 - 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 desta fase, o tronco pode falhar mecanicamente.

As Figuras 1.2 e 1.3 ilustram o processo acima descrito.

Este processo, aqui descrito em linhas gerais, é bastante influenciado por algumas características do material que está em pirólise. Antes de ser pirolisado, poderíamos afirmar que um pedaço de madeira é um meio contínuo, com uma superfície bem definida, e onde a condução de calor acontece da maneira tradicional. 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 10^4 vezes maior que na direção transversal ao tronco. Como na direção longitudinal

do tronco, temos uma maior condutividade térmica e uma maior permeabilidade, as fases acima descritas do processo de pirólise acontecem com mais facilidade nesta direção. Temos, então uma taxa de combustão maior longitudinal que transversalmente nos troncos onde são observadas estas 5 fases acima.

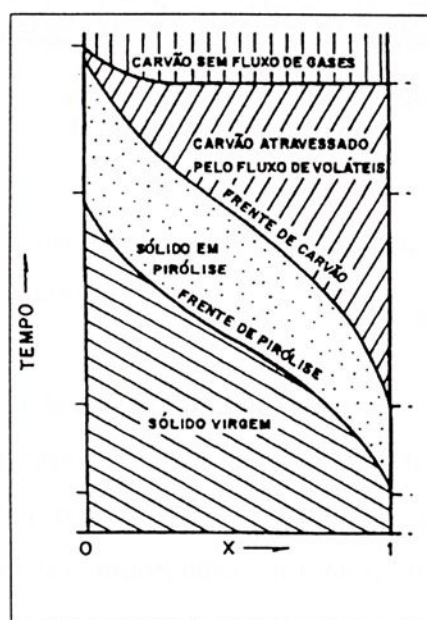


Figura 1.2 – Esquema das fases da queima da biomassa ⁴.

Entre as outras características a serem observadas, poderíamos enumerar: dimensões do material (comprimento e diâmetro), forma (razão entre a área e o volume), teor de umidade, ventilação (oxigenação), densidade, permeabilidade, calor específico e porosidade. Estas características vão influir diretamente na taxa de decomposição do material. Veremos que outras variáveis geradas pelo próprio processo de pirólise e de combustão, juntar-se-ão a estas, tornando este um processo bastante particular.

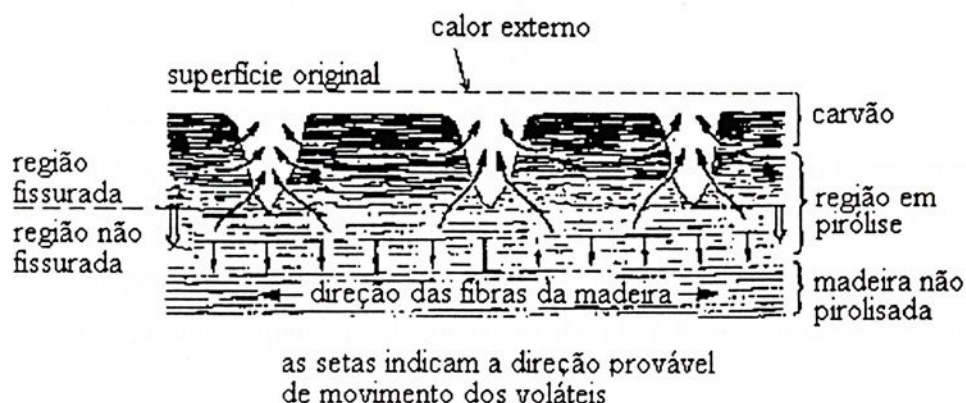


Figura 1.3 – Esquema da madeira durante sua queima, mostrando as trincas na superfície e o fluxo de voláteis ².

A espessura da camada de carvão e a conseqüente resistência em se remover os produtos da pirólise do local de sua formação aumenta continuamente com o tempo. Este aumento no tempo de residência dos pirolisados na camada de carvão tem duas implicações importantes: primeiro, surge a oportunidade para uma possível quebra secundária em gases mais leves, e, segundo, surgem mais oportunidades para alguma reação entre o carvão aquecido e os gases, catalisados pelo carvão aquecido.

As trincas e fissuras, freqüentemente notadas na superfície de carvão, aumentam em número e tamanho, reduzindo os efeitos acima mencionados. Os processos químicos simultâneos que estão ocorrendo interagem entre si em um mecanismo complexo, ainda inexplicado. A taxa de aquecimento do sólido varia com os níveis de temperatura, e com a localização e com o tempo de exposição, fazendo, portanto, com que as constantes cinéticas também variem. O sólido abaixo das camadas inferiores que recebeu algum gás produzido na superfície, conforme citado na fase 2, já não tem a mesma composição que no início, sendo outro sólido sujeito à pirólise. Além disso, esta transferência acoplada de massa e calor para o interior é sabidamente responsável por um aumento na taxa de aquecimento do interior do sólido.

1.4 - As Taxas de Perda de Massa

Durante o aquecimento inicial descrito acima, antes de se iniciar a pirólise da madeira, ocorre a evaporação da água restante após o período em que houve a secagem natural, que é retirada a aproximadamente 105°C ⁴, observando-se uma perda de peso neste instante. Quando se alcança uma temperatura de 200°C , observa-se mais uma pequena perda de massa, devido à formação de gases não combustíveis.

Além desta perda de umidade, que provoca uma perda de massa discreta, observamos também que os principais componentes da madeira decompõem-se em diferentes faixas de temperatura. A hemicelulose começa a decompor-se a 200°C , indo até 260°C , transformando-se em produtos voláteis em sua maior parte. A celulose é mais estável, decompondo-se entre 240 e 350°C , com uma perda de peso significativa começando a 275°C . Também a maior parte é transformada em voláteis. A 400°C restam 15% da celulose transformada em carvão, diminuindo para 9% a 800°C ³. A lignina tem a faixa de temperatura de decomposição mais extensa, de 280 a 500°C . Sua degradação a temperaturas mais baixas é bem lenta: a 400°C apenas 30% é volatilizada. O produto predominante de sua decomposição é carvão, alcançando 45% a 800°C ³. Este comportamento bastante diferenciado entre os três principais componentes da madeira faz com que tenhamos uma pirólise da celulose e da hemicelulose completa antes que a pirólise da lignina tenha atingido um estágio muito avançado. Isto pode ser observado nos gráficos das Figuras 1.4 e 1.5.



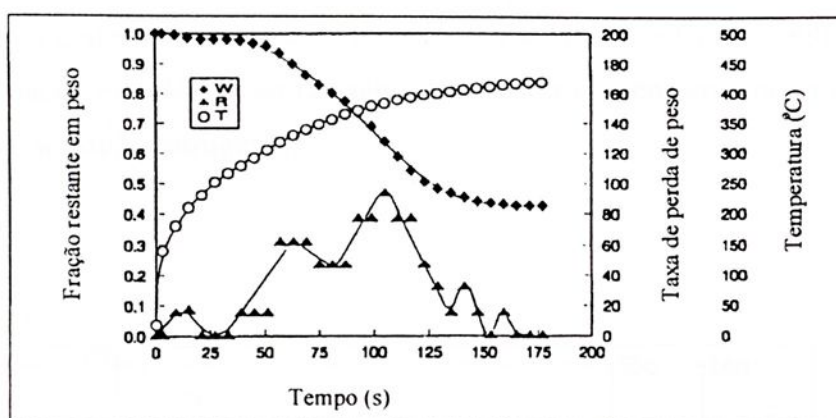


Figura 1.4 – Mudanças, durante a pirólise, do peso da amostra (W), taxa de perda de peso (R) e da temperatura do gás (T) ⁸.

Nos dois gráficos, podemos observar três picos principais. No primeiro gráfico, temos a perda da umidade, em seguida a decomposição da hemicelulose e a decomposição da celulose. As amostras eram cilindros de *Eucalyptus Delegatensis*, medindo 1 cm de diâmetro por 2 cm de altura ¹², pirolisados em uma atmosfera de nitrogênio, com temperatura controlada. No segundo gráfico, podemos observar novamente os três picos principais na curva que representa a taxa de perda de peso ¹³. Novamente, pirolisaram-se várias amostras cilíndricas, com diâmetro de 2 cm e massa entre 1 e 20 g, retiradas de uma mesma peça de *Eucalyptus Delegatensis* com teor de umidade de 10,6%.

Para cada pico, as temperaturas iniciais e finais correspondentes foram determinadas, bem como a mudança no peso da amostra do começo ao fim do pico. O primeiro pico tem uma perda de peso correspondente de 9 a 12%, que ocorre numa faixa de temperatura de 50 a 220 °C, e está relacionado à perda da umidade. O segundo pico tem uma perda de peso entre 17 e 20%, e inicia-se entre 190 e 230 °C, terminando entre 280 e 310 °C. Comparando-se essas temperaturas

com outros estudos sobre decomposição da hemicelulose, concluímos que este pico corresponde à decomposição da hemicelulose. O terceiro pico representa uma perda de peso entre 26 e 38%, começa entre 280 e 310 °C, e termina entre 310 e 360 °C, variação esta devida ao tamanho da amostra e a temperatura do gás que foi injetado na estufa (nitrogênio).

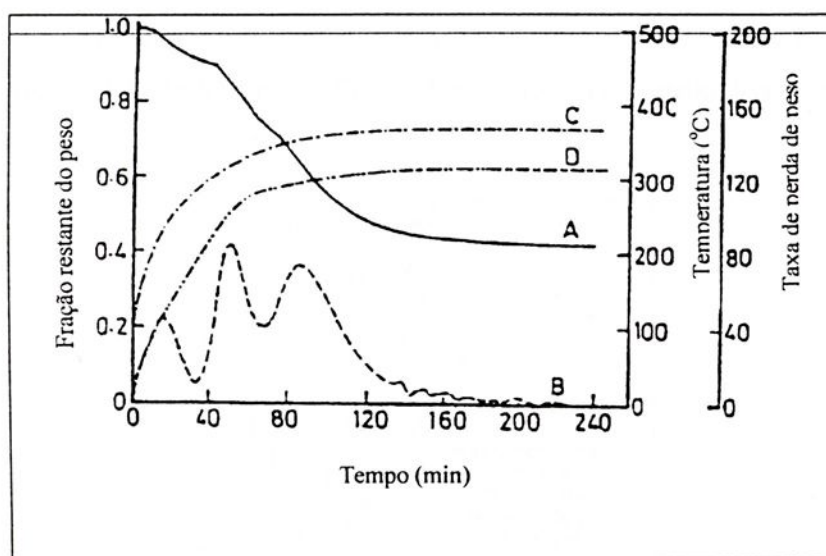


Figura 1.5 – Variação com o tempo do peso da amostra (A), taxa de perda de peso (B), temperatura do gás (C) e temperatura média da amostra (D) ⁹.

Por isso, o comportamento da madeira submetida a aquecimento reflete o de seus constituintes: uma perda de peso significativa inicia-se a 220 °C e a pirólise virtualmente completa-se a 360 °C. Nesta temperatura, a biomassa está reduzida a 27% de seu peso original, transformando-se em carvão, e a 400 °C, a 23%. Isto pode ser alterado, dependendo das condições durante a combustão, tais como temperatura, taxa de aquecimento, tamanho e forma da amostra e forma de aquecimento. Por exemplo, pirólise a baixa temperatura (< 600 °C) com taxa de

aquecimento baixa, favorece a produção de carvão, enquanto que altas temperaturas (700 a 1000 °C) e altas taxas de aquecimento fazem surgir maiores proporções de produtos gasosos.

Akita ⁴ trata a pirólise da madeira aplicando equações de primeira ordem para a pirólise de cada um dos três componentes principais e somando os resultados. Ele encontrou valores bem parecidos para o peso de uma amostra de cipreste japonês queimada a 320 °C e os valores preditos pelos meios acima, assumindo uma composição para o cipreste de 50% de celulose, 30% de hemicelulose e 20% de lignina. A Figura 1.6 apresenta os resultados de Akita.

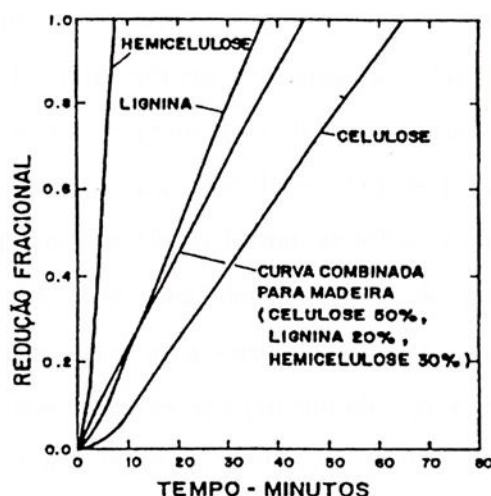


Figura 1.6 – Curvas para os três componentes principais da madeira ⁴.

A temperatura de pirólise das camadas mais interiores é função da profundidade abaixo da superfície aquecida, em virtude das mudanças havidas na estrutura do sólido, devido à incubação das diferentes camadas a diferentes temperaturas e períodos de tempo. Este aquecimento prolongado faz surgir alguns efeitos catalíticos na pirólise destas camadas. Desde que as camadas que estão mais próximas do centro do sólido são cozidas por períodos maiores que as da

superfície a uma dada temperatura, estas estão mais sujeitas a efeitos catalíticos que aí surgem, e a energia de ativação para a pirólise das camadas interiores é menor que para as camadas externas⁴. As taxas de pirólise de celulose e hemicelulose são muito influenciadas por estes efeitos catalíticos. Para experimentos com mesmos materiais e com as mesmas condições de contorno, observou-se valores para a energia de ativação para a celulose variando entre 56 e 30 kcal/mol, dependendo da sua localização.

Um outro aspecto bastante importante a ser considerado durante um incêndio ou queimada é que se pode dizer que existe uma forma diferente de combustão para os vários constituintes da biomassa, do ponto de vista de galhos, folhas e troncos. Em peças grandes de madeira, o comportamento é alterado em função dos aspectos de transferência de massa e calor. Estes fatores incluem encolhimento, a existência de gradientes de temperatura dentro da madeira e outras propriedades não isotrópicas que dependem de temperaturas que não são observadas em peças pequenas. Dessa forma, as folhas e os galhos mais finos são rapidamente consumidos, com uma alta eficiência de queima, e os troncos e galhos maiores demoram mais para serem consumidos. Poderíamos considerar que as folhas e os galhos menores são consumidos num processo monofásico e que servem como a principal fonte de calor para o aquecimento e início da pirólise dos troncos e galhos maiores, ou seja, existe uma hierarquia na ordem de queima, que leva em conta o tamanho e as dimensões do material de mesma espécie que será consumido.

1.5 - A Energia de Ativação e o Fator de Frequência

Esquemas complexos para as reações de pirólise já foram propostos, considerando-se decomposições secundárias de alcatrão em carvão e gases. Entretanto, dificuldades práticas para se acompanhar o andamento de reações secundárias fazem com que se adotem expressões de primeira ordem de



Arrhenius, baseadas em mudança com o tempo do peso da amostra ou de sua densidade. Essas expressões têm a forma ³:

$$-\frac{dW}{dt} = A(W - W_f) \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1.3)$$

onde W é a massa instantânea da amostra, W_f sua massa final, E a energia de ativação, A o fator de frequência e T a temperatura.

Expressões desta forma assumem que as reações ocorrem a uma taxa uniforme e que a temperatura é uniforme através da amostra. Este modelo é válido para partículas finas (folhas e galhos finos), mas inaplicável para amostras grandes, onde a taxa de decomposição é função da posição da partícula na amostra. Por exemplo, Kanury e Blackshear (citado em ⁴) observaram que a energia de ativação, E , no interior de uma amostra de celulose é 60% do valor medido para sua superfície (92 kJ/mol). Roberts e Clough ⁸ obtiveram valores de E de 104,6 kJ/mol em experimentos a baixa temperatura e 62,8 kJ/mol a alta temperatura.

Essas variações de E não estão considerando a estrutura física da madeira, já que daí depende sua permeabilidade e conseqüente difusão de voláteis e oxigênio entre o seu interior e exterior. Akita ⁴ realizou experimentos de queima de madeira a pressões variando de 0,27 a 1 atm, observando taxas de reação maiores, com variação de 2,3:1.

Wright e Hayward (citados em ⁴) estudaram a taxa de decomposição de amostras de madeira, na forma de cubos e discos, em atmosferas aquecidas de nitrogênio. Para cubos, perceberam que a taxa é diretamente proporcional à área específica e à temperatura do forno. Para os discos cortados paralelos às fibras da madeira, a taxa de reação foi o dobro da observada para os que foram cortados transversalmente as fibras. A conclusão foi de que a taxa de

decomposição é controlada não pela estrutura química da madeira, mas pela taxa pela qual o calor é conduzido da zona em reação para a madeira intocada.

Com respeito ao fator de frequência, A , os valores relatados são muito disparatados. Estes esquemas não podem levar em consideração as várias reações que ocorrem simultaneamente, com intervalos de duração diferentes. Além disso, a perda de peso não é o único indicativo do avanço das reações de pirólise.

Na Tabela 1.1 são apresentados alguns valores para a energia de ativação (E) e fator de frequência (A). Conforme já foi dito anteriormente, os valores de A e E variam muito em virtude do método utilizado, faixa de temperatura, material e outros.

Baseado no que foi aqui apresentado, podemos afirmar:

- Os valores publicados para A e E variam muito, refletindo sua dependência nas condições ambientais, que influenciam bastante as reações complexas da decomposição térmica de madeira.
- A e E obtidos em estufas, onde radiação é o principal meio de transmissão de calor, são inaplicáveis em situações onde o principal mecanismo de transmissão é a convecção, como em pirólise e unidades de gaseificação.
- O processo geral de decomposição de madeira não pode ser representado adequadamente por uma equação de primeira ordem, como a de Arrhenius. As reações ocorrem em estágios, envolvendo perda de umidade seguida da decomposição sequencial de hemicelulose, celulose e lignina, com taxas diferentes para cada substância.

- O tamanho da amostra exerce uma influência enorme na cinética da decomposição da madeira. Ainda não existem trabalhos conhecidos que relacionem tamanho e forma com parâmetros cinéticos, mas só mostrando que as diferenças existem.

Tabela 1.1 – Valores de E e A (experimentais) ³.

Autor / Ano	Método	Temperatura (°C)	Energia de ativação (kJ/mol)	Fator de frequência (s ⁻¹)
Bamford e outros/1946	TGA em ar	297 - 447	138,7	$5,30 \times 10^9$
Stamm/1956	Estufa(TGA estático em ar)	93,5 - 250	123,4	$5,15 \times 10^{11}$
Browne e Tang/1962	TGA estático em N ₂	220 - 400	149,8	-
Tang e Eickner/1967	TGA dinâmico	280 - 325	96,2	$3,30 \times 10^5$
		325 - 350	225,9	$6,53 \times 10^{16}$
Roberts e Clough/1963	TGA dinâmico em N ₂	275 - 300	104,6	$4,33 \times 10^7$
		305 - 435	62,8	$1,52 \times 10^3$
Kanury e Blackshear/1966,67,72	Radiografia, combustão ao ar	até 900	54,4 - 92	$10^4 - 10^7$
MAA/1971	TGA em N ₂ , CO e ar	400 - 1200	31,4	0,1 cm/s
Nolan/1973	Gamagrafia em ar	fluxo de calor 0,5 a 4 cal/s.cm	125,5	$1,0 \times 10^8$

TGA : Balança termogravimétrica.

Em experimentos realizados em estufas, com temperaturas constantes, observa-se que a temperatura medida no centro de troncos alcança valores maiores que a temperatura da estufa, indicando uma geração de calor significativa fora da zona onde há combustão ^{3,10}. Isto também foi observado em experimentos realizados em atmosferas inertes, sem combustão e pode ser observado na Figura 1.7.

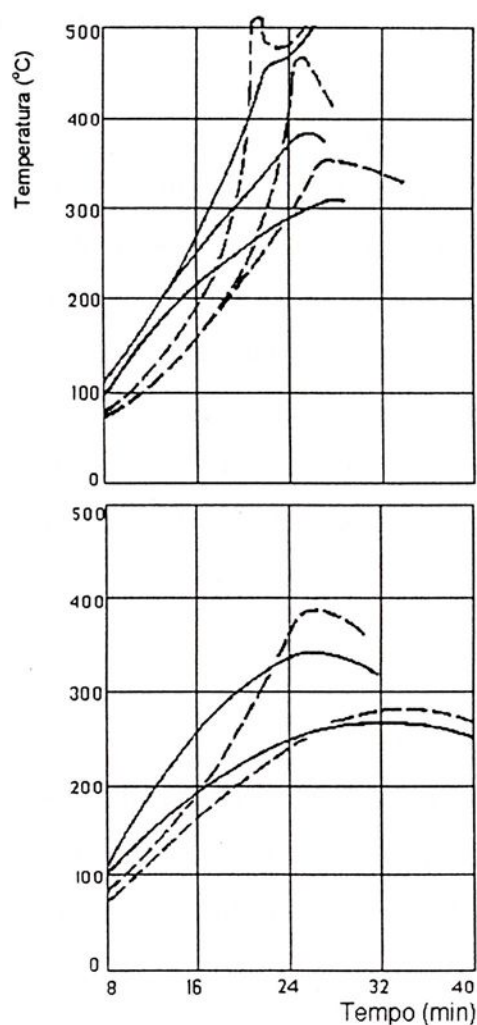


Figura 1.7 – Temperatura no interior (----) e na superfície (—) do tronco durante aquecimento em atmosfera inerte ¹⁰.

1.6 – Combustão sem Chama (“Smoldering”)

Um dos processos pouco compreendidos na combustão de biomassa é a combustão sem chama (“smoldering”). Neste trabalho utilizaremos o termo incandescência para traduzir “smoldering”. Várias combinações de fatores físicos e químicos determinam se um material pode auto sustentar o processo de incandescência^{11,12,13,14}, o que pode ocorrer somente se o combustível for poroso. Uma vez iniciado, o mecanismo para propagação da frente de combustão depende do calor gerado pela reação de oxidação do combustível. A importância do transporte de oxigênio para a frente de reação e da cinética de reação fica evidente.

Materiais que podem auto sustentar o processo de incandescência possuem uma elevada relação área/volume, o que é necessário para fornecer sítios ativos para o ataque do oxigênio. Combustíveis que são porosos ou compostos de agregados de partículas manifestam tal característica.

A velocidade de propagação, V , de uma camada em incandescência pode ser estimada, como resultado da conservação de energia, como^{11,12}

$$V = \frac{Q}{\rho_F \Delta h}, \quad (1.4)$$

onde Q é o fluxo de calor na direção de propagação, ρ_F é a massa específica do combustível e Δh é a entalpia requerida para elevar a temperatura da ambiente até a de incandescência. Em materiais celulósicos, valores de V são da ordem de $0,4 \text{ m h}^{-1}$.

Assumindo que a difusão de oxigênio e a liberação de energia das reações oxidativas são os fatores controladores da propagação da frente de



combustão, o fluxo difusivo de oxigênio (N_O) para a superfície da frente pode ser aproximada por ¹¹

$$N_O \sim D_O \left(\frac{\Delta \rho_O}{L} \right) \sim D_O \left(\frac{\rho_{O\infty}}{L} \right), \quad (1.5)$$

onde D_O é a difusividade do oxigênio ($m^2 s^{-1}$), $\Delta \rho_O = \rho_{O\infty} - \rho_{Os}$ é a diferença de concentração ($kg m^{-3}$) entre o oxigênio ambiente e o oxigênio na superfície da frente de combustão (esta última assumida como desprezível devido à rapidez das reações oxidativas) e L (m), que depende do tamanho e da geometria do combustível, é um comprimento característico para a difusão de oxigênio. Assim, Q pode ser expresso por

$$Q = \left(\frac{Q_c \rho_{O\infty} D_O}{L} \right) - Q_{loss}, \quad (1.6)$$

onde Q_c ($kJ kg^{-1}$) é o calor liberado pelo processo por unidade de massa de oxigênio consumido e Q_{loss} é o fluxo de calor perdido por radiação e condução. Se Q_{loss} for elevado, então o processo não pode se auto sustentar. Se Q_{loss} for baixo, então a velocidade de propagação é

$$V \sim \left(\frac{Q_c \rho_{O\infty} D_O}{L \rho_F \Delta h} \right). \quad (1.7)$$

Assim, a velocidade de propagação da frente de incandescência depende de vários parâmetros. Contudo, há muito pouca informação na literatura com relação às condições para iniciação e manutenção do processo.

1.7 – Objetivos do Trabalho

Os objetivos desta dissertação são:

- Estudar a influência do vento em microqueimadas. Para este experimento foi montado no INPE, Cachoeira Paulista, SP, um dispositivo composto por um túnel de vento com controle de velocidade e vazão mássica de ar, e uma balança montada em células de carga para fornecer a massa de biomassa em combustão, em tempo real.
- Estudar as características da combustão de biomassa em queimada real. Este experimento foi realizado na Amazônia, no município de Alta Floresta, MT, durante a estação das secas, quando são realizadas as queimadas normalmente naquela região. A região de Alta Floresta foi escolhida por encontrar-se na fronteira do desmatamento na região Amazônica. Testes anteriores em outros locais na região Amazônica, buscando parâmetros de eficiência de queima, foram realizados ^{15,16,17,18}. O objetivo principal do teste da presente dissertação foi investigar a dependência do tamanho (comprimento e diâmetro) de troncos na eficiência de queima.
- Construir e tornar operacional um túnel de vento, com uma balança que forneça a massa em tempo real do material que está sendo ensaiado, em microqueimadas. Isso inclui o projeto, fabricação e montagem do equipamento, levantamento e regularização do escoamento do ar na saída do túnel de vento, calibração e aferição da balança com as células de carga e instalação do equipamento para coleta dos dados durante os ensaios.



CAPÍTULO 2

EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS DE TESTES EM LABORATÓRIO

2.1 – Descrição do Equipamento

Os experimentos em laboratório foram desenvolvidos para verificação da influência do vento na taxa de combustão em microqueimadas. O equipamento de ensaio é constituído por um túnel de vento e uma balança, projetados e construídos no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista. O prato da balança é mostrado esquematicamente na Figura 2.1.

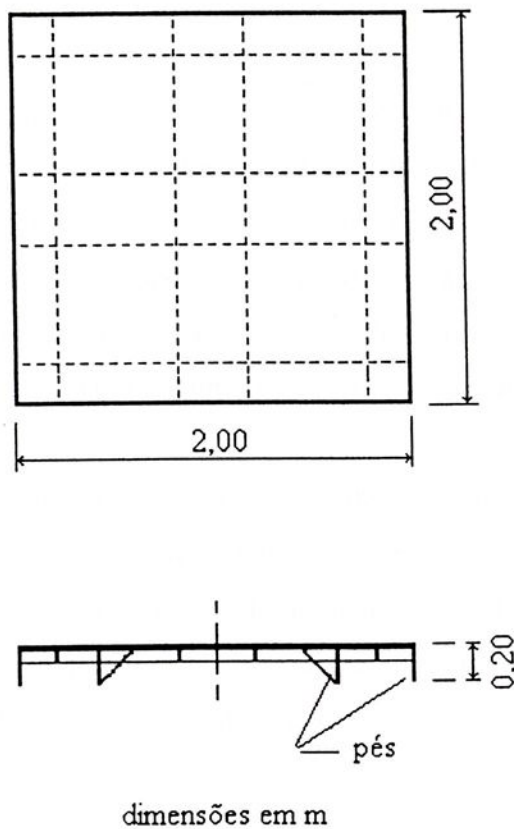


Figura 2.1 – Esquema do prato da balança.

Conforme mostrado na figura, o prato metálico de 2mx2m é apoiado em quatro células de carga que medem a massa instantânea da biomassa durante a combustão, em diversas configurações de massa, natureza, velocidade do vento ou outro parâmetro que se queira variar. Essas células de carga, da marca Cratos, têm capacidade individual de 100 kg e suportam uma temperatura de no máximo 60 °C. Os dados provenientes das células de carga são armazenados em um coletor de dados modelo 21 XL, fabricado pela Campbell Scientific, com resolução de 0,33 microvolt.

2.2 – Preparação da Balança

Os dados coletados das células de carga foram analisados após o fim do ensaio, sendo medidos dados a cada segundo, com armazenamento a cada minuto dos valores médios lidos.

As amostras queimadas constituíram-se de biomassa em proporções de troncos, galhos, folhas e liteira da ordem das proporções encontradas na floresta. A espécie analisada neste trabalho foi o bico de pato ("Machaerium Angustifolium"), espécie comum da Mata Atlântica. O teste de queima foi realizado após o abate e o período de secagem natural da vegetação. A secagem natural procedeu-se sem nenhum tipo de proteção ou aparato.

Para os ensaios, as amostras de biomassa foram levadas rapidamente do local de secagem para a balança, de maneira que o seu estado não sofresse alterações, como perda ou ganho de umidade ou pó durante o trajeto. As proporções de troncos, galhos, folhas e liteira foram mantidas como as originalmente encontradas no campo de abate e secagem.

A iniciação da combustão foi realizada com álcool etílico, derramado no perímetro da amostra sobre o prato da balança, na proporção de 5 g de álcool por kg de material em ensaio.



O túnel de vento foi montado na área de ensaios do LCP, obedecendo a todos os procedimentos e normas de segurança adequados para o pessoal envolvido e para o próprio equipamento. O duto que conduz o ar insuflado para a seção de ensaios do túnel de vento estava apoiado entre o ventilador e expensor do túnel, tendo sido cuidadosamente inspecionado à procura de vazamentos ou outros problemas. As conexões da tubulação foram montadas conforme normas gerais. O posicionamento final dos diversos componentes da tubulação foi tal que não permitisse a existência de tensões na tubulação.

Alguns cuidados foram tomados na montagem da balança:

- A fiação das células de carga foi apropriadamente disposta, afastada de locais sujeitos a altas temperaturas e não comprimida por qualquer parte da balança. A fiação seguiu o mais diretamente possível até o equipamento de coleta de dados.
- Os quatro pés da balança tiveram seus comprimentos regulados de modo a ficarem perfeitamente assentados sobre cada uma das células de carga.

2.3 - Levantamento do Perfil de Velocidades do Vento na Saída do Túnel

Entre a extremidade do duto e a seção de ensaios, foi colocado um expensor, de maneira que o vento gerado cobrisse toda a largura de 2m do prato da balança. Nesta operação, o escoamento ficou sem controle algum, não havendo uma homogeneidade de velocidades na saída do expensor. Além disso, a saída do expensor, que possui uma altura muito maior que a necessária para o ensaio (em torno de 1,20m) fazia com que a velocidade do vento fosse muito reduzida.

Assim fez-se necessária uma regularização da vazão de ar na saída do túnel, visando-se um perfil de velocidades na direção do escoamento o mais



plano possível, com valores que possibilitassem a realização dos ensaios. Isso foi feito da seguinte forma:

- A seção de saída do expensor foi reduzida em sua altura por uma placa, ficando com 0,20m.
- Foram instalados dispositivos, nos dois lados da seção de saída, que permitiam a regulação de sua largura, que possibilitaram uma concentração do escoamento em uma seção menor, para obter uma velocidade mais alta, se necessário.
- Foram instalados, empiricamente, defletores no interior do expensor, procurando-se espalhar o escoamento, e estabelecer-se um perfil de velocidades constante.
- Foi instalada, no interior do expensor, uma tela metálica em toda sua seção. Esta tela reduzia a pressão dinâmica do escoamento, e distribuía mais o ar insuflado.

O perfil de velocidades obtido encontra-se mostrado na Figura 2.2.

2.4 - Levantamento da Curva de Calibração da Balança com as Células de Carga

As células de carga, interligadas, fornecem uma leitura que deve ser interpretada pelo coletor de dados, seja ele qual for. A leitura feita pelo coletor, em milivolts, é transformada em kg através de uma curva de calibração, que deve ser levantada. Para o levantamento da curva de calibração do conjunto das células de carga com o coletor de dados, procedeu-se da seguinte forma:

-



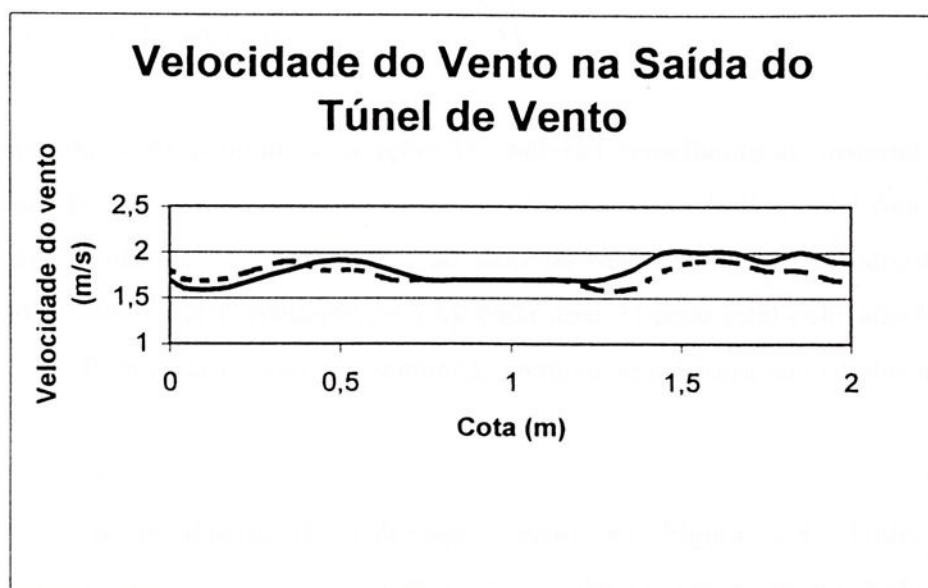


Figura 2.2 – Perfis de velocidade do ar para a seção média (—) e a seção superior da fresta (---). A cota refere-se à distância medida a partir de um dos lados da fresta de saída do túnel de vento.

- No laboratório de eletrônica, aplicaram-se cargas de massas conhecidas em cada célula de carga, repetidas vezes, para verificar-se a repetibilidade de leituras (precisão). Isto foi feito em cada célula, individualmente, e no conjunto das quatro células interligadas, com resultados plenamente satisfatórios. As células não só repetiram individualmente as leituras, como forneceram as mesmas leituras separadamente, para cada carga.

Em seguida, as quatro células foram montadas na balança no túnel de vento, para o levantamento da curva de calibração propriamente dita. Para isso, procedeu-se da seguinte forma:

- Fez-se a leitura inicial do coletor com o prato da balança apenas (leitura da massa do prato da balança).
- Em seguida, acrescentaram-se porções de material semelhante ao material a ser ensaiado, em quantidades conhecidas, medidas em uma balança eletrônica, com capacidade até 10 kg, montada ao lado do túnel de vento. As porções colocadas tinham aproximadamente 5 kg cada uma. O peso total colocado foi de 111 kg. Para cada porção acrescentada, anotava-se a leitura das células de carga.

Os resultados da calibração estão na Figura 2.3. Pode-se perfeitamente observar que o comportamento das células foi linear, durante todo o intervalo do ensaio. A aproximação da leitura realizada pela carga aplicada pode ser considerada uma reta, sem que isso leve a qualquer grande erro.

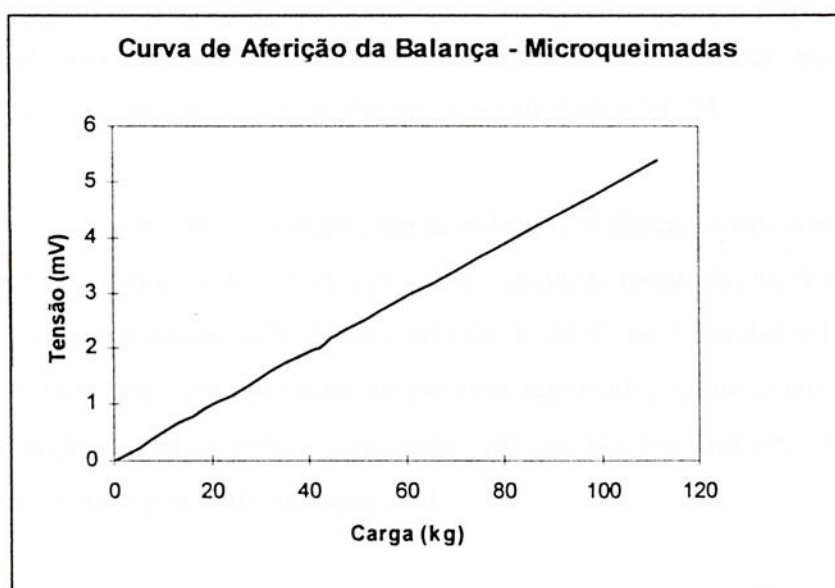


Figura 2.3 – Curva de calibração da balança no conjunto em condições de trabalho.

Da planilha adquirida durante a realização do levantamento da curva, obteve-se o fator de conversão (kg/milivolt) da curva da Figura 2.3. Este valor é de 20,5926 kg/mV.

2.5 - Determinação da Temperatura nas Células de Carga durante a Microqueimada.

A temperatura máxima de trabalho das células de carga é de 60 °C, conforme mencionado anteriormente. Para termos certeza de que este valor não seria ultrapassado durante os ensaios, foi realizada uma verificação da temperatura alcançada nas células de carga durante uma microqueimada, como se segue:

- Foram fabricadas quatro peças com as mesmas dimensões externas e mesmo material das células, isto é, quatro células de carga falsas.
- Estas células falsas foram montadas no lugar das reais, na balança, acopladas a termopares, conectados ao aparelho de coleta de dados XL 21.

Fez-se uma microqueimada sobre a balança, monitorando-se a temperatura em cada uma das células de carga simuladas montadas na balança, em tempo real. A temperatura mais alta anotada foi de 52°C, em uma das células. Em virtude do valor estar muito próximo do máximo suportado, optou-se por fabricar-se uma proteção isolante (amianto) em cada uma das células verdadeiras, para os ensaios reais, como mostrado na Figura 2.4.

Na figura, é possível ver-se o termopar instalado na célula falsa e a microqueimada iniciando-se sobre o prato da balança.

Após a instalação da proteção com amianto, a temperatura máxima alcançada nas células foi de 48°C.

355



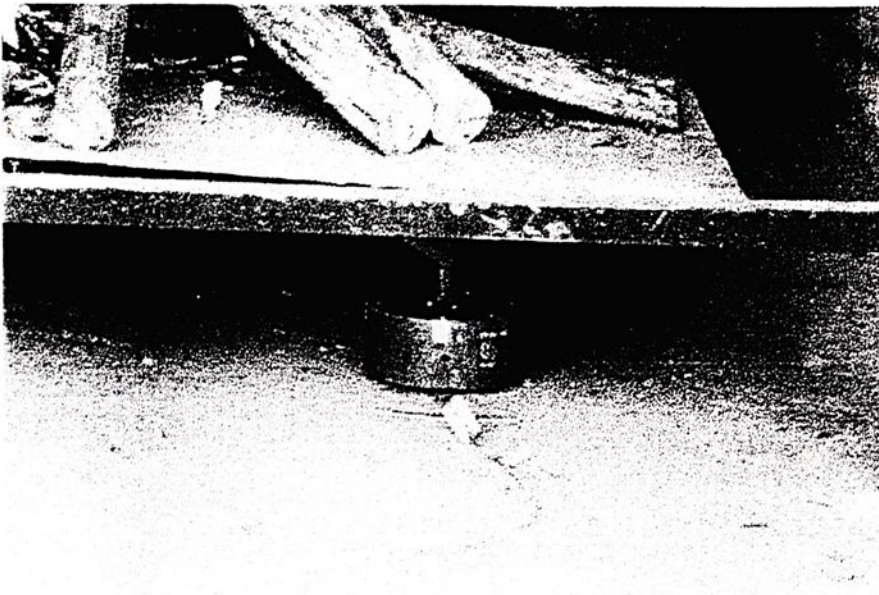


Figura 2.4 – Aspecto da célula de carga simulada com a proteção de amianto já apropriadamente montada em sua volta.

2.6 - Preparação das Amostras

Para os ensaios, as amostras de biomassa foram colhidas e postas para secagem, conforme abaixo:

- Para cada ensaio completo, todas as amostras devem ter a mesma origem, pois não se pode comparar a variação da velocidade de propagação de chama ou taxa de queima com vento entre materiais diferentes. Então, para cada ensaio completo deve-se ter em mãos, no início do ensaio, todo o material necessário para se compor todas as amostras a serem ensaiadas.
- Todas as amostras devem ser postas para secagem natural pelo mesmo período de tempo e no mesmo local de abate antes de serem submetidas ao ensaio.

- As amostras devem ser formadas com a mesma proporção mássica de liteira, tronco, galhos e folhas que a encontrada no local de sua coleta.
- Cada amostra a ser submetida ao ensaio deverá ser transportada diretamente do local de abate e secagem para o equipamento de ensaio. Isto evitará qualquer tipo de secagem diferente da natural, devido a alterações na disposição do material abatido quando de uma estocagem intermediária.

2.7 - Realização das Microqueimadas

Depois de completadas as etapas acima de preparação, foi iniciado o experimento de microqueimadas. O objetivo, conforme já dito anteriormente, é comparar-se a taxa de queima de biomassa com e sem a presença de vento. Para poder-se comparar os efeitos da presença ou não de vento em uma queimada, é importante que todas as outras variáveis envolvidas no processo de queima sejam idênticas nos experimentos realizados (espécie de árvore, umidade, dimensões, disposição, condições ambientais, etc). Escolheram-se tres condições de ensaio: sem vento e com ventos de 2 e 5 m/s. A velocidade de 2 m/s foi escolhida da referência ¹⁹.

2.8 - Escolha das Amostras

Para se garantir a homogeneidade da espécie de madeira nos experimentos as serem realizados, optou-se por abater-se uma única árvore, que forneceria todo o material a ser ensaiado. A árvore escolhida foi um “*Machaerium Angustifolium*”, popularmente conhecido como bico-de-pato. À época do abate, o teor de umidade, determinado em estufa (7dias a 105 °C) era de 52 a 56%, dependendo da região da árvore considerada (mais úmida em troncos com diâmetro maior).



O espécime foi derrubado no começo de março de 1997, e teve o tronco e os galhos cortados em pedaços de 1m de comprimento. Foi imediatamente transportado para a área de ensaios do LCP, onde ficou até novembro do mesmo ano, ao relento, para secagem.

2.9 – Procedimento do Ensaio

Para os dois ensaios realizados, o procedimento adotado, levando-se em conta tudo o que foi dito anteriormente, foi o mesmo. Este procedimento está descrito abaixo.

- Fez-se a ligação das células de carga ao aparelho coletor de dados.
- Fez-se a ligação de outros equipamentos desejados no coletor de dado. No nosso caso, usamos mais dois termopares, para se fazer medições de temperatura nas células de carga, nos produtos de combustão, no prato da balança e do ar ambiente.
- Fez-se a programação do coletor de dados, para leitura a cada segundo e registro da média a cada minuto transcorrido.
- Fez-se, com o anemômetro portátil, a aferição da velocidade do vento na saída do túnel.
- Desligou-se o insuflador.
- Colocou-se o material para ensaio sobre o prato da balança, iniciando-se a colocação pelos menores (galhos finos), em seguida, pela ordem de tamanho, os maiores. O material de ensaio no prato foi amontoado no meio do prato. Anotou-se a leitura inicial da massa medida.



- Derramou-se, em linha reta, na face do prato apontada para o túnel de vento, 5 gramas de álcool comercial por quilograma de biomassa.
- Acendeu-se o álcool.
- Ligou-se o insuflador de ar tão logo se teve certeza de que o material de ensaio está em chamas.
- Anotou-se a hora de início do ensaio.
- A partir daí, fez-se uma observação do comportamento do material e do equipamento, sem no entanto, interferir com o andamento da micro queimada. O tratamento dos dados foi realizado imediatamente após o fim da combustão.



CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTOS PARA O ENSAIO DE CAMPO

3.1 - O Local do Ensaio

O experimento aqui descrito teve como objetivo a verificação da influência das dimensões do tronco na eficiência de queima. Troncos de diâmetros diversos foram cortados em comprimentos variados escolhidos e conservados no mesmo lugar originalmente ocupado. Após a queimada, faz-se uma observação comparativa da eficiência de queima entre os diversos espécimes preparados.

O local escolhido para este ensaio consistiu de uma área de 100 m por 100 m (1 ha), afastada aproximadamente 300 m da borda da mata com um pasto, na Fazenda Caiabi, município de Alta Floresta, estado do Mato Grosso. O intuito era simular uma queimada feita no interior da floresta tropical.

O acesso até o local era feito através de uma picada, aberta com essa finalidade. No trajeto de aproximadamente 15 minutos para se chegar até a área, através da mata, podia-se observar e ter contato, às vezes até perigoso, com a fauna e a flora amazônicas.

A locomoção dentro da área abatida era bastante prejudicada pela disposição das árvores derrubadas. Uma árvore em pé tem a copa afastada do solo, no alto, e o tronco na posição vertical. Uma vez abatido, seu tronco fica na horizontal, nem sempre próximo ao chão, e a copa se transforma em um obstáculo de difícil transposição, com muitas folhas e galhos secos, além de espinhos, muitas vezes.

A área do ensaio era plana, com densidade florística típica da região. Após o abate e o período de secagem natural transcorrido, podia-se notar



que o material situado nas bordas estava bem mais úmido que o do centro do sítio. Isto é explicado por, basicamente, duas causas: a) o material da borda estava mais próximo da floresta fresca, que é bem mais úmida e transfere um pouco desta umidade para o material do ensaio e b) o material da borda estava menos sujeito à ação dos ventos, devido à proteção da floresta em pé.

Na área abatida e seca não transitam animais maiores, pois árvores abatidas e naturalmente secas formam um sistema diferente do existente. Qualquer animal adaptado a um dos sistemas não sobrevive no outro. Animais que vivem sob o solo, como alguns tipos de aranhas e insetos em geral, lá continuaram.

3.2 - Preparação do Local de Ensaio

Uma vez escolhida a área do ensaio, foi feito um levantamento de sua população florística, durante o abate. O abate foi realizado no final de maio de 1997.

De alguns espécimes escolhidos após o abate, foram retiradas amostras para determinação de teores de umidade do material fresco. Estas amostras foram retiradas perto da base, no meio do tronco e perto da copa, e serviram para se saber quanto da umidade natural se perde durante um processo de secagem natural, que é um dos fatores que diferenciam queimadas de incêndios, como explicado anteriormente. A secagem natural foi realizada em um secador de cacau disponível na fazenda. A fotografia da Figura 3.1 apresenta a disposição das amostras no secador.

Cada árvore da qual foi retirada amostra foi marcada com uma plaqueta metálica numerada. Essas amostras foram pesadas e guardadas. A Tabela 3.1 apresenta alguns resultados de umidade. As espécies são identificadas aqui pelo seu nome popular. O valor aqui apresentado não é a umidade total do



material, apesar de ser um valor bem próximo. A umidade total é determinada em estufa.



Figura 3.1 – Disposição das amostras de biomassa em secador de cacau.

3.3 - Preparação para a Queimada

Após decorrido o período de secagem, foram iniciados os preparativos para a queima.

Escolheu-se um eixo transversal ao sítio, que o cruzava de um lado ao outro, dividindo-o em dois retângulos aproximadamente iguais. Neste eixo foram colocados mastros feitos de vergalhão de construção, a cada 10 m. Cada vergalhão foi identificado com um plaqueta metálica, onde estava escrita sua cota a partir do lado da área de ensaio, e marcado em sua extremidade superior com um pedaço de plástico branco, de maneira a ser bem visível à distância. Esta linha de bandeirinhas serviria como referência para a situação e posterior localização dos itens escolhidos para o ensaio após a queimada.

Tabela 3.1 – Umidade, em termos de massa de água por massa total de material fresco, de algumas espécies encontradas na área de teste.

<u>Nome popular</u>	<u>% umidade</u>	<u>Diâmetro (cm)</u>
Morcegueira	41	32
Guatambu duro	46	28
Guarantã	42	50
Canjarana branca	41	51
Açaí	43	15
Cupuaçu	43	25
Amesca rueira	31	20
Canela	43	49
Bacuri	56	29
Pele de moça	46	40
Ipê roxo	19	41
Morcegueira	47	55
Laranjeira	46	22
Cacueira do mato	45	16
Formigueiro	40	79
Arrudeira	39	23
Mandioqueiro	45	23
Mexiriquinha	51	16
Lelua	41	11
Pinho cuibano	40	49
Canjarana branca	37	50
Calvi	37	24
Açaí	66	18
Sete pernas	36	13
Ingá	42	10
Itaúba	46	18
Pata de vaca	37	15
Pacova	80	10
Ameixa brava	41	32

Iniciou-se, então, a escolha das amostras para o ensaio. A intenção era escolher-se e cortar-se tantas amostras quantas fossem possíveis de cada tronco escolhido, mantendo-as no lugar originalmente ocupado. Além disso, troncos de espécies diferentes deveriam ser escolhidos, localizados em pontos que cobrissem toda a área de 1 ha. As amostras escolhidas foram cortadas com motosserra e catalogadas. A Figura 3.2 mostra a disposição dos troncos escolhidos na área de teste. Cada tronco recebeu uma plaqueta com um número de identificação.

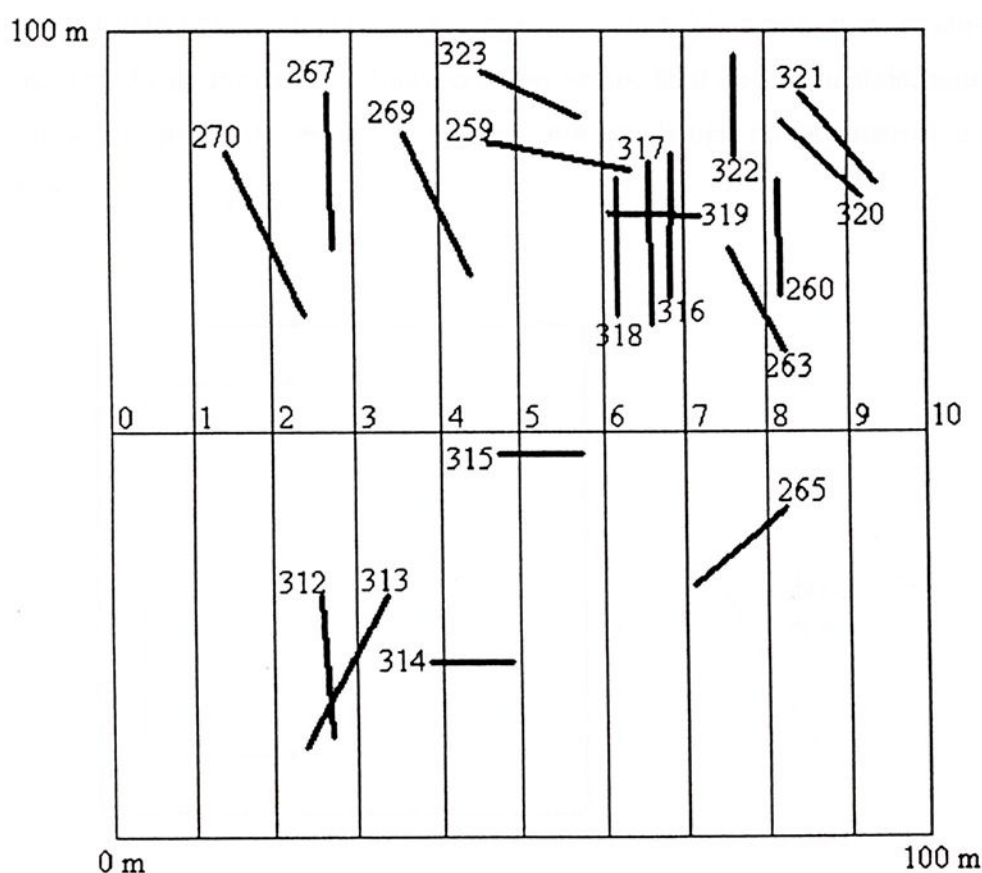


Figura 3.2 – Disposição dos troncos selecionados na área de teste.

Ao redor do sítio todo foi feito um aceiro com 2 m de largura, para que o fogo não passasse para a floresta virgem.

3.4 - Início da Queimada

Após toda a preparação anteriormente relatada, foi realizada a queima, cuja iniciação deu-se conforme o esquema da Figura 3.3.

Se a direção de propagação da frente de chama for contrária à direção do vento, de maneira a aumentar-se o tempo de residência, consegue-se uma maior eficiência de queima. Porém, esta é uma condição difícil de ser mantida, pois o comportamento natural do fogo é ser levado pelo vento. Isso, inclusive é usado com técnica para se apagar incêndios. No nosso caso, optou-se por uma direção de propagação transversal ao vento, fácil de ser mantida, pois o material a ser queimado estava bem seco, em condições de queimar-se com facilidade.

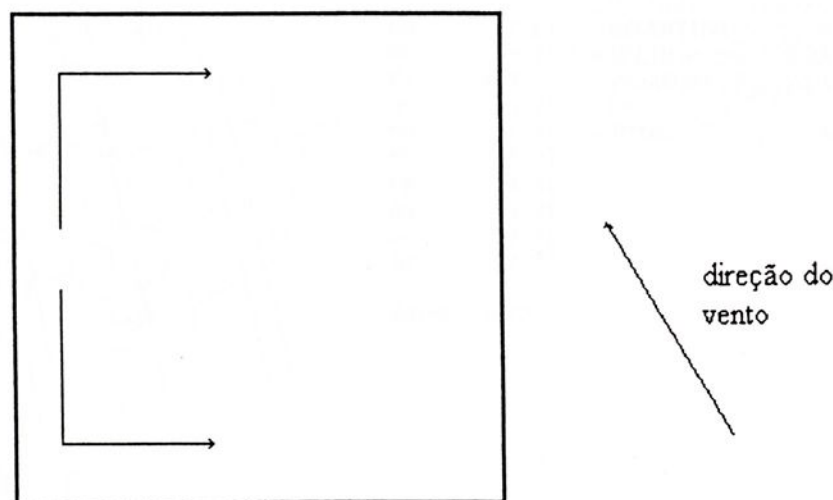


Figura 3.3 – Esquema mostrando o procedimento de iniciação da queimada.

Duas pessoas, cada uma com uma tocha, partiram rapidamente, em direções opostas. É desejável que esta iniciação seja feita o mais rápido, para que

a frente de chama fique o mais reto possível. Se houver uma demora muito grande entre o primeiro e o último ponto iniciado, a frente de chama ficará como um V, com o vértice apontado para a frente.

A hora de início deveria ser em torno de 13hs e 15min. Esta hora foi escolhida pois imaginava-se que em 20 minutos ter-se-ia o fogo bem desenvolvido e o satélite da série NOAA deveria passar sobre o Brasil às 13hs e 32 min. Assim, esperávamos que o ponto de nossa queimada fosse registrado pelo satélite. Isso pode ser verificado no mapa da Figura 3.4, onde são mostrados todos os pontos de fogo no instante da passagem do satélite no dia anterior ao ensaio.

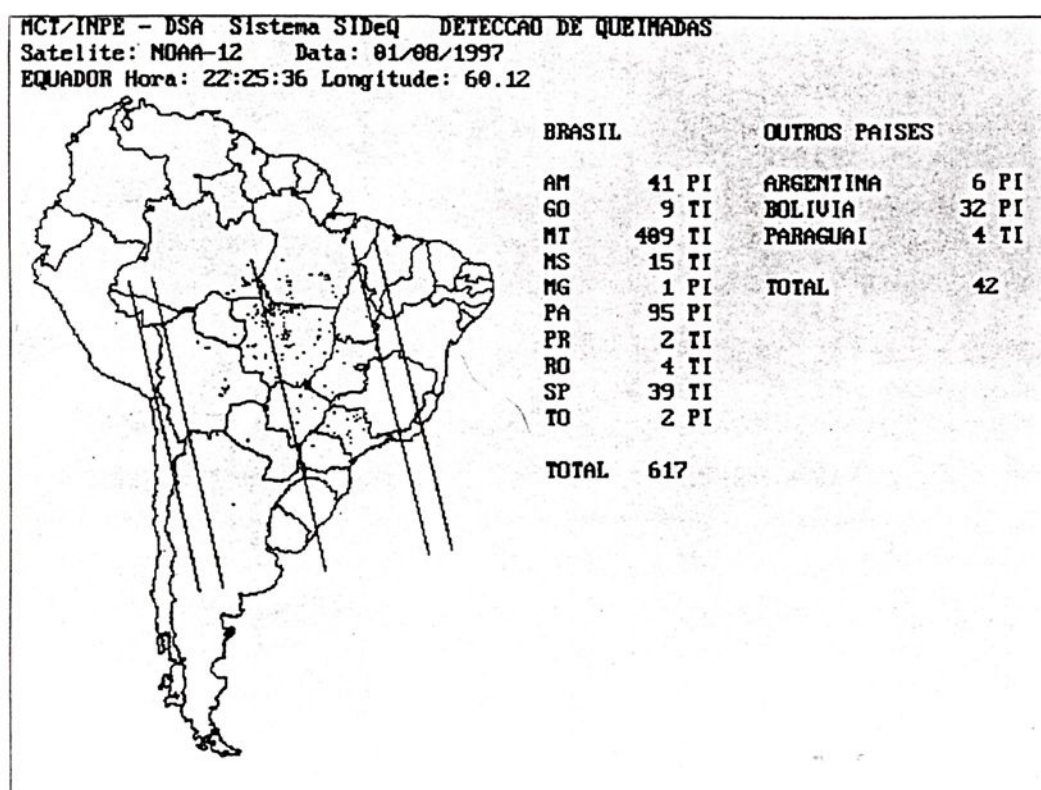


Figura 3.4 – Pontos de fogo no instante da passagem do satélite no dia anterior ao teste.

Na parte superior da figura encontram-se a identificação do satélite NOAA, a data da imagem analisada, e o horário TMG e a longitude de cruzamento do satélite com o Equador. A tabela ao lado do mapa mostra o total de queimadas detectadas em cada um dos estados e países vizinhos que foram abrangidos pela imagem em questão. Os códigos ao lado de cada número significam: TI, área totalmente imageada; PI, área parcialmente imageada. A seta indica o local aproximado do experimento. Pode-se notar que neste ponto, existe uma grande concentração de pontos de queimada.

As condições ambientais, às 13hs do dia 02 de agosto de 1997, no início da queimada, eram as seguintes: temperatura ambiente: 32,3° C (próximo à floresta) e 34,0° C (no meio do sítio); umidade relativa do ar: 40% (próximo à floresta) e 38% (no meio do sítio); vento: entre 0,5 e 1,1 m/s, com direção Nordeste, na superfície.



CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO DO ENSAIO DE LABORATÓRIO

4.1 – Considerações Iniciais

Conforme mencionado no Capítulo 2, foram realizados três experimentos de microqueimadas: sem vento e com vento de 2,2 e 5,0 m/s. Para contornar-se todas as demais variáveis envolvidas, os dois experimentos foram realizados com material colhido da mesma árvore, e posto para secagem no mesmo local, em pedaços com o mesmo comprimento. Na hora do experimento, as amostras foram escolhidas ao acaso, de maneira a se evitar que amostras de uma mesma região da área de secagem ficassem juntas, na mesma fase do experimento. Também, os dois experimentos foram realizados com a mesma massa inicial de material, de troncos, galhos e galhos finos. A disposição no prato foi feita pela mesma pessoa, que procurou manter o acomodamento das camadas de dimensões diferentes da mesma forma.

O modo de iniciação foi o mesmo, com a mesma quantidade de álcool derramada na mesma linha para cada ensaio (paralela à saída do túnel de vento). Desta forma, tentou-se evitar a inclusão de qualquer outra variável diferente para as microqueimadas, de maneira a medir-se apenas a influência do vento, mesmo, na eficiência de queima.

4.2 - Micro Queimada sem Vento

O primeiro ensaio foi sem vento, pois representa o início das futuras comparações e, também por ser o primeiro, parece mais simples de ser realizado, pois depende de uma variável a menos. A quantidade material escolhida para ser colocada no prato era de aproximadamente 90 kg, colocado da maneira descrita



acima, como visto na Figura 4.1. Para iniciar-se, foram usadas 300 g de álcool etílico comercial, derramados paralelamente à saída da boca do túnel de vento. Ligou-se o equipamento de medição e coleta de dados e iniciou-se a queimada.



Figura 4.1 – Aspecto da biomassa colocada sobre o prato da balança, imediatamente antes de se iniciar o ensaio sem vento.

A frente de chama rapidamente espalhou-se pelo material mais fino, colocado por baixo da pilha. Daí, passou para o resto da pilha de material que, também rapidamente, ficou em chamas. Logo, percebemos que as chamas concentravam-se no centro da pilha de material em combustão, de onde saíam as maiores labaredas, e ali ficaram, como visto na Figura 4.2. As chamas propiciavam

a pirólise, que favoreciam o aparecimento de gases, que alimentavam as chamas, num círculo fechado, concentrado na região central do material em ensaio.



Figura 4.2 – Chamas durante o ensaio sem vento. Percebe-se claramente uma concentração das chamas no centro da pilha de material.

Pelas extremidades de alguns dos troncos que estavam fora da região em pirólise, podia-se observar a saída dos gases volatilizados do interior do tronco, devido à maior permeabilidade na direção longitudinal, conforme já foi dito. Isto pode ser observado na Figura 4.3.

Em troncos apoiados em outros, não foi observada nenhuma anomalia, como em cruzamentos observados no ensaio real, conforme será

apresentado no Capítulo 5. Isto é fácil de se entender: no ensaio real, estamos em uma situação limite de flamabilidade, onde uma pequena alteração pode provocar ou interromper um processo de combustão. Aqui, as condições para propagação são muito positivas, muito mais propícias que as ideais, devido à grande concentração de calor e materiais em pirólise. Neste caso, todo o material da região em combustão é transformado, não havendo necessidade de se melhorar nenhuma condição propícia para iniciar a combustão.



Figura 4.3 – A permeabilidade maior na direção longitudinal e o aumento da pressão no interior do tronco provoca o escape de gases formados no interior pela sua extremidade.

Logo, acabou-se a pirólise e entrou-se num processo de incandescência. Já se podia ver que a eficiência de combustão foi maior no centro,

onde só restaram cinzas, que no perímetro. A Figura 4.4 mostra claramente o prato da balança ao final do ensaio.

Apesar disso, percebe-se claramente que a eficiência de queima é bem grande e que a quantidade de material restante no prato da balança é bem localizado nos arredores do centro da microqueimada, deixando bem definida a região de maior eficiência de combustão.



Figura 4.4 – Aspecto do material após o término da combustão. A eficiência de combustão foi bem maior no centro que nas beiradas da pilha de material.

4.3 - Micro Queimadas com Vento

Para os experimentos com vento, procedeu-se exatamente como acima no preparo da amostra, sua colocação no prato da balança e procedimentos para iniciação. Antes, porém, de se colocar a amostra no prato da balança, regulou-se a válvula gaveta para que a velocidade do vento ficasse nos valores desejados (2 e 5 m/s), medida com o anemômetro manual digital. Após a iniciação do fogo, ligou-se o insuflador. A Figura 4.5 mostra a pilha de material pronta, sobre o prato da balança.

O início foi exatamente como da primeira vez: a linha de fogo, agora empurrada pelo vento, passou para o material menor, por baixo. Logo, tomou conta de toda a pilha de material em ensaio.



Figura 4.5 – Material pronto para a microqueimada com vento.

Apesar da relativa pequena fresta para passagem do vento, o que fazia com que o vento atingisse o pé da pilha de material em chamas, percebia-se claramente a pluma toda desviada pela ação do vento. Vê-se isso na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Desvio da pluma para a direita, em virtude da ação do vento provocado.

O comportamento observado na primeira microqueimada, sem vento, foi muito semelhante aos observados agora, com relação a troncos cruzados e avanço da combustão.

Ao fim do período de combustão, quando só havia incandescência de alguns troncos maiores, já percebia-se que existiam diferenças: a eficiência de queima foi bem maior e homogênea, não havendo uma região definida, como no caso anterior, onde se pudesse afirmar que havia ocorrido uma maior ou menor

eficiência de combustão, conforme pode ser observado na Figura 4.7. O que se via era o prato da balança coberto de cinzas.



Figura 4.7 – Aspecto do material após o término da combustão, com vento (2,2 m/s). A eficiência de combustão foi bem maior que no primeiro ensaio.

4.4 – Comparação de Taxas de Combustão sem e com Vento

Na Figura 4.8 temos as curvas levantadas das taxas normalizadas de queima durante os testes, mostrando a redução da massa sobre o prato com o tempo. Os ensaios confirmaram, no resultado final e nas medidas tomadas ao longo de seu andamento, um fato que sabíamos ser verdadeiro: com mais comburente e um pouco de agitação, a porção de gases, produto da pirólise da madeira, que

normalmente se perde na coluna de ar quente sem se queimar, é consumida, e aumenta o calor liberado, favorecendo a pirólise, aumentando-se a eficiência e a velocidade da queima. Sem vento a taxa média de queima foi 0,011 kg/(kg.min), com vento de 2,2 m/s foi 0,015 kg/(kg.min) e com vento de 5,0 m/s foi de 0,014kg/(kg.min).

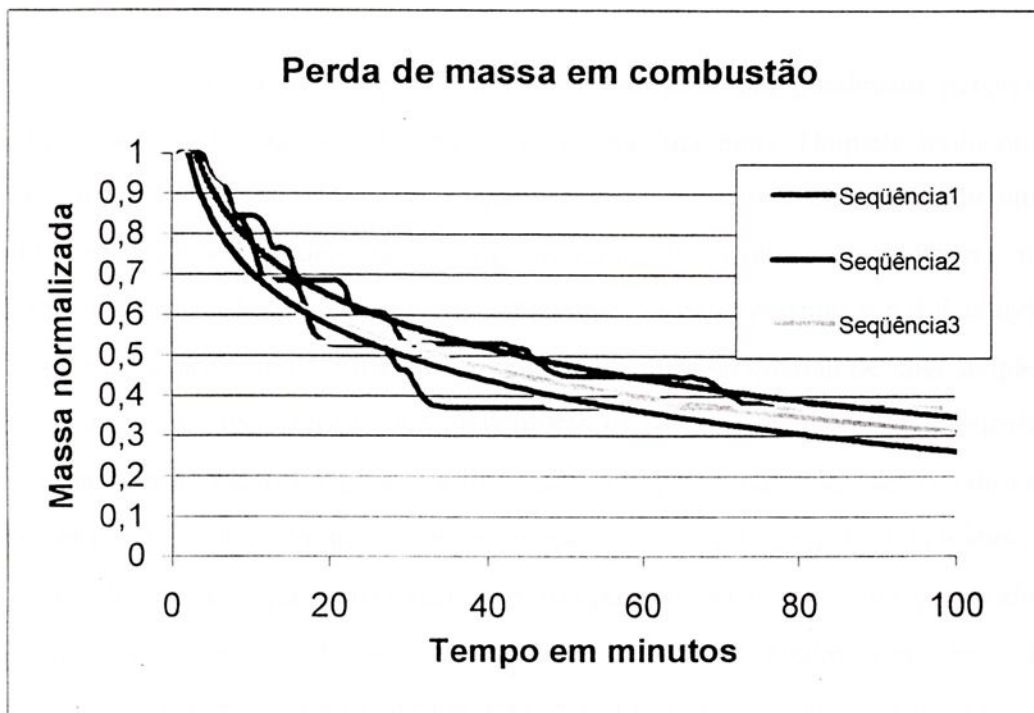


Figura 4.8 – Curvas para as duas microqueimadas realizadas: sem vento (●), com vento de 2,2 m/s (●) e com vento de 5,0m/s ().

Essas curvas assemelham-se a outras encontradas na literatura ²⁰, onde a perda de massa com o tempo é contínua. Isso é explicado: quando se tem vários pedaços de madeira em combustão, não é lógico imaginar-se que todos estejam na mesma fase de seu processo de decomposição. Assim alguns estão perdendo água, outros estão em pirólise, outros em incandescência, por exemplo.

Dessa forma, não se consegue precisar as fases da queima como em um experimento singular, em que existem patamares definidos na combustão da biomassa, conforme visto no Capítulo 1. Não podemos nos esquecer que se trata ali de um experimento feito com um corpo de prova único, que estava passando por cada uma das fases de sua decomposição térmica de cada vez.

4.5 – Comentários Gerais

No Capítulo 1 apresentamos os fenômenos que geralmente ocorrem no processo de degradação térmica de biomassa (madeira). Naquele momento, procurou-se limitar aos fenômenos que ocorrem, principalmente no substrato sólido, em condições idealizadas, sem preocupações maiores com fatores de interação externos. Numa queima real, estes fatores estão presentes e a dificuldade em se tratar o problema é consideravelmente alta, quer na queima de uma simples peça, com geometria definida, ou num conjunto de peças, com geometria aleatória. Uma maior base científica para o estudo de microqueimadas pode ser obtida em referências que tratam da queima de biomassa em pequenos fornos, aí incluídas as lareiras, do que em queimadas reais (no campo), ou incêndios. Nos parágrafos seguintes, procuraremos destacar os principais fatores que alteram a eficiência da queima de uma certa amostra de biomassa seja num processo simples (única peça) ou em um conjunto com arranjo aleatório composto de peças de diferentes tamanhos.

A eficiência da queima, no caso de microqueimadas, está focada na capacidade do material (biomassa) em se converter em gases. Como nos ensaios não se efetua análise dos gases emitidos, a perda de material gasoso combustível para o meio não caracteriza, pois, diminuição na eficiência. É evidente que se todo gás formado no processo de queima do sólido for reduzido na zona de chama, com conseqüente aumento do calor liberado, maior seria a transferência de calor para o material em análise, o que acarretaria, por sua vez, no aumento na eficiência geral



da queima. Portanto, o que pode extrair-se disto é que uma boa forma de se aumentar a eficiência da queima dos voláteis é através da melhoria na mistura do ar de combustão com os produtos da pirólise nas vizinhanças do material em chamas. Como consequência, espera-se que os experimentos de microqueimada com ventilação forçada apresentem maior eficiência do que aqueles submetidos à convecção natural, o que realmente ocorreu. Em ambos os casos, porém, o arrasto formado pela coluna ascendente de gases quentes estabelece uma zona de turbulência na região de chama e nas vizinhanças do material queimado.

De grande importância para a eficiência do processo como um todo é a velocidade de ignição de uma dada quantidade de material sólido combustível (biomassa). De maneira bastante simplificada, pode-se dizer que esta velocidade da frente de ignição é obtida do balanço no qual a energia transmitida para as partículas (troncos) por diferentes modos de transferência de calor (radiação, convecção e condução) deve ser suficiente para secar e aquecer partículas até a temperatura de ignição. Conforme apresentado por Saastamoinen ²¹, este equacionamento é dado por

$$w\rho_b(h-h_\infty)=\sum q, \quad (4.1)$$

onde w é a velocidade da frente de ignição (m/s), ρ_b é a densidade do material a ser queimado e $(h-h_\infty)$ é a energia (incluído a secagem parcial) necessária para elevar o sólido até o estado de ignição.

A taxa de queima de peças de madeira depende, também, dos parâmetros da biomassa, tais como, constituição química e física (intrínsecas) destas, tamanho, umidade, quantidade de peças e orientação relativa destas no conjunto e, ainda, de alguns parâmetros do ambiente de queima, a saber, velocidade do vento, queima confinada ou aberta, características da base (assentamento), entre outros. De imediato, pode-se concluir que uma

microqueimada apresenta maiores facilidades de reter parte da energia gerada quando comparada com uma queimada real.

Existem modelos matemáticos para o estudo de queima de biomassa em pequenos queimadores (fornos) ^{22,23}, originados a partir de um grande número de hipótese simplificadoras que não podem ser aplicados de imediato na análise de microqueimadas. Estes modelos, entretanto, podem servir de base para um melhor interpretação dos processo que ocorrem nos testes.

Admitindo-se a existência de uma temperatura efetiva na zona de chama dos voláteis, pode-se concluir que a taxa de queima, na fase de pirólise, é função da transferência de calor desta zona de chama para o interior do sólido (troncos). A parte da chama que se localiza imediatamente acima dos sólidos em queima perde uma considerável parte da energia por radiação e convecção, pois os gases quentes fluem para fora da região de pirólise sem contribuir para o aquecimento destes. Portanto, a eficiência da queima em microqueimadas parece ser muito mais dependente da geometria e disposição dos troncos do que das características desta zona de chama (posicionada acima dos troncos). Este complicado processo de transferência de calor e massa, bifásico, ora iniciando, ora acelerando a queima individual dos troncos, nos diversos tamanhos, e em diferentes posições do arranjo que compõe a massa total a ser queimada, permite dizer que os processos que normalmente são analisados em seqüência, ocorrem de maneira simultânea e interrelacionada. Em algumas situações, pirólise e secagem do material sólido ocorrerão concomitantemente. Saastamoinen e Aho ²⁰ calcularam as frentes de propagação de secagem e pirólise em partículas esféricas de madeira e concluíram que os processos são sempre simultâneos, independentemente do tamanho destas. Os cálculos também serviram para estabelecer o processo limitante das taxas de devolatilização das partículas. Na medida em que o tamanho das partículas aumenta, esta taxa é controlada pelos mecanismos de transferência de calor para o sólido em ambientes de queima. Em

condições de queima, a chama em torno das partículas eleva a temperatura dos gases para uma faixa entre 1000-1400 K. Nestas condições, a taxa de pirólise não é controlada pela cinética das reações de decomposição (altas temperaturas), mas fundamentalmente pelo processo de secagem do material virgem. Como os processos são simultâneos, a frente de propagação da secagem torna o processo de pirólise limitado pelo calor transferido para as camadas interiores do sólido uma vez que as temperaturas mínimas para ocorrência de uma degradação térmica é bem superior à temperatura de vaporização da água.

A mistura gasosa turbulenta em torno dos troncos em pirólise conduzirá oxigênio para a superfície destes acarretando também queima heterogênea, tanto na superfície com na estrutura interna porosa do material coqueificado. Como redutores do material sólido coqueificado (carbono) pode-se citar o oxigênio, o gás carbônico e o vapor d'água. A oxidação heterogênea do carvão vegetal remanescente consome considerável parte da massa do resíduo sólido deixado após a degradação térmica. Contudo, a eficiência da queima está muito mais relacionada com a quantidade de massa que sofreu pirólise, em alguns casos chegando a 80% da massa inicial do sólido, do que deste processo final de queima heterogênea. Neste processo (incandescência), as cinzas contidas na biomassa podem favorecer ou reduzir a eficiência total da queima. Como ponto positivo, os minerais contidos nas cinzas podem agir como catalisadores na reação heterogênea do oxidante com o carbono sólido. Em contrapartida, estas cinzas podem permanecer intactas, estruturalmente falando, e formarem uma barreira para a difusão do oxidante para o interior do sólido bem como dos produtos para o meio circundante e ainda como isolante térmico no processo de condução de calor para as partes interiores do sólido.

Pode-se verificar que na queima de grandes partículas (troncos) de biomassa, diversos processos químicos e físicos estão envolvidos. Como consequência da diversidade de tamanho, forma e posição relativa entre estes

troncos, fica claro a ocorrência simultânea dos principais processos que caracterizam a queima de biomassa. Gases quentes presentes na superfície coqueificada do sólido consomem matéria por reações heterogêneas nas camadas mais externas (poros) e na própria superfície, enquanto numa faixa mais interna, ocorre decomposição térmica do substrato com grande formação de gases, ao mesmo tempo em que as partes mais interiores dos troncos sofrem um processo de secagem. Portanto, o tratamento matemático das microqueimadas é prejudicado pela impossibilidade de se estabelecer apropriadas condições de contorno para cada tronco e para o conjunto como um todo.

As interpretações do item anterior foram, portanto, baseadas muito mais nos aspectos quantitativos dos resultados do que nos qualitativos em função da inexistência, por hora, de modelos simplificados para o estudo de microqueimadas.



CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO DO ENSAIO DE CAMPO

5.1 – Desenvolvimento da Combustão na Área de Teste

A combustão na área de testes desenvolveu-se segundo os passos especificados a seguir:

- 13hs08min: início do fogo.
- 13hs13min: a frente de chama já está definida, bem contínua na parte central. Aparece uma chama com 15 m de altura.
- 13hs16min: a frente de chama apresenta-se com uma altura de 5m.
- 13hs22min: observam-se chamas de 15 e de 20m, às vezes, em poucos pontos.
- 13hs29min: as chamas já estão menores.
- 13hs46min: ocorre a ignição de uma ilha, com as chamas alcançando 15 a 20m.
- 13hs51min: já não existem muitos pontos de chama. Depois de um intervalo de aproximadamente 30 minutos, quando diminuiu bem a fumaça, já era possível caminhar-se pelo terreno. Alguns troncos permaneceram queimando em processo de incandescência, como é chamada a combustão auto-sustentada de biomassa, sem chama (é o que acontece, por exemplo, na combustão do carvão).

Assim, 43 minutos foram necessários para a ocorrência de praticamente todo o processo de combustão, em termos de consumo de biomassa, na área de 1 ha.

A Figura 5.1 mostra o início do processo de acendimento do material da área de teste. A Figura 5.2 mostra um aspecto da queimada durante a fase mais intensa da combustão.



Figura 5.1 – Início do processo de acendimento da biomassa.

5.2 - Observações durante a Queimada

Durante a queimada, alguns fatos chamaram a atenção:

- A propagação da frente de chama, com o material bem seco, é feita com uma taxa alta de consumo.



Figura 5.2 – Aspecto da queimada durante a fase mais intensa da combustão.

- Em alguns pontos, podia-se observar a gaseificação pela extremidade de alguns galhos, devido a sua alta permeabilidade longitudinal, conforme já dito, conforme mostrado na fotografia da Figura 5.3.
- A frente de chama, ao alcançar os limites da área abatida, não progrediu além da liteira, mas chegou até o aceiro que havia sido feito para contê-la.

- Apesar de haver um intenso calor irradiado, pode-se ficar confortavelmente na beira da floresta em pé, bem próximo da região em chamas, sem nenhum grande desconforto. A convecção criada pelas chamas não permite que fumaça ou ar quente penetre na floresta verde.



Figura 5.3 – Gaseificação na extremidade de galho.

5.3 - Observações após a Queimada

Verificamos que o material de dimensões menores e a liteira foram totalmente consumidos pelo fogo. Os troncos ficaram chamuscados, algumas vezes em todo o perímetro, outras em apenas uma parte da circunferência, mas não houve uma pirólise acentuada em nenhum deles. Concluimos que apesar da potência alta da frente de chama, o que fez com que todo o material menor fosse

totalmente consumido, o tempo de exposição é muito pequeno, e assim, não se consegue aquecer as camadas sub-superficiais dos troncos, não havendo, pois, pirólise e consequentemente, combustão. As Figuras 5.4 e 5.5 ilustram bem este fato. As fotografias foram feitas uma imediatamente antes da queimada e a outra no dia posterior. A Figura 5.6 mostra uma fotografia aérea do local sete dias após o teste.



Figura 5.4 – Aspecto da área de teste instantes antes da queimada.



Figura 5.5 – Aspecto da área de teste no dia posterior à queimada.

Outro fato observado na queimada foi a presença de incandescência, ilustrado na Figura 5.7. Em nosso experimento, o processo foi observado em material em decomposição, naturalmente caído antes do corte, e em material morto, cujo tronco ou caule foi envolvido por outro indivíduo.

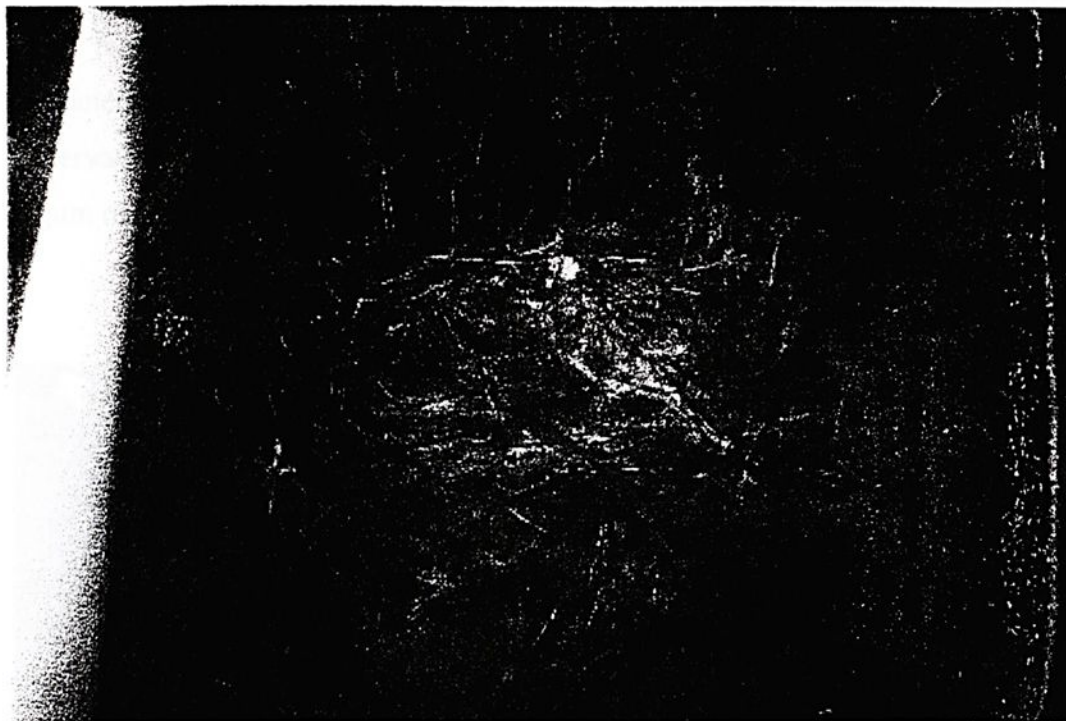


Figura 5.6 – Vista aérea do local do teste sete dias após a queimada.

Também observou-se incandescência, com frequência, em pontos de cruzamento entre troncos, conforme mostra a Figura 5.8. Acreditamos 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.

Os troncos selecionados, bem como os resultados observados são apresentados na Tabela 5.1. A localização e os números de identificação de cada tronco foram especificados na Figura 3.1.

O que foi observado é que apesar da potência alta da frente de chama, o tempo de exposição é muito baixo. Em troncos com tempo de exposição baixo à alta temperatura, não se consegue pirólise das camadas interiores, pois o coeficiente de condução térmica da madeira é muito baixo. Assim não foram observados troncos queimados com uma frequência que nos permitisse aferir algum resultado comparativo.



Figura 5.7 – Tronco em incandescência.

Por outro lado, foram observados os dois fenômenos acima citados, que não aparecem na literatura disponível, que são: incandescência em troncos em

de biomassa morta antes do abate e combustão auto sustentada em cruzamentos de troncos.

Destes dois, o mais interessante é, sem dúvida, a combustão em cruzamentos. Conforme dito anteriormente, a potência da frente de chama é grande, mas o tempo de exposição é pequeno, não existindo, portanto, condições para a pirólise e combustão auto sustentada dos troncos. Em um ponto onde se consiga aumentar um pouco este tempo de exposição, o limite de flamabilidade poderia ser alcançado. É o que acontece em cruzamentos. Acreditamos que isso ocorra devido ao fato de não haver uma troca de calor com o ambiente como em uma queima de um tronco individual, aparecendo lá algo como um “flame holder”, que aumenta um o tempo de exposição do tronco e cria condições para o aparecimento de uma chama auto sustentada. Esta chama progride muitas vezes até que toda a região do cruzamento seja queimada.



Figura 5.8 – Aspecto dos cruzamentos entre troncos após a queimada.

Tabela 5.1 – Resultados do teste de campo.

ÁREA 1B

Análise de Troncos Queimados

1/2

Plaqueta	Espécie	Comp (m)	DAP (cm)	Comentários após a queimada
312	Amescua	1	16,87	Queimou meia circunferência, com espessura de 2mm
		2	16,87	Casca chamuscada, solta em alguns pontos
313	Cupiuva	1	22,28	Queimou meia circunferência, com espessura de 1mm
		2	22,28	Casca chamuscada, queimou 2 mm em toda a área
		4	20,69	Casca chamuscada, queimou 3 mm em toda a área
		6	15,92	Intacto
314	Guatambu	8	23,87	Queimou meia circunferência com espessura de 2mm
315	Guatambu	8	26,10	Queimou por baixo, 1 mm, por 0,50 m. no encontro com Imbauba, está em smoldering.
317	Pindaíba	4	28,01	Queimou meia circunferência, 6mm, todo comprimento
		10	37,56	Queimou meia circunferência, 8mm, todo comprimento.
316	Guatambu mole	6	14,32	Queimou 50%, principalmente nas pontas.
		4	23,87	Queimou em todo comprimento, com maior eficiência perto do tronco maior, com 100% no último metro.
318	Cupiuva	10	16,55	Queimou 5 mm em toda a área.
		1	18,46	Queimou 5 mm em toda a área.
319	Cupiuva	1	14,96	Superfície queimada, com trincas
		2	14,96	Superfície queimada, com trincas, pontas arredondadas
		6	17,83	Queimou uma ponta, meia circunferência, 3mm
320	Canela	10	19,74	Queima por dentro em 1,24m, de 30% do tronco.
				No resto, 10% em 1m, 8mm em meia circunferência.
		2	19,74	Queimou meia circunferência com espessura de 10mm
321	Imbauba	1	23,24	Consumiu 65% do tronco
		1	23,24	Queimou a casca, aparecendo trincas por baixo
		2	20,37	Queimou 50% no primeiro metro.
		2	20,37	Queimou 30 mm em meia circunferência.
322	Guatambu	8	27,37	Queimou 1/4 circunf. 10mm, 1/4 circunf. 5mm, em 6,40.
323	Amescua	2	13,05	Intacto
		2	13,05	Queimou 2mm por 1m, em meia circunferência
		1	13,05	Queimou 3mm em todo o comprimento
259	Guatambu	2	24,83	Intacto
		1	24,83	Queimou 10 mm em meia circunferência por 0,50 m.
		3	24,83	Intacto
		3	24,83	Intacto
269	Imbauba	1	20,69	Em smoldering
		2	19,10	Em smoldering

ÁREA 1B

Análise de Troncos Queimados

2/2

Plaqueta	Espécie	Comp (m)	DAP (cm)	Comentários após a queimada
		1	18,78	Queimou 90% do total
		2	17,19	Queimou 40% do total
		1	16,39	Queimou 50% do total
267	Formigueiro	1	42,02	Sinais fracos de combustão
		1	42,02	Sinais fracos de combustão
		1	42,02	Sinais fracos de combustão
		1	42,02	Sinais fracos de combustão
		1	42,02	Sinais fracos de combustão
270	Açaí	2	15,60	Superfície chamuscada, sem perda de forma
		1	15,60	Superfície chamuscada, sem perda de forma
		2	15,60	Queimou 20 mm, meia circunf., todo comprimento
		1	15,60	Queimou 30% do total
		2	15,60	Queimou 50% em 1/3 do total, 3mm em meia circunf.
		1	15,60	Queimou 50% em 1/3 do total, 3mm em meia circunf.
263	Mixiriquinha	3	12,73	Intacto
		2	12,10	Intacto
		1	9,23	Intacto
265	Mixiriquinha	3	14,64	Intacto
		2	14,01	Intacto
		1	12,73	Intacto
		1	12,41	Intacto

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHO FUTURO

6.1 – Conclusões Gerais

Os trabalhos desta dissertação de mestrado dividiram-se em duas partes distintas, a primeira realizada nas dependências Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE, em Cachoeira Paulista, e a segunda realizada na Fazenda Caiabi, em Alta Floresta, Mato Grosso, município localizado na fronteira de desmatamento da Amazônia. O objetivo principal era investigar características de combustão de biomassa em condições controladas em laboratório e em condições não controladas como o que ocorre em queimadas de vegetação natural para preparar o terreno para pastagens ou plantio.

Em laboratório, as atividades consistiram de:

- Montagem de facilidade para teste em condições de escoamento de ar controlado, consistindo de balança suportada por células de carga, ventilador e duto de condução do ar.
- Calibração do sistema.
- Testes de microqueimadas sem vento e com vento de 2,2 e 5 m/s, dos quais se observaram as diferenças nas características de combustão sem e com vento no tocante a eficiência e taxa de combustão.

No campo, o teste foi realizado em uma área de 100x100 m² e as principais observações foram:



- Três quartos de hora foram necessários para ocorrência de praticamente todo o processo de combustão, em termos de consumo de biomassa.
- material de dimensões menores e a liteira foram totalmente consumidos pelo fogo. Os troncos ficaram chamuscados, algumas vezes em todo o perímetro, outras em apenas uma parte da circunferência, mas não houve uma pirólise acentuada em nenhum deles.
- Presença de combustão incandescente. No experimento desta dissertação, combustão incandescente foi observada em material em decomposição, naturalmente caído ou em pé antes do corte.
- Ocorrência freqüente de incandescência em pontos de cruzamento entre troncos. Acreditamos 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.

O objetivo nominal do ensaio de campo era verificar-se a diferença da eficiência de combustão de troncos com a variação do seu comprimento. O que foi observado é que apesar da potência alta da frente de chama, o tempo de exposição é muito baixo. Em troncos com tempo de exposição baixo à alta temperatura, não se consegue pirólise das camadas interiores, pois o coeficiente de condução térmica da madeira é muito baixo. Assim não foram observados troncos queimados com uma freqüência que nos permitisse aferir algum resultado comparativo.

6.2 - Recomendações para Trabalho Futuro

A investigação dos diversos parâmetros que governam a combustão de biomassa de tamanhos médio e grande é proposta. Os resultados ajudarão na



estimativa da eficiência global de combustão em processos de queimada e, em um sentido mais amplo, no entendimento das características gerais de tais fogos.

Conforme discutido no Capítulo 5, em um processo real de queimada, praticamente apenas troncos de material morto antes do corte da vegetação foram capazes de sustentar o processo de incandescência. Assim, dois testes de campo são propostos como continuação deste trabalho, e eles são descritos a seguir.

Recomenda-se selecionar duas áreas de dimensões equivalentes à área do teste de campo da presente dissertação ($100 \times 100 \text{ m}^2$), cortar a vegetação em maio de um determinado ano e deixar uma das áreas para secar até agosto do mesmo ano e a outra para secar até agosto do próximo ano.

Em cada uma das áreas, sugere-se selecionar 80 troncos, 40 de vegetação viva antes do corte e 40 de vegetação morta, e dividi-los em dois grupos, 40 que ficarão suspensos e 40 que serão deixados em cima de material fino. Um esquema de um tronco suspenso com as dimensões e distância do solo sugeridas é mostrado na Figura 6.1.

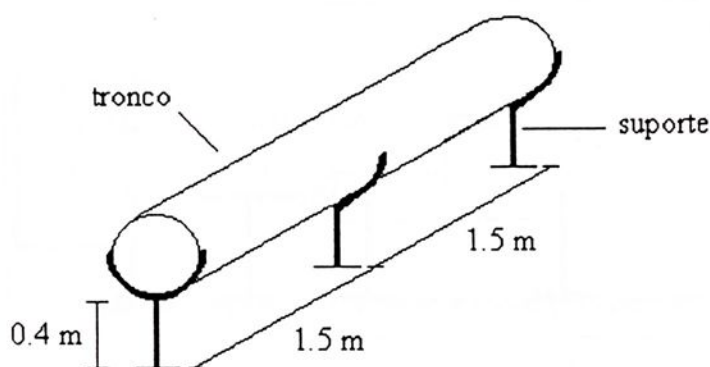


Figura 6.1 – Dimensões e distância do solo sugeridas para os troncos suspensos.

Sugere-se que cada um dos troncos seja contornado por arames para determinar seu consumo, de acordo com o procedimento desenvolvido por Sandberg e Ottmar ²⁴. Sugere-se também que dez dos troncos sejam instrumentados com termopares colocados ao longo do comprimento para determinar a velocidade de propagação da frente de combustão.

O processo de combustão incandescente também pode ser estudado nas instalações do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão do INPE, em Cachoeira Paulista. A montagem apresentada na Figura 6.2, que poderá ser montada em cima da balança desenvolvida no presente trabalho, é sugerida para esta investigação.

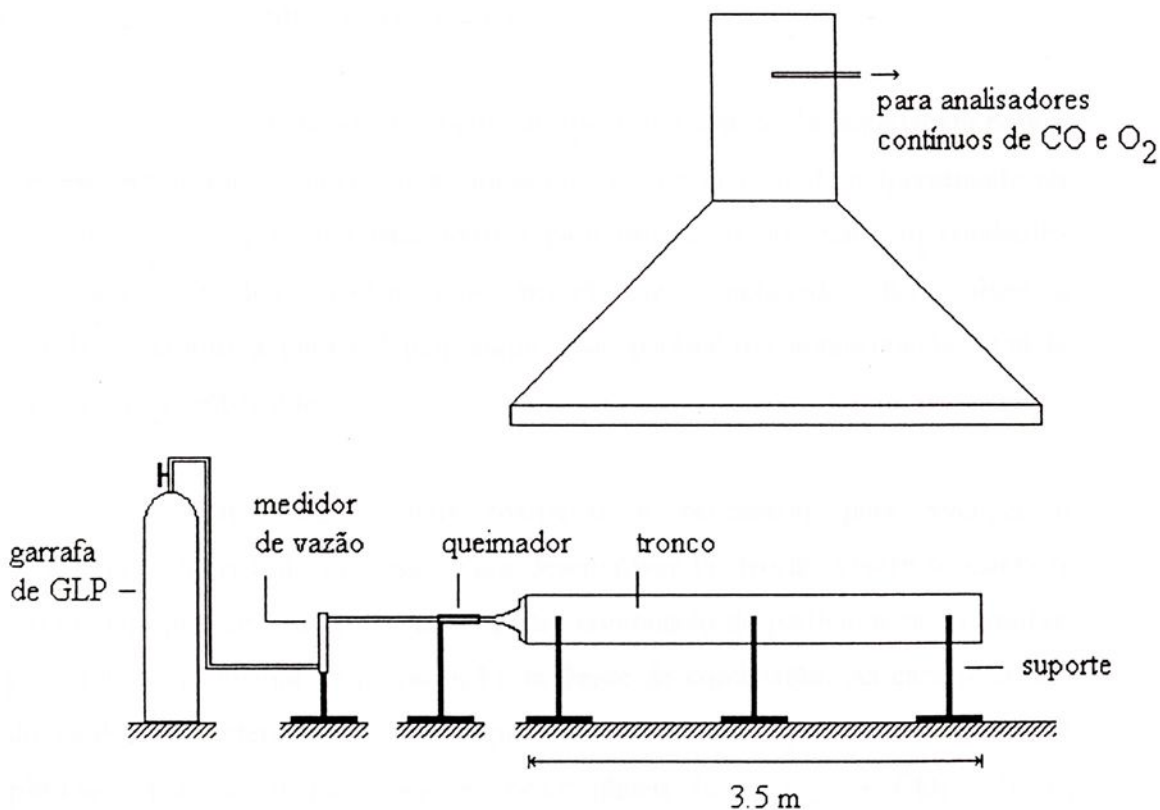


Figura 6.2 – Montagem proposta para investigação em laboratório do processo de incandescência.

Sugere-se que o processo seja iniciado por uma chama de GLP (gás liquefeito de petróleo) aquecendo uma extremidade do tronco, colocado na posição horizontal. A vazão de GLP deve ser controlada e medida. A iniciação e sustentação do processo devem ser função da taxa de calor liberada pela chama. Sugere-se um comprimento de tronco da ordem de 3,5 m, o qual pode ser variado conforme a pesquisa se desenrolar. Termopares devem ser colocados ao longo do tronco para determinar a velocidade média de propagação da frente. A concentração relativa entre CO e O₂ nos gases de combustão pode ser determinada com analisadores disponíveis no INPE.

Um segundo esquema, apresentado na Figura 6.3, é proposto para iniciação do processo de incandescência. Neste caso, aquecimento elétrico será usado e a potência elétrica monitorada. Uma combinação entre chama e fios elétricos pode, também, ser implementada.

Recomenda-se também um início de trabalho de modelagem para o processo de incandescência. Como um ponto de partida, o modelo apresentado no Capítulo 1 fornecerá uma base teórica para estudar o processo em condições permanentes. Dados experimentais deverão ser empregados para obter a correlação empírica para calcular alguns dos parâmetros apresentados naquela formulação simplificada.

Um modelo mais realístico é necessário para avançar a investigação teórica do processo. Para desenvolver tal teoria, sugere-se estender um modelo previamente elaborado ²⁵, para combustão de partículas pulverizadas, para tratar o problema de propagação da frente de combustão. As características do modelo da referência ²⁵ são: regime transiente, taxa global para reação de pirólise, taxa global para reações heterogêneas ($C + O_2 \rightarrow CO_2 + CO$), escoamento em meio poroso (vapor d'água, voláteis, oxidante e produtos de combustão), secagem considerada, reações intrínsecas de superfície, e

transferência de calor e massa através das fronteiras (combustão de CO e de voláteis).

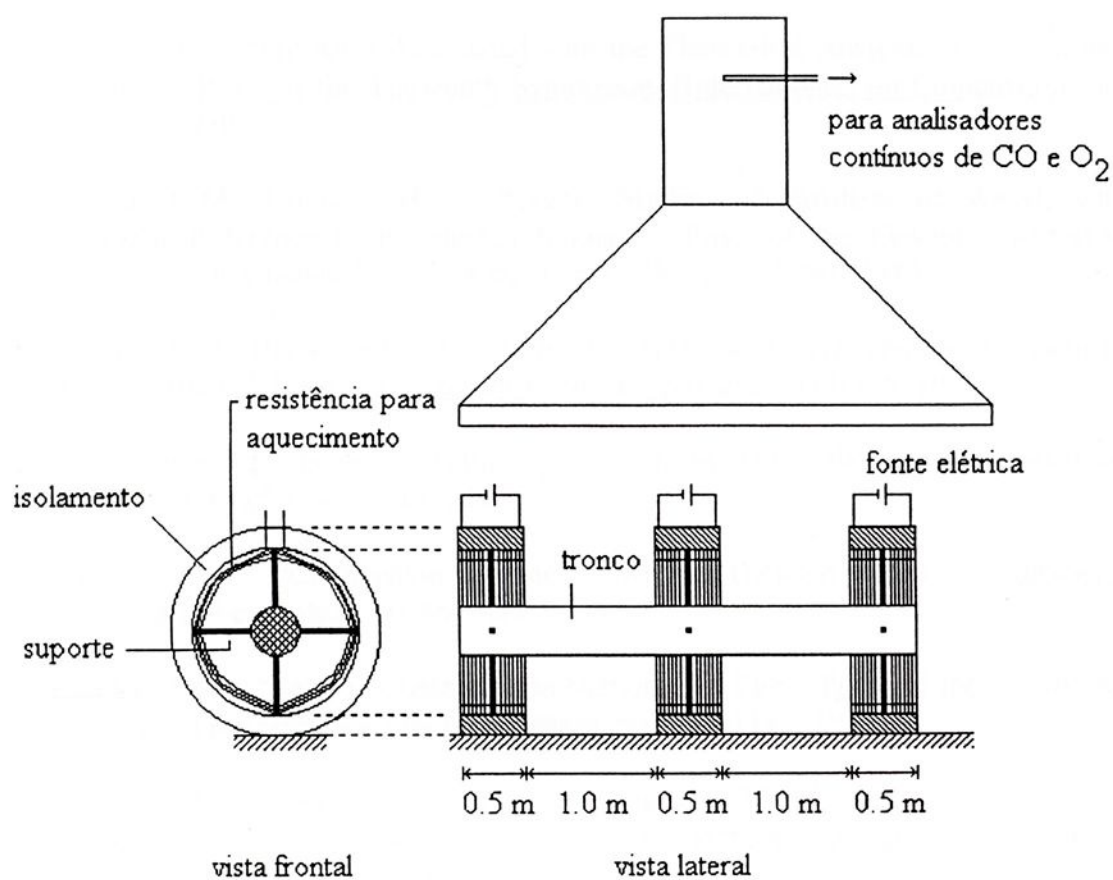


Figura 6.3 – Montagem alternativa proposta.

REFERÊNCIAS

- ¹ Fearnside, P.M.; Leal Jr., N.; Fernandes, F.M.: "Rainforest Burning and the Global Carbon Budget: Biomass, Combustion Efficiency, and Charcoal Formation in the Brazilian Amazon", Journal of Geophysical Research, 98(9):16733-16743, 1993.
- ² Roberts, A.F.: "Problems Associated with the Theoretical Analysis of the Burning of Wood", Proc. of the Thirteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 893-901, 1970.
- ³ 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.
- ⁴ Kanury, A.M.; Blackshear, P.L.: "Some Considerations Pertaining the Problem of Wood-Burning", Combustion Science and Technology, 1:339-355, 1970.
- ⁵ The Condensed Chemical Dictionary, revised by G.G. Hawley, van Nostrand Reinhold, 8ª edição, New York, 1971.
- ⁶ Kanury, A.M.: "Combustion Characteristics of Biomass Fuels", Combustion Science and Technology, 97:469-491, 1994.
- ⁷ Kanury, A.M.: "Rate of Charring Combustion in a Fire", Proc. of the Fourteenth Symposium (International) on Combustion, pp 1131-1142, 1972.
- ⁸ Connor, M.A.; Daria, V.; Ward, J.: "Changes in Wood During the Course of Carbonisation", Proc. of the Conference on Advances in Thermochemical Biomass Conversion, 11-15 May, 1992.
- ⁹ Connor, M.A.; Salazar, C.M.: "Research in Thermochemical Biomass Conversion", London, pp 164-178, 1988.
- ¹⁰ Roberts, A.F.; Clough, G.: "Thermal Decomposition of Wood in an Inert Atmosphere", Proc of the Ninth Symposium (International) on Combustion, pp 158-166, 1963.
- ¹¹ Puri, I.K., ed., Environmental Implications of Combustion Processes, CRC Press, 1993.
- ¹² Jones, J.C., Combustion Science, Principles and Practice, Millenium Books, 1993.
- ¹³ Drysdale, D.D., Introduction to Fire Dynamics, John Wiley, 1985.



- ¹⁴ Ohlrmiller, T.J., Modeling of Smoldering Combustion Propagation, Progress in Energy and Combustion Science, 11:277-310, 1985.
- ¹⁵ Carvalho, J.A. Jr.; Santos, J.M.; Santos, J.C.; Leitão, M.M.; Higuchi, N., "A Tropical Rainforest Clearing Experiment by Biomass Burning in the Manaus Region", Atmospheric Environment, 29(17):2301-2309, 1995.
- ¹⁶ Carvalho Jr., J.A.; Higuchi, N.; Araújo, T.M.; Santos, J.C.: "Experimentos de Queimada na Região Amazônica", FAPESP Projeto 93/4753-8, Relatório de experimento de campo realizado em Manaus, 1996.
- ¹⁷ Araújo, T.M.; Higuchi, N.; Carvalho Jr., J.A.: "Comparação de Métodos para Determinar Biomassa na Região Amazônica", Anais da Academia Bras. Ciências, 68(1):35-41, 1996.
- ¹⁸ Araújo, T.M.; Carvalho Jr., J.A.; Higuchi, N.; Brasil Jr.; A.C.P.; Mesquita, A.L.A.: "Estimativa de Taxas de Liberação de Carbono em Experimento de Queimada no Estado do Pará", Anais da Academia Brasileira de Ciências, in print, 1997.
- ¹⁹ Curry, J.R.; Fons, W.L.: "Forest-Fire Behavior Studies", Proc. of the Semi-Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, San Francisco, USA, 1939.
- ²⁰ Saastamoinen, J.J.; Aho, M.: "The Simultaneous Drying and Pyrolysis of single Wood Particles and Pellets Made of Peat", Proc. of the International Symposium on Alternative Fuels and Hazardous Wastes, Tulsa, Oklahoma, USA, paper 2.1, 29 p., 1984.
- ²¹ Saastamoinen, J.J.: "Fundamentals of Biomass Drying, Pyrolysis and Combustion", Proc. of the IEA Biomass Combustion Conference, Cambridge, UK, 1994.
- ²² Saastamoinen, J.J.: "Modelling of Wood Combustion in Small Stoves", Proc. of the Nordic Workshop on Combustion of Biomass, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 23 p., 1991
- ²³ Ragland, W.K.; Boerger, J.C.; Baker, A.J.: "A Model of Chuckwood Combustion", Forest Products Journal, 38(2):27-32, 1988.
- ²⁴ Sandberg, D.V.; Ottmar, R.G.; Slash Burning and Fuel Consumption in the Douglas-fir Subregion, Proc. of the 7th Conference on Fire and Forest Meteorology, Fort Collins, CO, pp. 90-93, 1983.
- ²⁵ Veras, C.A.G., Estudo Teórico dos Efeitos da Pressão e das Reações na Fase Gasosa na Queima de Combustíveis Sólidos Pulverizados, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 1997.

