Universidade de São Paulo
Área Interunidades – Ciência e Engenharia de Materiais
Escola de Engenharia de São Carlos
Instituto de Física de São Carlos
Instituto de Química de São Carlos

"DETERMINAÇÃO DE UM MODELO DE TAXA DE CARBONIZAÇÃO TRANSVERSAL A GRÃ PARA O *EUCALYPTUS citriodora E E. grandis*"

Edna Moura Pinto

Tese apresentada à Área Interunidades em ciência e engenharia de materiais, EESC/IFSC,/IQSC,da Universidade de São Paulo,como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais.

Carlito Calil Junior
Orientador

São Carlos
2005

Pinto, Edna Moura
Determinação de um modelo pra taxa de carbonização transversal a grã para a madeira de *E. citriodora* e *E. grandis* / Edna Moura Pinto. -- São Carlos, 2005.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto de Química de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.
Área: Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Junior.

1. Madeira. 2. Taxa de Carbonização. 3. modelo estatístico.
4. Incêndio. 5. segurança contra incêndio. I. Título.

Universidade de São Paulo
Ciência e Engenharia de Materiais
Caixa Postal 369 – 13560-970 – São Carlos, SP Fone (16) 3373-9589 Fax (16) 3373-9777

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **EDNA MOURA PINTO** APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 01/08/2005.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Carlito Calil Junior (Orientador e Presidente) – EESC/USP

Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky – ESALQ/USP

Prof. Dr. Valdir Pignatta e Silva – EP/USP

Prof. Dr. Jorge Munaiar Neto – EESC/USP

Profa. Dra. Rosaria Ono - FAU/USP

Minha gratidão a Deus, meus pais, irmãos e irmãs.
Dedico a eles a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Professor Titular Carlito Calil Junior.

Ao incentivo e apoio que recebi de meus queridos amigos da família Togashi e Utimati Silva. Que minha alegria seja também a deles.

Aos colegas do LaMEM, pelo companheirismo e os muitos momentos de alegria ao longo destes anos. Conseguimos afinal!

O desenvolvimento deste trabalho contou diretamente com a contribuição e empenho dos funcionários, pessoal técnico, instalações, bem como das pessoas responsáveis pelos seguintes Laboratórios e Institutos:

Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira - LaMEM, do Departamento de Estruturas (SET) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo/USP.

Instituto Florestal do Estado de São Paulo, Estação Experimental de Itirapina.

Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção da Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Campinas/ UNICAMP.

Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Construtivos – LASC. FURNAS – Centrais Elétricas SA. Aparecida de Goiânia, Goiás.

Laboratório de Caracterização do Grupo de Crescimento de Cristais e Materiais Cerâmicos. Instituto de Física (IFSC)/Universidade de São Paulo/USP.

Laboratório de Físico-Química Orgânica - Instituto de Química de São Carlos (IQSC)/Universidade de São Paulo/USP.

Agradeço a colaboração das seguintes pesquisadores:

Prof. Dr. Mariano Martinez Espinosa, UFMT.
Dr. Robert H. White, FPL – EUA.

Ao suporte financeiro, que permitiu a realização desta pesquisa, cedido pela Capes e pela Fapesp.

SUMÁRIO

Lista de Figuras i
Lista de Tabelas v
Lista de Símbolos vii
Reumo ix
Abstract x

1. Introdução 1

1.1 Objetivos 2
1.1.1 Objetivo específico
1.1.2 Objetivos gerais
1.2 Justificativa 3

2. Revisão Bibliográfica 5

2.1 Os *Eucalyptus citriodora* e *grandis* 5
2.1.1 *Eucalyptus citriodora Hook f.* 5
2.1.2 *Eucalyptus grandis W. Hill ex-maiden* 6
2.2 Reação e Resistência ao fogo 6
2.2.1 Reação ao fogo 9
2.2.2 Resistência ao fogo 9
2.3 Segurança contra incêndio 13
2.3.1 A redução de propriedades na seção remanescente 15
2.3.2 O efeito do arredondamento 17
2.4 A Taxa de carbonização da Madeira 18
2.4.1 Tipos de Exposição 24
2.5 Degradação térmica da madeira 26
2.5.1 Degradação térmica por pirólise 28
2.5.2 Degradação térmica por combustão 29
2.6 A Influência das propriedades da madeira no processo de combustão 32

3. Materiais e Métodos 39

3.1 Condutividade Térmica 42
3.2 Carbonização 46
3.2.1 Taxa de Carbonização unidimensional em corpos de prova de pequena dimensão C1 47
3.2.2 Taxa de Carbonização em peças estrurais C2 51
3.3 Análise térmica 57
3.4 Retratibilidade da Madeira 58
3.5 Composição química da madeira 59
3.6 Poder calorífico 62

4. Resultados e Discussões 64

4.1 Resistência e Rigidez 64
4.2 Condutividade Térmica 67
4.3 Carbonização C1 69
4.4 Análise Térmica 75
4.5 Carbonização C2 77
4.6 Retratibilidade da Madeira 86
4.7 Composição Química 88
4.8 Poder Calorífico 90

5. Desenvolvimento e Avaliação do modelo 91

5.1 Desenvolvimento do modelo 91
5.2 Análise e adequação do modelo 93
5.3 Modelo para carbonização C1 94
5.4 Modelo para carbonização C2 98

6. Conclusões
6.1 Conclusões 106
6.2 Recomendações 110

7. Referências Bibliográficas 111

Lista de Figuras

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	*Coloração do E. citriodora*	6
Figura 2.2	*Coloração do E. grandis.*	6
Figura 2.3	*Fases de um incêndio*	6
Figura 2.4	*Forno de ensaio vertical, para paredes*	9
Figura 2.5	*Forno de ensaio vertical, para pilares*	10
Figura 2.6	*Forno de ensaio horizontal, vigas, coberturas e pisos*	10
Figura 2.7	*Curvas de aquecimento, padronizadas e natural*	12
Figura 2.8	*Efeito da temperatura no Módulo de Elasticidade da madeira paralelo a grã.*	16
Figura 2.9	*Efeito da temperatura na resistência a compressão paralela a grã.*	16
Figura 2.10	*Seção carbonizada de uma viga MLC de cobertura, em exposição ao fogo por 30 minutos, taxa de carbonização de 0,6 mm/min.*	17
Figura 2.11	*Gráfico dos resíduos contra valores ajustados ($\hat{y}_i$)*	23
Figura 2.12	*Gráfico de probabilidade normal dos resíduos*	24
Figura 2.13	*Forno horizontal a gás para ensaio de resistência ao fogo sob flexão.*	26
Figura 2.14	*Forno vertical a gás para ensaios com amostras de pequenas dimensões.*	26
Figura 2.15	*Liberação de vapores e gases, pirólise.*	29
Figura 2.16	*Reações de combustão, zona A, pirólise lenta.*	29
Figura 2.17	*Reações de combustão, zona B, pirólise rápida.*	30
Figura 2.18	*Combustão flamejante.*	30
Figura 2.19	*Reações de combustão, zona C, combustão flamejante.*	30
Figura 2.20	*Combustão incandescente.*	31
Figura 2.21	*Reações de combustão, zona D, acima de 500^0C.*	31
Figura 2.22	*Formas de transferência de calor perpendicular a grã da madeira*	34

CAPÍTULO 3

Figura 3.1	*Anelamento e corte de uma tora de E. citriodora*	40
Figura 3.2	*Retirada de toras de E. citriodora, comprimento 5,00 m*	40
Figura 3.3	*Anelamento e corte de uma tora de E. grandis*	40
Figura 3.4	*Retirada das árvores*	40
Figura 3.5	*Planejamento de retirada dos corpos de prova*	41
Figura 3.6	*Sistema para determinação da condutividade térmica e dimensões do corpo de prova*	44
Figura 3.7	*Equipamento para determinação da condutividade térmica da madeira*	44
Figura 3.8	*Curva temperatura x tempo ASTM E-119*	46
Figura 3.9	*Plastificação do corpo de prova para preservar a umidade*	47
Figura 3.10	*Forno utilizado na realização de ensaios de carbonização C_1.*	47
Figura 3.11	*Corpos de prova de E.grandis e citriodora para carbonização C_1*	48
Figura 3.12	*Eixos de implantação dos termopares a diferentes profundidades*	48
Figura 3.13	*Sistema de aquisição de dados.*	49
Figura 3.14	*Placa adaptada na abertura do forno.*	49
Figura 3.15	*Posicionamento dos termopares durante o ensaio*	49

Figura 3.16	*Abafamento do corpo de prova em caixa de areia.*	50
Figura 3.17	*Aspecto final do corpo de prova após ensaio.*	50
Figura 3.18	*Forno para realização do ensaio de carbonização C_2.*	50
Figura 3.19	*Seções de implantação dos termopares (1), (2), (3), medidas em metros*	51
Figura 3.20	*Seção nominal da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seção 2*	52
Figura 3.21	Seção da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seções 1 e 3	53
Figura 3.22	*Seção longitudinal da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seção 1.*	53
Figura 3.23	*Sistema de aquisição de dados*	53
Figura 3.24	*Exaustão durante o teste com E. grandis*	54
Figura 3.25	*Flamabilidade acentuada durante o teste com E. grandis*	54
Figura 3.26	*Aspectos finais da amostra de teste após a abertura do forno.*	54
Figura 3.27	*Preparação do corpo de prova, marcação das seções e pontos dos termopares*	55
Figura 3.28	*Determinação da massa da viga*	55
Figura 3.29	*Posicionamento da viga no apoio*	55
Figura 3.30	*Colocação dos termopares*	55
Figura 3.31	*Fechamento do forno*	55
Figura 3.32	*Corpo de prova no interior do forno, antes do aquecimento*	56
Figura 3.33	*Corpo de prova durante o processo de carbonização*	56
Figura 3.34	*Retirada do corpo de prova*	56
Figura 3.35	*Resfriamento do corpo de prova com jato de água*	56
Figura 3.36	*Corte das peças ensaiadas*	56
Figura 3.37	*Acondicionamento das peças para transporte*	56
Figura 3.38	*Seção carbonizada*	56
Figura 3.39	*Desdobro das peças para confecção de corpos de prova de umidade, densidade e compressão*	57
Figura 3.40	*Direções principais da madeira*	58
Figura 3.41	*Corpos de prova de Retratibilidade imersos para saturação*	59
Figura 3.42	*Determinação do teor de umidade*	59
Figura 3.43	*Determinação da massa seca da amostra para o processo de extração*	59
Figura 3.44	*Processo de retirada de extrativos*	60
Figura 3.45	*Detalhe da amostra durante o processo de extração*	60
Figura 3.46	*Retirada da amostra calcinada da mufla*	60
Figura 3.47	*Aspecto dos resíduos da calcinação da madeira*	60
Figura 3.48	*Agitadores para realização do processo de hidrólise com H_2 SO_4 72%*	61
Figura 3.49	*Lignina Klason insolúvel*	61

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	*Diagrama de caixa para os resultados de ensaio de resistência a compressão paralela referentes aos E. citriodora e grandis.*	66
Figura 4.2	*Diagrama de caixa para os resultados de ensaio de resistência a compressão paralela para determinação do módulo de elasticidade, E. citriodora e E. grandis*	67
Figura 4.3	*Carvão resultante da combustão do E. citriodora, CP E2-4*	69

Figura 4.4	*Carvão resultante da combustão do E. grandis, CP D1-1*	69
Figura 4.5	*Curva temperatura x tempo, CP E2-4*	70
Figura 4.6	*Variações de espessura, volume e massa dos corpos de prova de E. citriodora submetidos a carbonização.*	73
Figura 4.7	*Diagrama de caixa para os resultados de variação da massa.*	74
Figura 4.8	*Curva termogravimétrica para o E. citriodora.*	76
Figura 4.9	*Curva termogravimétrica para o E. grandis*	76
Figura 4.10	*Citriodora D3*	77
Figura 4.11	*Citriodora D1*	77
Figura 4.12	*Citriodora C2*	77
Figura 4.13	*Grandis I*	77
Figura 4.14	*Grandis D1*	77
Figura 4.15	*Grandis E2*	77
Figura 4.16	*Perda de massa para corpos de prova de carbonização C2*	78
Figura 4.17	*Espessura de Carbonização, dados experimentais e previstos por norma*	79
Figura 4.18	*Seção transversal retangular*	80
Figura 4.19	*Tempo de Carbonização para o E. citriodora, 10mm.*	81
Figura 4.20	*Tempo de Carbonização para o E. citriodora, 20mm.*	81
Figura 4.21	*Tempo de Carbonização para o E. citriodora, 30mm.*	81
Figura 4.22	*Tempo de Carbonização para o E. grandis, 10mm.*	82
Figura 4.23	*Tempo de Carbonização para o E. grandis, 20mm.*	82
Figura 4.24	*Tempo de Carbonização para o E. grandis, 30mm.*	82
Figura 4.25	*Taxa de Carbonização, profundidade 10mm.*	82
Figura 4.26	*Taxa de Carbonização, profundidade 20mm.*	82
Figura 4.27	*Taxa de Carbonização, profundidade 30mm.*	82
Figura 4.28	*Comparação entre valores de Taxa de Carbonização, normas e dados experimentais.*	83
Figura 4.29	*Gradiente de temperatura da seção das vigas de madeira*	83
Figura 4.30	*Diagrama de caixa para as leituras dos termopares a profundidade de 10mm, 20mm e 30 mm.*	84
Figura 4.31	*Zonas de degradação e microscopia eletrônica de varredura pra o E. citriodora(250x e 2000x)..*	85
Figura 4.32	*Resultados de retração axial e coeficiente de anisotropia para E. citriodora*	87
Figura 4.33	*Resultados de retração axial e coeficiente de anisotropia para E. grandis.*	87
Figura 4.34	*Resultados de retração radial, tangencial e retração volumétrica para E. citriodora*	88
Figura 4.35	*Resultados de retração radial, tangencial e retração volumétrica para E. grandis*	88

CAPÍTULO 5

Figura 5.1	*Gráfico dos resíduos contra valores ajustados ($\hat{y}_i$), para o modelo da Equação 5.5.*	98
Figura 5.2	*Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para o modelo da*	98

Equação 5.5.

Figura 5.3 *Viga simples de madeira em condições normais de utilização* 102
Figura 5.4 *Dimensões da viga em condições normais de utilização* 102
Figura 5.5 *Viga exposta ao fogo,incêndio-padrão,* β_n *=0,5 mm/min* 102
Figura 5.6 *Dimensões da Viga exposta ao fogo,* β_n *=0,5 mm/min.* 103
Figura 5.7 *Viga exposta ao fogo,incêndio-padrão,* β *=0,59 mm/min* 103
Figura 5.8 *Dimensões da Viga exposta ao fogo,* β *=0,59 mm/min.* 103
Figura 5.9 *Viga exposta ao fogo,incêndio-padrão,* m *=0,62 mm/min* 104
Figura 5.10 *Dimensões da Viga exposta ao fogo,* m *=0,62 mm/min.* 104

Lista de Tabelas

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 Curva-padrão temperatura x tempo (θ x t) (ASTM E-119, 1995). 11

Tabela 2.2 Taxa de carbonização projetada para espécies de madeira coníferas e folhosas. 17

Tabela 2.3 Taxa de carbonização para cálculo de projetos de madeira, β_0 e β_n (Eurocode 5, 2002). 18

Tabela 2.4 Estudos sobre Taxa de Carbonização realizados até o ano de 1967. 19

Tabela 2.5 Modelos matemáticos para expressar a velocidade de carbonização da madeira. 20

Tabela 2.6 Taxa de carbonização para algumas espécies de madeira Norte-Americanas de coníferas e folhosas, obtidas através de ensaio padronizado ASTM E -119 (1995). 24

Tabela 2.7 Heavy timber, dimensões mínimas dos elementos construtivos 25

Tabela 2.8 Relação entre temperatura e produtos liberados durante o processo de degradação térmica da madeira. 32

Tabela 2.9 Relação entre fluxo de calor e direção da madeira. 36

Tabela 2.10 Composição dos constituintes químicos da madeira. 37

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 Espécies selecionadas para a determinação da taxa de carbonização. 39

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 Resultados de ensaios de resistência e rigidez obtidos por meio do ensaio de compressão paralela às fibras f_{co} (12%) relativos ao *E. citriodora* e *E. grandis*. 65

Tabela 4.2 Valores médios das propriedades de resistência e de rigidez das espécies estudadas fornecidas pela NBR 7190, comparados aos valores médios e característicos determinados para as amostras de *E. citriodora* e *E. grandis* estudadas, valores ajustados para teor de umidade de 12%. 66

Tabela 4.3 Resultados de ensaio de condutividade térmica pelo método do fio quente paralelo para *E. citriodora* e *E. grandis*. 68

Tabela 4.4 Caracteristicas dos corpos de prova para ensaio de Carbonização C_1. 71

Tabela 4.5 Tempo de carbonização (t) para o *E. citriodora* e *E. grandis.* 72

Tabela 4.6 Medidas estatísticas para a taxa e o tempo de carbonização segundo a leitura dos diferentes termopares 73

Tabela 4.7 Alterações na espessura (e), volume (v) e massa (m) dos corpos de prova de *E. citriodora* e *E. grandis* submetidos à carbonização. 74

Tabela 4.8 Resultados da análise Termogravimétrica, referentes a madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*, com 27 anos de idade 75

Tabela 4.9 Caracterização dos corpos de prova para ensaio de Carbonização C_2. 77

Tabela 4.10 Espessura de carvão residual, dados experimentais, dados calculados com base nas normas: AS 1720.4; Eurocode 5 e medidas estatísticas. 79

Tabela 4.11 Tempo médio de carbonização (t) das diferentes espécies por média referente às seções. 80

81

Tabela 4.12 Taxa de carbonização (β) das diferentes espécies por média referente às seções.
Tabela 4.13 Resultados e médias para os ensaios de retratibilidade 86
Tabela 4.14 Composição química da madeira de *E. citriodora* e *E. grandis* 88
Tabela 4.15 Medidas estatísticas dos resultados da composição química da madeira de *E. citriodora* e *E. grandis.* 89
Tabela 4.16 Correlação simples para os resultados de TG e Composição Química 89

CAPÍTULO 5

Tabela 5.1 Valores médios de tempo de carbonização em minutos e os parâmetros estimados para o avanço da camada carbonizada t x $X_{c.}$ 94
Tabela 5.2 Medidas estatísticas dos resultados de tempo de carbonização 95
Tabela 5.3 Variáveis e parâmetros para elaboração do modelo 95
Tabela 5.4 Valores de correlação simples entre as propriedades da madeira 96
Tabela 5.5 Coeficientes de regressão das variáveis independentes, DP, *t*, p, s, R^2 98
Tabela 5.6 Parâmetros estimados para o deslocamento da camada carbonizada t x $X_{c.}$ 99
Tabela 5.7 Parâmetros estimados para a formulação do modelo 99
Tabela 5.8 Coeficientes de Regressão das variáveis independentes, DP, *t*, p, s, R^2 100
Tabela 5.9 Resultados para as variáveis estudadas na formulação do modelo 100
Tabela 5.10 Comparação entre as taxas de carbonização obtidas por dados experimentais, pelo modelo e pela normalização. 101

Lista de Símbolos

A_{215} ; A_{280}	Valores de absorbância em nm.
a	Coeficiente de absorção por radiação para materiais sólidos
C	Calor específico
c	Espécie
C_z	Teor de cinzas da amostra (%)
CP	Corpo de prova
C_w	Calor específico da madeira
d	Permeabilidade
DTA	Análise térmica diferencial
E_{c0}	Modulo de elasticidade por compressão paralela às fibras
$E_{c0,m}$	Modulo de elasticidade por compressão paralela às fibras, valores médios
f_{c0}	Resistência à compressão paralela às fibra
$f_{c0,m}$	Resistência à compressão paralela às fibra, valores médios
f_{car}	Fator de contração do carvão
I	Corrente
I	Intensidade da radiação
k_s	Tortuosidade da célula
l	largura
LK_i	Lignina Klaison insolúvel (%)
Ls	Lignina Klaison solúvel g. L^{-1}
m	Massa
m_i	Massa inicial
m_f	Massa final
m_s	Massa seca da amostra
m_r	Massa de resíduo
m_l	Massa de lignina
m_v	Taxa de liberação de voláteis por área de superfície
mV	milivolts
q	Calor de pirólise
q	Fluxo de calor
Q_i	Entalpia de reação
R	resistência
r_i	Taxa de reação química
t	Tempo em minutos
TG	Análise termogravimétrica
u	Teor de umidade (%)
V	Volts
V_{tot}	Volume total
V_{cw}	Volume da parede celular
V_w	Volume da água

x	Localização da frente de carbonização
x_c	Espessura da frente de carbonização

Lista de Símbolos Gregos

α	Difusividade térmica (cm^2/s)
β	Taxa de carbonização com base nos dados experimentais
β_n	Taxa de carbonização nominal
β_o	Taxa de carbonização unidimensional
η_1 e η_2	Constantes de regressão
Θ	Temperatura (^oC) a um tempo t (min.)
Θ_o	Temperatura inicial (^oC)
λ	Condutividade térmica (W/mK)
λ^o	Condutividade térmica perpendicular aparente
λ_w	Condutividade térmica da água
λ_{ca}	Condutividade térmica do ar no interior da célula
μV	microvolts
ρ_{ap}	Densidade aparente (g/cm3)
$\rho_{ap(12\%)}$	Densidade aparente a 12% de umidade (g/cm3)
ρ_{bas}	Densidade básica
ρ_{car}	Densidade do carvão

Lista de Símbolos Estatísticos

CV	Coeficiente de variação
$\hat{e}_i$	Resíduos
ε	Erro
n	Número observações
p	Valor de probabilidade
s^2	Variância
s , DP	Desvio padrão
R^2	Coeficiente de determinação
t	Valor da razão
$\hat{y}_i$	Valores ajustados
$\bar{y}$	Média
y_i	Dados experimentais
$\hat{y}_i$	Dados ajustados

RESUMO

PINTO, E. M. (2005). Determinação de um modelo de taxa de carbonização transversal à grã para o Eucalyptus citriodora e Eucalyptus grandis. Tese (Doutorado)- Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 119p.

A taxa na qual a madeira se converte em carvão é determinante para a avaliação da resistência ao fogo, pois o colapso de elementos estruturais de madeira e de seus derivados quando expostos ao fogo ocorre principalmente pela redução da área resistente da seção, devido à formação de carvão. A resistência ao fogo depende, portanto, das dimensões da seção transversal que é reduzida gradualmente ao ser exposta ao fogo. Vários países têm investido em pesquisas para a caracterização e determinação da taxa de carbonização com base em diferentes espécies. Nesse trabalho são apresentados dois modelos de taxa de carbonização para a madeira de *Eucalyptus* das espécies *citriodora* e *grandis*, de grande interesse para aplicação estrutural e plantadas no Brasil. Um para peças de madeira com pequena dimensão (17,2 cm x 17,2 cm x 6,0 cm) e outro para as vigas estruturais (0,16 cm x 0,26 cm x 2,00 m). A curva de aquecimento adotada foi a recomendada pela ASTM E-119.

Palavras-chave: madeira, taxa de carbonização, modelo estatístico, incêndio.

ABSTRACT

The rate at which the wood converts in char is determinant to evaluate the fire endurance, because the failure of wooden structural elements and its composites exposed to fire occurs through reduction of cross section. The fire resistance depends on cross sections dimensions that are gradually reduced when exposed to fire. Several countries have invested in research to determine the wood charring used for building construction that result in the establishment of values to different species. This work presents two charring rate models for citriodora and grandis species of Eucalyptus, that presents structural interests in assemblies in Brazil. One model for small pieces (17,2 cm x 17,2 cm x 6,0 cm) and the other using structural beam (0,16 cm x 0,26 cm x 2,00 m). The standard temperature x time curve was ASTM E-119.

Keywords: *timber, charring rate, statistical model, fire.*

1. INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A taxa de carbonização é um valor dimensional determinante para a avaliação da resistência ao fogo, visto que o colapso de elementos de madeira e de seus derivados ocorre principalmente pela redução da área resistente, ou seja, pela redução gradual da seção transversal exposta ao fogo.

Sua determinação é obtida tanto por meio de modelos empíricos por meio de dados experimentais como por modelos teóricos fundamentados em princípios físicos e químicos. É caracterizada tanto pela perda de massa (g/s), também denominada taxa de queima, como pelo aumento da camada carbonizada (mm/min.) denominada de taxa de carbonização.

O último método é mais difundido por conduzir diretamente a análise da seção residual, atendendo aos interesses do estudo de peças estruturais em situação de incêndio que se baseia na redução da área resistente e na perda das propriedades de resistência e rigidez da madeira exposta a elevados gradientes de temperatura.

De acordo com (TR10, 2003), a taxa de carbonização da madeira possui relação com:

- densidade;
- espécie;
- composição química;
- permeabilidade;
- condutividade térmica da madeira;
- dimensão da amostra;
- temperatura de exposição ao fogo e
- orientação da grã, no sentido longitudinal a madeira produz duas vezes mais carbonização que no sentido transversal, (Schaffer,1967); (FOREST PRODUCTS LABORATORY,1999).

Resultados experimentais realizados com espécies coníferas e folhosas de origem Norte-Americana têm demonstrado uma relação aproximadamente linear entre tempo e profundidade de carbonização, com velocidade média de carbonização de 0,635 mm/min. O valor difundido adota a taxa de carbonização transversal à grã de 0,6 mm/min. para todas as madeiras submetidas a exposição padronizada ao fogo, embora

existam diferenças entre as espécies, relacionadas às respectivas densidades, teor de umidade e permeabilidade.

Lie (1997) recomenda dois valores: 1) um para madeiras de baixa densidade e secas: 0,8 mm/min. e 2) outro para madeiras coníferas de média densidade de 0,6 mm/min.

Em nosso país, constata-se a inexistência de informações a respeito do comportamento das diferentes espécies de madeira sob a ação de um incêndio. Conseqüentemente, a determinação da taxa de carbonização da madeira de *Eucalyptus* permitirá a formação de um banco de dados para extrapolação do comportamento deste material de uso estrutural, fornecendo subsídios para futuras pesquisas relacionadas à resistência da madeira.

A insegurança frente a potenciais riscos relacionados à combustibilidade da madeira é considerada como um dos pontos críticos para as restrições na aprovação de financiamento de habitações em madeira, no Brasil e em outros países, fruto do desconhecimento sobre o comportamento das diferentes espécies em relação ao fogo.

Este trabalho tem por objetivo elaborar um modelo estatístico para a taxa de carbonização transversal da madeira de *Eucalyptus,* considerando a influência dos seguintes parâmetros: densidade aparente ou massa específica **(ρ_{ap} , g/cm^3)**, teor de umidade (u), espécie (e), condutividade térmica (λ) e coeficiente de anisotropia (CA).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Específico

Propor um modelo estatístico, expressão matemática, para a determinação da taxa de carbonização da madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis* empregadas na construção civil, com base em suas propriedades.

1.2.2 Objetivos Gerais

- Fornecer subsídios para o estudo da resistência da madeira em situação de incêndio;
- Fornecer subsídios para a NBR 7190 - *Projeto de estruturas de madeira,* (1997), com relação a combustibilidade e tempo de resistência de peças estruturais de Eucalyptus;
- Investigar a influência dos principais parâmetros envolvidos no processo de combustão da madeira.

1.3. JUSTIFICATIVA

A madeira é um material combustível e a insegurança frente aos potenciais riscos relacionados à sua combustibilidade é considerada um dos preconceitos em relação ao uso estrutural deste material e ponto restritivo na aprovação de financiamento de habitações em madeira no Brasil.

É notório o aumento de interesse pela utilização da madeira de espécies de *Eucalyptus* como fonte de matéria-prima na indústria madeireira e construção civil. Estas espécies de rápido crescimento e de curta rotação (idade ideal para o corte), oferecem significantes vantagens e versatilidade por apresentarem, (Campinhos, 2001):

- Fácil adaptação a diferentes ecossistemas;
- vasta fonte de material genético;
- maturação precoce e boa forma;
- diferentes espécies podem ser cruzadas para produção de híbridos e
- variabilidade de aplicação da madeira produzida.

A maioria das plantações está localizada nas regiões Sul e Sudeste, e está comprometida com o setor de celulose e papel, siderurgia e fornecimento de madeira serrada. Dentre as espécies plantadas, o *Eucalyptus citriodora* apresenta maior aptidão para uso em estruturas, devido a suas propriedades físico-mecânicas, (Santos; Ballarin, 2002).

O desenvolvimento e emprego dos materiais construtivos estão sendo gradualmente atrelados a normas de desempenho. O estabelecimento de padrões mínimos com relação ao comportamento dos materiais coincide, nas décadas de 50 e 60, com o estabelecimento de padrões mínimos de qualidade e desempenho dos materiais e processos construtivos voltados à reconstrução das cidades européias do pós-guerra e com o caráter científico que os estudos sobre incêndio passaram a ter na década de 50. Desta forma as propriedades dos materiais passaram a ser exaustivamente estudadas.

A madeira de uso estrutural possui como principal parâmetro, no que diz respeito ao estudo do seu comportamento ao fogo, a taxa de carbonização.

No entanto, a realização de ensaios com elementos e sistemas estruturais expostos ao fogo envolvem elevados custos, sejam com relação aos equipamentos necessários, sejam com custos de realização dos ensaios, o que dificulta a realização e reprodução de pesquisas nesta área. Neste sentido, o desenvolvimento de modelos torna-se um método favorável e que vem se tornando cada vez mais adotado mundialmente em todas as áreas de pesquisa. Um modelo para expressar a velocidade de carbonização permite, por extrapolações, estimar o tempo de resistência dos elementos estruturais de madeira empregada na construção civil, quando expostos as condições de incêndio. Esta é uma questão que representa ainda uma lacuna normativa na prática construtiva em madeira no Brasil.

Levando a termo as considerações apresentadas, é patente a necessidade de maiores conhecimentos sobre o comportamento da madeira sob ação do fogo, em vista de sua potencialidade e por representar fonte de matéria prima renovável com emprego no setor construtivo, garantindo sua utilização racional e segura.

Nesse trabalho é proposto o desenvolvimento de um modelo de taxa de carbonização para as espécies de *E. citriodora* e *E. grandis* com base nos ensaios de carbonização, o que permitirá analisar os resultados dos ensaios com vistas ao desempenho da madeira sob o fogo e formar um banco de dados para futuras pesquisas, considerando a importância de modelos para explicar o comportamento para as diferentes espécies vegetais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus. grandis*

A angiosperma do gênero *Eucalyptus* é originária da Austrália, pertence à família das Mirtáceas e possui 670 espécies identificadas. Seu nome, *Eucalyptus*, deriva do grego e se refere à estrutura globular arredondada de seu fruto: *eu*=bem, *kaliptus*=cobrir.

Na América latina, o Chile foi o primeiro país a receber o *Eucalyptus*, no ano de 1823. No Brasil, não há uma data precisa; mas acredita-se que a chegada das primeiras mudas ocorreu em 1825, no Rio de Janeiro por intermédio do Imperador D. Pedro I, (Andrade, 1960).

Inicialmente usado com finalidades decorativas, deve-se à Companhia Paulista de Estradas de Ferro e a Edmundo Navarro de Andrade, entre 1905-15, a expansão e sistematização da cultura do eucalipto no país, passando progressivamente a assumir o papel de suprimento de energia para fornos de carvão e de lenha e posteriormente assumir o papel estratégico como responsável pelo abastecimento da maior parte do setor industrial de base florestal, (FAO, 1981).

A rotação das culturas está relacionada à finalidade de uso da madeira; para a produção de papel e celulose, por exemplo, a madeira é retirada com 8 a 10 anos e para produção de madeira serrada, a rotação é maior, geralmente a partir de 20 a 25 anos.

As espécies selecionadas para realização deste trabalho foram: *E. citriodora* e *E. grandis*, tomando como base a relevância e potencialidade de utilização na construção civil devido a suas propriedades físico-mecânicas, bem como, devido às vastas áreas de plantio no Estado de São Paulo.

As áreas plantadas no Estado de São Paulo apresentam um crescimento sistemático. Em 1962 eram de aproximadamente 330.000 ha, atualmente superam os 600.000 ha. Deste total as plantações de *E. citriodora,* que ocupa o terceiro lugar totalizam 2.406 ha e as de *E. grandis* que ocupa o primeiro lugar totalizam 157.722 ha, (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2002).

2.1.1 *Eucalyptus citriodora Hook f.*

Esta espécie é utilizada na construção civil, fornecendo peças estruturais, decorativas e de utilidade geral: caixaria, dormentes, postes, cruzetas, vigas, caibros, carvão e lenha; (Nogueira, 1991). O *citriodora* possui elevadas propriedades de resistência mecânica, estabilidade e baixa permeabilidade, ($\rho_{ap\ (12\%)}$ 0,99 g/cm^3), pertence à classe de resistência C-60. Com cerne e alburno distintos pela cor, cerne parda, alburno branco-amarelado, (*Figura 2.1*) é uma madeira de alta densidade, dura ao corte, no entanto, requer uso adequado de desdobro, devido aos efeitos das tensões de crescimento, (IPT,2003).

2.1.2 *Eucalyptus grandis W. Hill ex-maiden*

A madeira de *E. grandis* de ciclos longos, a partir de 20 anos, é usada na construção civil fornecendo peças estruturais, decorativas, de utilidade geral e móveis, ripas, guarnições, forros, lambris. Quando usada em ciclos curtos é aplicada em paletes, caixaria, produção de carvão e mourões, (Nogueira ,1991), (IPT, 2003). O *grandis* considerado uma espécie muito versátil e indicada a usos múltiplos. Possui madeira considerada medianamente leve, ($\rho_{ap\ (12\%)}$ 0,64 g/cm^3), com baixa estabilidade e pertence à classe de resistência C-40. Com cerne e alburno distintos pela cor, cerne castanho-rosado-claro, alburno bege-rosado, (*Figura 2.2)* é excelente para serraria, mas com atenção a técnicas apropriadas para desdobro, a fim de minimizar os efeitos das tensões de crescimento, (IPT, 2003).

Figura 2.1. Coloração do E. citriodora

Figura 2.2. Coloração do E. grandis

2.2 REAÇÃO E RESISTÊNCIA AO FOGO

O incêndio é uma combustão incontrolada que para se desenvolver e completar suas fases, (*Figura 2.3)* necessita, entre outros, da presença de materiais combustíveis, (SIA, 1998). É o conteúdo da edificação, geralmente composto de materiais

heterogêneos e combustíveis, que contribuem consideravelmente para a sua evolução e não propriamente a estrutura da edificação, como é comum se pensar.

A abordagem científica dos incêndios que ocorreu a partir da segunda metade do século XX, principalmente por países europeus, norte-americanos e asiáticos, possibilitou por meio de um instrumental tecnológico, o emprego da madeira em locais da construção habitacional onde antes ela representava risco, rompendo assim o preconceito quanto a sua utilização e consagrando sua viabilidade construtiva. Entretanto, no Brasil, estes estudos voltados à madeira, se apresentam como um vasto campo a ser explorado, (Pinto, 2001).

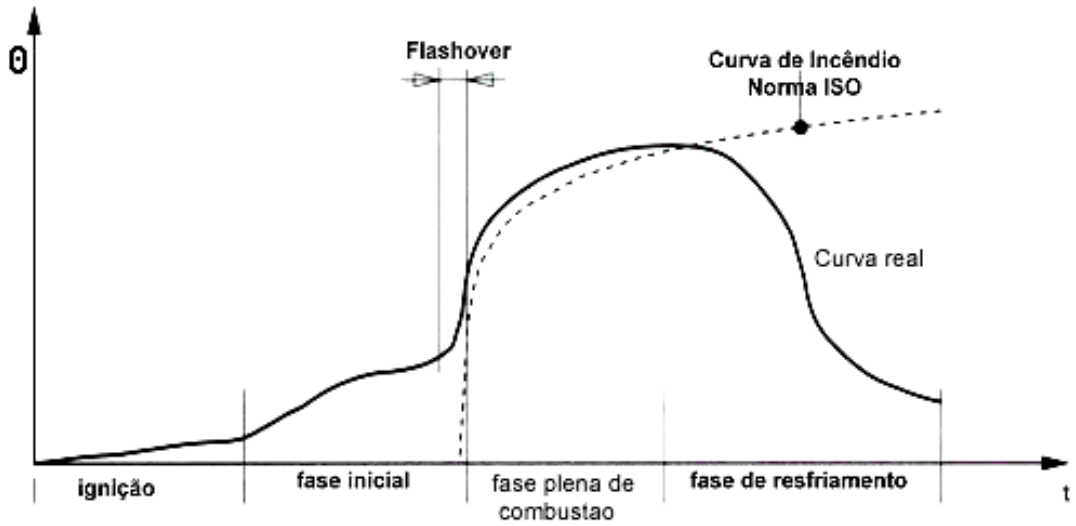

Figura 2.3. Fases de um incêndio

O começo do incêndio é marcado pela ignição do material contido no ambiente, resultado de seu lento aquecimento até a temperatura de combustão, em função da quantidade de calor recebida. A ventilação do ambiente, a natureza e fonte da ignição e os fatores intimamente relacionados às propriedades dos materiais e a seu desempenho ao serem expostos a elevadas temperaturas (inflamabilidade, liberação de calor, combustibilidade, propagação de chamas, entre outros) interagem na fase inicial.

Após atingirem um nível suficiente de radiação, todos os materiais combustíveis do compartimento ignizam rapidamente envolvendo todo o compartimento, configurando o ponto mais crítico do incêndio: a inflamação generalizada *(flashover*), transição entre a fase de aquecimento e a fase de queima.

Durante a segunda fase, a temperatura se eleva de forma brusca e o incêndio se propaga rapidamente. A combustão pode ser controlada pela ventilação onde a queima é regulada pelo suprimento de ar ou pode ser controlada pelas propriedades

dos materiais combustíveis contidos no local. A queima dos materiais é determinada pela quantidade, sua porosidade e forma. O combate de um incêndio nesta fase torna-se mais difícil porque a energia térmica liberada é elevada, o que torna geralmente os recursos e esforços de combate insuficientes, exigindo a resistência da edificação para prevenir o alastramento do fogo e o colapso estrutural no período posterior a esta fase.

A segurança à vida "é mais afetada no período anterior à inflamação generalizada e a proteção do patrimônio no período após sua ocorrência, muito embora a inflamação generalizada ameace tanto a segurança à vida, como também a própria construção e as construções vizinhas", (Buchanan, 1999, p.1).

A terceira fase de um incêndio é a sua extinção. Com a queima do combustível não há mais o fornecimento de energia térmica para o ambiente, a temperatura decai e a cadeia dos elementos necessários para que ocorra o fogo: o calor, o combustível, o comburente e a reação, conhecidos como tetraedro do fogo, se rompem. Na fase final, a resistência dos materiais ao fogo é de extrema importância, visto que os elementos e componentes devem desempenhar a função para a qual foram projetados, mantendo-se estáveis durante determinado período de tempo previsto pela normatização e legislação.

O dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio, no Brasil, é previsto pela normatização. Segundo a Instrução Técnica nº 08/01 (2004), para os aços convencionais recomenda-se que a temperatura crítica seja tomada como um valor máximo de 550º C, ou ainda, que seja calculada para cada elemento estrutural de acordo com a norma NBR-14323 - Dimensionamento de Estruturas de Aço em Edifícios em situação de incêndio. Estruturas de concreto são calculadas de acordo com a norma NBR–15200– Projeto de Estruturas de Concreto em Situação de Incêndio (Pinto; Calil, 2002). A madeira, assim como os demais materiais estruturais, devido à ausência de normas nacionais relacionadas à segurança contra incêndio, deve fazer uso do Eurocode 5, (Instrução Técnica nº 08/01, 2004).

A concepção do incêndio em fases e sua estreita relação com o comportamento dos materiais, possibilita eleger e regulamentar a utilização dos diferentes materiais na construção civil, assim como, projetar estruturas para resistirem ao fogo. É notório que o desempenho dos materiais exerce influência no progresso de um incêndio e que a correta utilização destes pode minimizar sua severidade. Informações sobre o desempenho são obtidas por meio dos ensaios de resistência ao fogo e reação ao fogo.

As características de resistência e reação ao fogo, obtidas por meio de ensaios padronizados, fornecem informações sobre o desempenho dos materiais, elementos e componentes construtivos, úteis para a regulamentação de práticas construtivas nos códigos de edificações, escolha de sistemas, componentes e materiais construtivos por órgãos públicos, agentes financiadores, seguradoras, código de defesa do consumidor, etc.

2.2.1. A reação ao fogo

A reação ao fogo é definida como todas as transformações físicas e químicas sofridas por um material exposto ao fogo incontrolado. É avaliada por meio de diversos ensaios padronizados, (Pinto e Calil,2002), muitas vezes sem correlação entre si. Entre eles: Propagação superficial de chamas. (*NBR 9442 – Materiais de construção – ensaio de propagação superficial de chama – método do painel radiante);* Combustibilidade *(ISO 1182 – Fire tests – Building materials: non-combustibility test);* Poder Calorífico *(ISO 1716 –* "*Building materials – Detemination of calorific potencial*"); Densidade ótica da fumaça (*ASTM E 662 - Standard test method for specific optical density of smoke generated by solid materials*).

2.2.2. A resistência ao fogo

A resistência ao fogo é a capacidade dos materiais, elementos e componentes construtivos atenderem, por um período de tempo estabelecido às suas funções de estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico.

Os ensaios de resistência ao fogo podem ser realizados em três diferentes fornos adequados ao elemento ou componente construtivo (*Figuras 2.4 a 2.6*), reproduzindo assim diferentes tipos de exposição, (Pinto e Calil, 2002). Os resultados são usados para avaliar e descrever a resposta dos materiais, produtos ou componentes ao aquecimento sob condições controladas e podem fornecer informações tais como: temperatura no interior da peça, taxa de carbonização, perda de massa, tempo de colapso, entre outras, possibilitando a comparação de desempenho dos elementos construtivos.

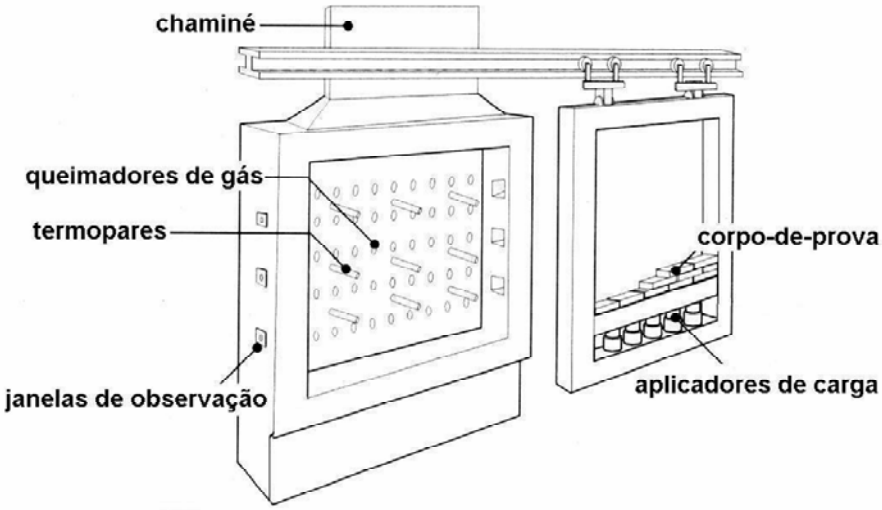

Figura 2.4. Forno de ensaio vertical, para paredes.
Fonte: Canadian Wood Council (1996)

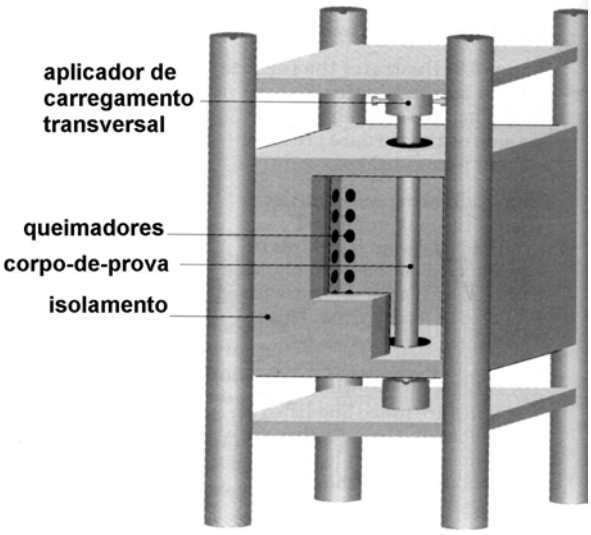

Figura 2.5 Forno de ensaio de pilares
Fonte: Canadian Wood Council (1996)

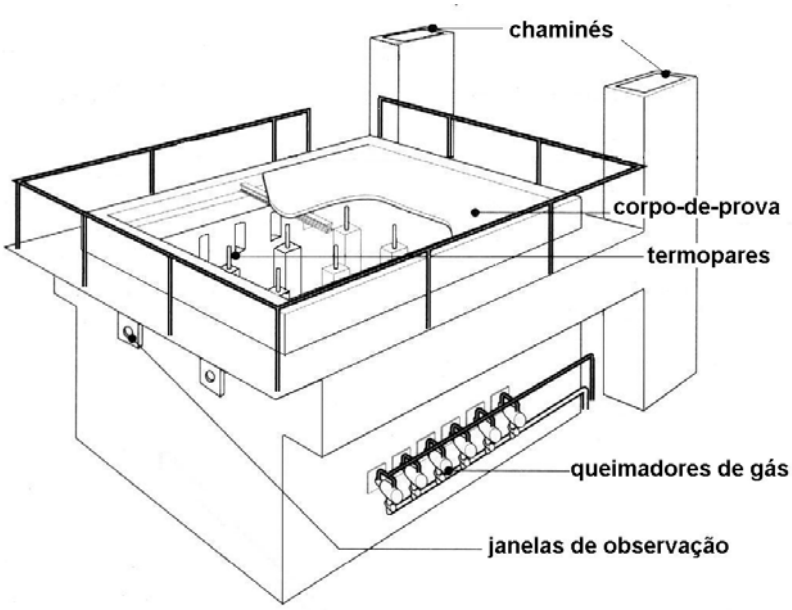

Figura 2.6 Forno de ensaio horizontal, vigas, cobertura e pisos.
Fonte: Canadian Wood Council (1996)

No Brasil há dois fornos capacitados para a realização destes ensaios. Um está alocado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo e outro em Furnas, Centrais Elétricas S.A., Goiás. Estes fornos são ‘a gás e somente o forno do IPT realiza ensaios com aplicação simultânea de carregamento para os ensaios com paredes estruturais. Outra característica destes fornos é o controle manual da elevação da temperatura.

A elevação da temperatura que ocorre em um incêndio é, por simplificação, representada por curvas-padrão. Algumas dessas curvas de aquecimento são propostas por meio de expressões matemáticas, como exemplo: ISO 834 – *Fire resistance tests – elements of building construction,* Equação 2.1, e outras fornecem valores tabelados para elevação da temperatura em função do tempo, como ocorre com a Curva Norte-Americana ASTM E-119 - S*tandard test methods for fire tests of building construction and material,* (Tabela 2.1). Essa curva foi adotada em 1918, provêm de prática de ensaios em pilares e foi proposta pelo UL- Underwriters Laboratory e pelo NBS National Bureau of Standards.

Essa duas curvas-padrão de aquecimento são as mais difundidas.

$$\Theta - \Theta_0 = 345 \log(8t + 1), \qquad (2.1)$$

onde:

Θ = temperatura do forno em um tempo t (°C);

Θ_0 = temperatura inicial do forno (°C) e

t = tempo de exposição (min.).

Tabela 2.1. Curva-padrão Temperatura x Tempo (θ x t) (ASTM E-119, 1995).

Temperatura	Tempo
538 ^{0}C	5min
704 ^{0}C	10 min
760 ^{0}C	15 min
795 ^{0}C	20 min
821 ^{0}C	25 min
843 ^{0}C	30 min
862 ^{0}C	35 min
878 ^{0}C	40 min
892 ^{0}C	45 min
905 ^{0}C	50 min
916 ^{0}C	55 min
927 ^{0}C	1 h
937 ^{0}C	1 h 05 min.
946 ^{0}C	1 h 10 min.
955 ^{0}C	1 h 15 min.

As curvas-padrão (θ x t) são também utilizadas para caracterizar o incêndio, tornando possível o cálculo da temperatura do elemento estrutural em função do tempo de exposição. Há similaridades entre as curvas ISO 834 e a ASTM E-119 (*Figura 2.7)*.

Como todo incêndio é uma ocorrência única, as curvas de incêndios que representem a real circunstância de um são difíceis de serem obtidas, pois se alteram a cada situação estudada. Devido a isso, as curvas de incêndio-padrão passaram por simplificação a serem amplamente adotadas para realização de ensaios e investigação dos diferentes materiais e elementos estruturais, embora não representem o comportamento real do incêndio.

Por não representarem um incêndio real, várias tentativas de alteração das curvas-padrão foram sugeridas. O principal argumento do meio técnico-científico é de que a elevação da temperatura em um incêndio real se processa com maior velocidade.

As curvas-padrão apresentam um ramo ascendente único, admitindo que a temperatura dos gases é sempre ascendente em função do tempo, independente das características do ambiente e da quantidade de material combustível, ex: ISO 834 e ASTM E-119, (*Figura 2.7*).

Existe também curvas-naturais, as quais descrevem com mais realismo a evolução da temperatura durante o incêndio no ambiente compartimentado e com aberturas. Essas curvas são parametrizadas por características do compartimento em chamas, os parâmetros adotados são: grau de ventilação, características térmicas do material constituinte da compartimentação. (Costa e Silva, 2002); (Silva, 2001). Essas curvas possuem um ramo ascendente e outro descendente, correspondente à fase de aquecimento e resfriamento, respectivamente. Ex. SBN (*Swedish Buiding Regulation*) e curvas parametrizadas do Eurocode 1, (*Figura 2.7*).

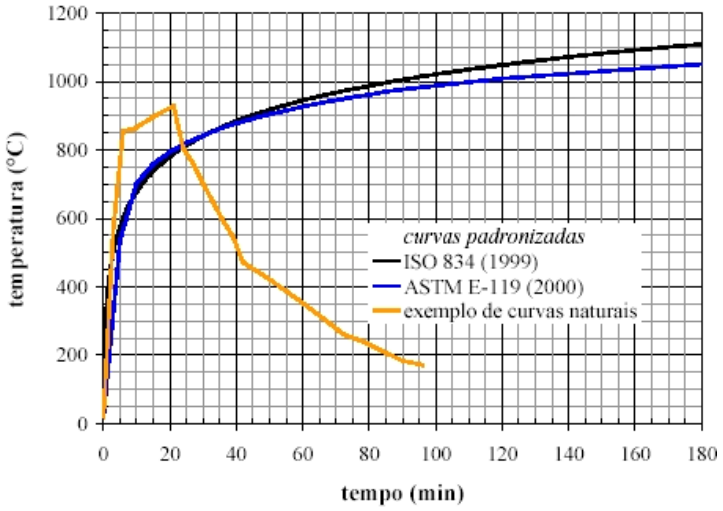

Figura 2.7. Curvas de aquecimento, padronizadas e natural.
Fonte: Costa e Silva (2002).

2.3 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

Diversas publicações tratam da questão da segurança contra incêndio, entre eles o CANADIAN WOOD COUNCIL (1996) e (1997); Buchanan (2002), Silva (2001). No Brasil esta questão ganhou destaque a partir da década de 70, quando ocorreram grandes tragédias urbanas, resultando assim, no surgimento de vários campos de pesquisa na área de segurança contra incêndio e a criação do Laboratório de Ensaios ao Fogo no IPT, os primeiros na área foram conduzidos por: Seito (1988); Souza, (1988).

Publicações nacionais sobre esta questão podem ser consultadas nos seguintes trabalhos acadêmicos, citando Pinto (2001, p.4):

"Seito (1995) aborda a implantação de um método de análise de risco e a importância deste para o conhecimento dos conceitos imbuídos em cada item da segurança contra incêndio e sua influência nos projetos que contemplem as medidas de prevenção e proteção contra incêndio.

Ono (1997) expõe a importância da criação de bancos de dados relativos à segurança contra incêndio, e sua contribuição para o desenvolvimento de sistemas de avaliação de desempenho das edificações em relação à segurança contra incêndio.

Mitidieri (1998) disserta sobre a implantação de uma metodologia de classificação dos materiais em nível nacional, o que seria de grande contribuição para a segurança contra incêndio.

Mitidieri Filho (1998) faz uma avaliação de desempenho estrutural de componentes e elementos construtivos inovadores destinados a habitações. Em meio a abordagem do tema, expõe a necessidade de atualização dos procedimentos de análise de sistemas inovadores adotados pela CEF, no caso particular da exigência de segurança ao fogo, aponta a inadequação das exigências de ensaios e ausência de critérios relativos à reação ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento dos elementos construtivos, da limitação do risco de incêndio e a abordagem sobre a implantação de conjuntos habitacionais."

A segurança contra incêndio é uma ciência. Seus objetivos são: a proteção à vida e a proteção da propriedade. Ela requer, para isto, a integração dos muitos campos da engenharia e das ciências, caracterizando-se pela interdisciplinaridade.

Para atingir estes objetivos foi estabelecido um conjunto de procedimentos denominado sistema de segurança contra incêndio, que consiste de meios ativos e passivos de atuação, (Pinto, 2001). Os procedimentos devem ser selecionados de modo adequado e com base nos riscos iniciais da ocorrência, da propagação e danos resultantes, (Vargas e Silva, 2003). A resistência das estruturas ao fogo se traduz

como um importante componente de proteção passiva dentro do sistema de segurança contra incêndio, (Buchanan, 2004).

Uma estrutura considerada segura em condições de incêndio é aquela que, com ou sem proteção contra incêndio, tem grande possibilidade de resistir aos esforços solicitantes em temperatura elevada, de forma a evitar o seu colapso, (Vargas; Silva, 2003).

A segurança estrutural, visando a proteção à vida é verificada de modo a evitar que a edificação colapse em um tempo inferior ao necessário para a desocupação do edifício. Com relação à proteção ao patrimônio, a segurança estrutural é verificada de forma a evitar o colapso da estrutura para permitir as ações de combate ao incêndio e posterior reabilitação da edificação.

Um edifício seguro contra incêndio é aquele onde há alta probabilidade de que todos os ocupantes sobrevivam sem sofrer injúrias, fácil acesso para ações de combate ao fogo e ainda ofereça segurança às edificações adjacentes, (Berto,1991).

Os códigos construtivos, as normas nacionais e as normas internacionais relacionam exigências de segurança a um tempo associado a temperatura dos gases quentes do ambiente, por meio de uma curva padronizada de incêndio Temperatura x Tempo (θ x t), segundo Silva (2001), Kirchhof (2004), Pinto (2001).

Na madeira, a ação térmica provoca a degradação por combustão de seus componentes químicos, liberação de gases inflamáveis e formação do carvão. Como conseqüência ocorre a diminuição das propriedades de resistência e rigidez na madeira aquecida sob a base carbonizada e redução da seção resistente do elemento estrutural devido a formação do carvão.

Para o estudo da madeira exposta ao fogo, as propriedades intrínsecas, a saber: densidade, teor de umidade, orientação da grã, composição química, permeabilidade, condutividade térmica, juntamente com as propriedades de resistência e rigidez, são de grande influência em seu desempenho. Há ainda os fatores extrínsecos à madeira que influenciam seu comportamento quando exposta a um incêndio, tais como: temperatura de exposição ao fogo, duração da exposição e a ventilação no ambiente, segundo White e Nordeheim (1992), Schaffer (1967), White e Dietenberger (1999).

A relação entre a taxa de carbonização e a resistência ao fogo é observada por normas de dimensionamento de estruturas de madeira, tal como o Eurocode 5: *Design of timber structures, Part 1-2* (2002), que considera a atuação do fogo prevendo que a estabilidade das estruturas deve ser verificada pela combinação das ações nela aplicadas, levando em conta a redução da seção transversal e conseqüente perda da área resistente. A estrutura entrará em colapso quando o esforço atuante superar o esforço resistente.

2.3.1 A redução de propriedades na seção remanescente

Além da redução da seção resistente, outro fator contribui para que o elemento estrutural de madeira perca sua capacidade de carregamento em situação de incêndio: a redução das propriedades mecânicas. O Eurocode 5, considera essa redução na ordem de 20% em relação à madeira intacta.

A redução da capacidade resistente é estimada com base em modelos empíricos e teóricos, (Buchanan, 1999), assumindo-se a seção remanescente como um material homogêneo ou como um composto de camadas com diferentes propriedades, em função dos gradientes térmicos internos, o que decorre na diminuição da resistência e da rigidez da camada aquecida sob a camada carbonizada.

A redução da capacidade resistente foi constatada por Almeida e Sanches (1998) ao estudar a madeira de ipê, jatobá e pinus (3,00 cm x 3,00 cm x 9,00 cm) notando que a temperaturas superiores a 300°C, a resistência da madeira sofre redução significativa devido à carbonização, precedida de um considerável aumento da resistência à compressão no intervalo de temperatura de 100°C a 170°C.

Vital et al (1983) estudando amostra de *E. Saligna* com dimensões de (2,00 cm x 2,00 cm x 30,00 cm) em uma combinação de diferentes temperaturas: 105 ^{o}C, 130 ^{o}C e 155 ^{o}C, com diferentes tempos de aquecimento: 10h, 20h, 30h, 40h,80h e 160 horas, observou o aumento das propriedades de resistência da madeira nos períodos iniciais de exposição. Contudo, a combinação do aumento da temperatura e do tempo de exposição ocasionou a redução da resistência a temperaturas superiores a 130 ^{o}C, onde o efeito se mostrou linear e a 155 ^{o}C, onde o efeito se mostrou quadrático.

Para explicar esse comportamento, os autores atribuem a melhora inicial da resistência à aproximação entre os elementos estruturais da parede celular e entre os componentes anatômicos em decorrência da contração volumétrica da madeira com a elevação da temperatura e perda de água. Além disso, consideraram o aumento na proporção cristalina da madeira, que possui comportamento mais estável.

Buchanan (1999) apresenta uma combinação de resultados experimentais conduzidos por diversos autores sobre a redução de resistência e módulos de elasticidade da madeira com a elevação da temperatura. Esses ensaios de compressão paralela às fibras foram realizados na mesma faixa de temperatura utilizada por Almeida e Sanches (1998), mas em outras espécies de madeira, a saber, abeto (*Piceas abies*) e pinus, (*Figuras 2.8 e 2.9).*

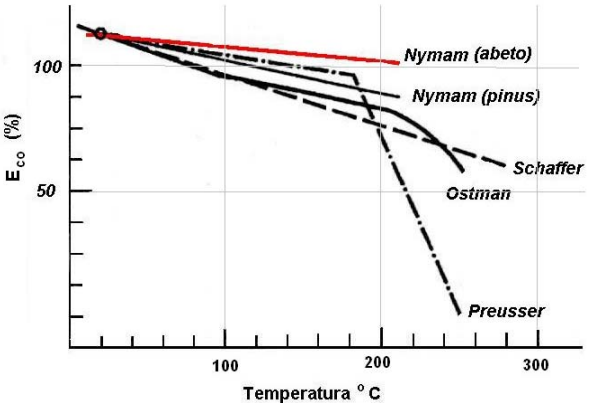

Figura 2.8 Efeito da temperatura no Módulo de Elasticidade da madeira, paralelo a grã. Fonte: Buchanan (1998)

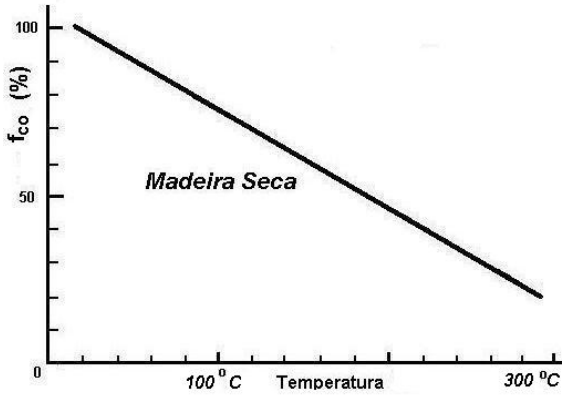

Figura 2.9 Efeito da temperatura na resistência a compressão paralela a grã. Fonte: Buchanan (1998)

Para o Módulo de Elasticidade, (*Figura 2.8)* mostra que, embora existam variações nos resultados experimentais, principalmente nos resultados de Preusser, fica evidente a perda linear de elasticidade que se acentua a partir dos 200°C. A resistência à compressão paralela a grã para a madeira seca mostra igualmente uma perda linear, (*Figura 2.9).*

Bin et al (2002), estudando peças fletidas de *Pinus radiata* expostas ao aquecimento padronizado e a elevação do teor de umidade, observou que para temperaturas superiores a 60°C a redução do módulo de elasticidade é maior que a temperaturas inferiores, sob as mesmas condições.

Visando compensar a perda de resistência, redução do módulo de elasticidade e o efeito do arredondamento dos cantos, (*Figura 2.10),* algumas normas adotam taxas de carbonização com valores elevados, algumas superiores a 1,0 mm/min, Konig (1999), enquanto os valores adotados pelo Eurocode 5 (2002) são 0,8 mm/min. para coníferas e 0,55 mm/min. para folhosas, *Tabela 2.2.*

O Eurocode 5 (2002) faz uma distinção entre a taxa de carbonização unidimensional ou taxa de carbonização básica (β_0) e a nominal (β_n) que considera o efeito da transferência de calor próximo às quinas da seção, *Tabela 2.2.*

β_0 é obtido por meio da observação sob condição de exposição ao fogo padronizada onde somente uma das faces é exposta. Quando vigas são expostas ao fogo, ocorre o arredondamento dos cantos e para simplificar os cálculos das propriedades da seção (área, módulo de seção e momento), uma taxa de carbonização nominal β_n é assumida incluindo o efeito de arredondamento.

Tabela 2.2. Taxa de carbonização projetada para espécies de madeira coníferas e folhosas.

Material	ρ_{ap} (kg/m^3)	β_n (mm/min)	β_0 (mm/min)
Madeira serrada estrutural de espécie conífera	≥ 290	0,8	0,65
MLC de espécie conífera	≥ 290	0,7	0,65
Madeira serrada estrutural ou MLC de folhosa	≥ 290	0,7	0,65
Madeira serrada estrutural ou MLC de folhosa	≥ 450	0,55	0,50

Fonte: Eurocode 5 (2002)

ρ_{ap} – densidade aparente
βn - taxa de carbonização nominal, considerando o arredondamento da seção remanescente
β_0 – taxa de carbonização unidimensional
MLC – Madeira Laminada Colada.

Figura 2.10 Seção carbonizada de uma MLC, em exposição ao fogo por 30 minutos, taxa de carbonização de 0,6 mm/min.

Alguns códigos ignoram a redução da resistência abaixo da camada carbonizada (Nova Zelândia) o que pode trazer resultados inseguros, especialmente para elementos de pequena seção, Buchanan (1999). O Eurocode 5 (2002), assume que todas as peças de madeira têm perda de resistência abaixo da camada carbonizada, que é expressa por um fator de redução que depende do perímetro e da área da seção transversal da peça exposta ao fogo, ou seja, fator de massividade.

2.3.2 O efeito de arredondamento

Durante a exposição ao incêndio, a queima da seção de um elemento estrutural de seção retangular se processa com maior velocidade nos cantos da peça resultando em um arredondamento (*Figura 2.10*).

Para o Eurocode 5, o cálculo estrutural é realizado de dois modos: 1) se a taxa de carbonização adotada for β_0 (unidimensional), o efeito do arredondamento da quina da seção não está incluso, sendo necessário um cálculo a parte; 2) se a taxa de carbonização adotada for β_n (taxa de carbonização nominal) o arredondamento dos cantos, já é considerado e o raio do arredondamento é considerado igual a espessura da camada carbonizada.

2.4 A TAXA DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

Estudos sobre a taxa de carbonização da madeira, tanto folhosa como conífera, exposta a curvas de aquecimento padronizadas, vêm sendo realizados por pesquisadores de diferentes países como Estados Unidos: Schaffer (1967), White (1988), Suécia: König (1999), Austrália: Gardner (1991)[1] apud Njankouo et al (2004), Nova Zelândia e Malásia.

Para a madeira serrada e MLC de uso estrutural, os valores de taxa de carbonização geralmente usados nos EUA e Canadá é de 0,635 mm/minuto. A taxa de 0,60 mm/minuto foi utilizada como base no desenvolvimento dos atuais procedimentos de cálculo para elementos estruturais de madeira, Lie[2] (1977) apud White (2000); TR10 (1983).

Os modelos assumidos pelas normas, Eurocode 5 (2002) e AS 1720.4 (1990) admitem uma taxa de carbonização que decresce linearmente com o tempo. O Eurocode fixa valores tabelados (ver Tabela 2.3) para as taxas em função da densidade da madeira, enquanto a Norma Australiana propõe a Equação 2.2 para o cálculo da taxa de carbonização:

Tabela 2.3. Taxa de carbonização para cálculo de projetos de madeira, β_0 e β_n (Eurocode 5, 2002)

Especificação	Material	β_0 (mm/min.)	β_n (mm/min.)
coníferas	MLC, densidade of ≥ 290 kg/m^3	0.65	0.7
	Madeira serrada, densidade ≥ 290 kg/m^3	0.65	0.8
folhosas	Madeira serrada ou MLC, densidade ≥ 290 kg/m^3	0.65	0.7
	Madeira serrada ou MLC, densidade ≥ 450 kg/m^3	0.5	0.55

β_0 taxa de carbonização básica para exposição em uma dimensão;
β_n taxa de carbonização nominal, incluindo o efeito de arredondamento das quinas e aparecimento de frestas;
MLC Madeira Laminada Colada.

[1] GARDNER, W. D; SYME (1991) Charring of glued-laminated beams of eight australian-grown species and effect of 13 mm gypsum plaster board protection on their charring. Technical report n. 5. Sydney.
[2] Lie, T.T. (1977). A method for assessing the fire resistance of laminated timber and columns. Can. J. of Civil Eng. 4:161-169.

$$\beta = 0{,}4 + \left(\frac{280}{\rho_{12}}\right)^2, \qquad (2.2)$$

onde:

β é a taxa de carbonização (mm/min.);

ρ_{12} é a densidade aparente a 12% de umidade (kg/m^3).

Estudos conduzidos para diferentes espécies conforme apresentado na *Tabela 2.4*, resultaram em diferentes expressões matemáticas para traduzir a velocidade de carbonização da madeira, *Tabela 2.5.*

Tabela 2.4 Estudos sobre Taxa de Carbonização realizados até o ano de 1967.

Autores	Características
Beker, 1919	Madeira: 117 espécies australianas, seção 1,27cmx1,27cmx15,24 cm, carregamento central.
Bryan e Knight, 1936	Madeira: *Beech, White Oak, Sitka Spruce* seção de 12,7cmx12,7cmx1,27cm. Carregamento central, u = 10 a 12%.
Bryan e Doman, 1940	Madeira: 85 espécies, Britânicas e de outras origens. Seção de 12,7cmx12,7cmx1,27 cm.
Petterson, 1965	Madeira: *Oak, Teak.*
Schaffer, 1966	Madeira: *white oak, white pine, cypress, chestnut, red oak, birch, sugar maple, sugar pine, basswood, southern pine*. Tábuas com espessura de 2,54 cm a curva padronizada de aquecimento.
Thomas, 1967	Madeira: *Western Henlock, Wesstern Red Cedar, Podo, Douglas-Fir, Larch, Abura,Makore, Ash.* Seção de 15cmx15cmx2,5 cm, madeira seca (u =0%).

Fonte: White (1988); Schaffer (1977).

Tabela 2.5 Modelos matemáticos para a velocidade de carbonização da madeira.

Autores	Características	Modelos
Lawson, Webmester; Aston, 1950.	Madeira: Spruce Vigas com seção 38x50 mm, u=12%, ASTM E 119.	$\frac{\partial x}{\partial t} = 1{,}041^{-0{,}2}$ t é o tempo; x é a localização da frente de carbonização.
Vorreiter, 1956.	Madeira: Spruce Placas de seção 10 mm de espessura.	$x = 0.345 \frac{t^{1,3}}{\rho - \rho_c}$ t é o tempo; x é a localização da frente de carbonização; ρ densidade da madeira; ρ_c densidade do carvão.
Schaffer, 1967.	Madeira Douglas-fir, southem pine e *White oak.* MLC com 75mm de espessura , u = 6 a 18%, exposição a ASTM E 119.	$t = [(2{,}27 + 0{,}046u)\rho + 0{,}33]x$ t é o tempo; x é a localização da frente de carbonização; ρ densidade da madeira;
White, 1988.	Madeira Engelm spruce; Western red cedar; Southern pine; Redwood; Hard maple; Yellow poplar; Red oak e Brasswood, MLC com 63 mm de espessura , u =6 a 16%, exposição a ASTM E 119.	$\ln(m) = -1{,}7418 + 0{,}8485 f_{car} + 0{,}9388\rho + 0{,}002u$ t é o tempo; x localização da frente de carbonização; ρ densidade da madeira; u teor de umidade; f_{car} fator de contração do carvão.

Fonte: White (1988)

Os trabalhos experimentais feitos por Lawson, Vorreiter, Schaffer e White, resultaram em modelos empíricos similares entre si para descrever a taxa de carbonização da madeira, estes modelos apresentam o seguinte formato (Lau et al,1999):

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \eta_1 t^n \text{ ou} \tag{2.3}$$

$$x = \eta_2 t^n . \tag{2.4}$$

onde:

x = localização da frente de carbonização;

$\frac{\partial x}{\partial t} =$ taxa instantânea do avanço da carbonização;
η_1 e η_2 = constantes de regressão.

Os expoentes (n) determinam:
n>0 ocorre aumento da carbonização;
n=0 a carbonização é constante;
n< 0 a carbonização diminui.

O modelo proposto por White (1988), incorporando parâmetros adicionais, tais como: permeabilidade e o fator de contração do carvão é derivado das equações 2.3 e 2.4.

Pesquisas conduzidas por White et al (1992), Schaffer (1967), White (1988) demonstraram que as propriedades da madeira (densidade, teor de umidade, permeabilidade, anatomia) afetam a taxa de carbonização. Como resultado de suas investigações sobre a taxa de carbonização de oito espécies de madeira norte americanas, White (1988) concluiu que as duas mais importantes propriedades que influenciam a taxa de carbonização da madeira são: a densidade e o teor de umidade.

Schaffer (1967) e White (1988) relacionaram em seus estudos a temperatura característica à fase de transição da carbonização na madeira, (288°C ou 550° F) como meio para definir a velocidade de avanço do carvão usando leituras de temperaturas fornecidas por termopares posicionados no interior da peça e adotando a superfície inicial exposta como referência.

O modelo empírico linear para a velocidade de carbonização da madeira desenvolvido por Schaffer, baseado em três espécies: white oak (*Quercus spp.*), douglas fir e southern pine (*Pinus spp.*), com teor de umidade de 15%, White (1995), White (1988), Equação 2.5:

$$t = mx_c, \qquad (2.5)$$

onde:

t = tempo em minutos;
x_c = espessura da camada carbonizada a partir da superfície original;
m = taxa de carbonização.

$$m = \left[(28{,}726 + 0{,}0578u)\rho + 4{,}187\right] + 0{,}079, \quad \text{(douglas fir)} \qquad (2.5.1)$$

$$m = \left[(5{,}832 + 0{,}120u)\rho + 12{,}862\right] + 0{,}079, \quad \text{(Southern pine)} \qquad (2.5.2)$$

$$m = \left[(20{,}036 + 0{,}403u)\rho + 0{,}403\right] + 0{,}079, \quad \text{(white oak)} \qquad (2.5.3)$$

onde:

u = teor de umidade (%);
$\rho =$ densidade (kg/m^3).

Posteriormente Robert White, fundamentado no estudo empírico desenvolveu um modelo não-linear e unidimensional para a taxa de carbonização válido para peças de grandes dimensões, baseado em 8 espécies: Engelm spruce (*Picea engelmannii)*; Western red cedar (*Thuja plicata*); Southern pine (*Pinus sp*.); Redwood (*Sequoia sempervirens*); Hard maple (*Acer sp*.); Yellow poplar (*Liriodendron tulipifera*); Red oak (*Quercus sp*.) e Brasswood (*Tília sp*.), quatro coníferas e quatro folhosas. Nesta pesquisa foi utilizado um planejamento fatorial 2^3 para a determinação do parâmetro deslocamento do carvão em função do tempo.

A análise de regressão das propriedades da madeira foi usada para se obter o modelo de taxa de carbonização originando as seguintes equações:

$$t = mx_c^a \,, \tag{2.6}$$

ou:

$$t = mx_c^{1,23} \,, \tag{2.7}$$

$$\ln t = \ln m + 1{,}23 \ln x_c \,, \tag{2.8}$$

onde:

t é tempo de carbonização em minutos;

x_c é a espessura do carvão medido a partir da superfície original da seção (mm);

m parâmetro a ser estimado tanto para folhosas como para coníferas.

O parâmetro $\ln m$ estimado por regressão da Equação 2.8, foi utilizado para relacionar as propriedades da madeira com a taxa de carbonização onde as seguintes variáveis foram incorporadas ao modelo, resultando na Equação 2.8.1:

$$\ln m = 1{,}3349\rho - 0{,}009887\rho d + 0{,}1176c - 0{,}00387cd + 0{,}01717u - 1{,}2521 \,, \tag{2.8.1}$$

Ou relacionando ao fator de contração do carvão:

$$\ln m = 0{,}8485 f_{car} + 0{,}9388\rho + 0{,}0197u - 1{,}7418 \,, \tag{2.8.2}$$

onde:

$\ln m$ é o parâmetro a ser estimado;
ρ é a densidade aparente (kg/m^3);
d é a permeabilidade (tratabilidade);
c são as espécies, conífera e folhosa;
u é o teor de umidade (%);
f_{car} é o fator de contração do carvão. Parâmetro obtido por meio da razão da espessura do carvão residual pela espessura da camada carbonizada, tendo como referência a superfície original.

Um dos modelos desenvolvidos para o fator de contração do carvão foi:

$$f_{car} = 0{,}00423d + 0{,}203c - 0{,}00164cd - 0{,}270\rho c + 0{,}732 \,, \qquad (2.8.3)$$

Neste trabalho, onde White considerou e avaliou a influência de diferentes propriedades da madeira associadas a quatro diferentes modelos de deslocamento, dois parâmetros foram determinados: (m) e (a), sendo este último assumido como constante. White conclui que a Equação 2.6, representa adequadamente o comportamento não-linear da carbonização da madeira, como é possível constatar fazendo uso da análise de adequação do modelo proposto utilizando a técnica de análise dos resíduos em relação às variáveis independentes.

As (*Figuras 2.11 e 2.12*) demonstram que a variância é constante e que não existe correlação entre os resíduos e as variáveis independentes, o que se observa pela dispersão uniforme dos pontos em torno do zero.

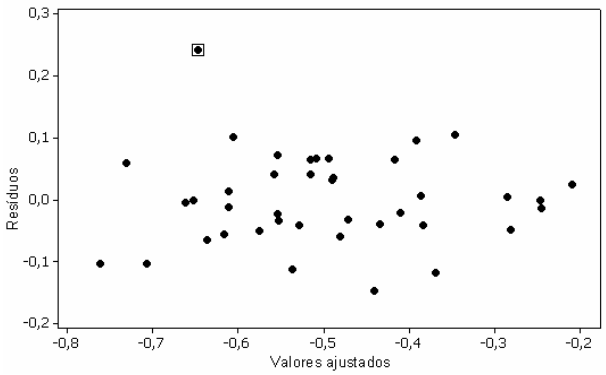

Figura 2.11 Gráfico dos resíduos contra valores ajustados ($\hat{y}_i$)

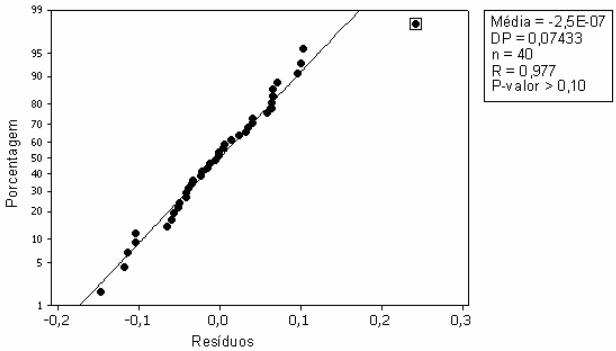

Figura 2.12 Gráfico de probabilidade normal dos resíduos

A *Tabela 2.6* apresenta valores comparativos para taxas de carbonização obtidas dos modelos linear e não-linear de coníferas e folhosas, para fins comparativos dos valores. Como é notório, o valor obtido da equação não-linear se mostra próximo de valores recomendados pelo Eurocode 5 (2002) e por Lie (1997).

Tabela 2.6 Taxa de carbonização para algumas espécies de madeira Norte-Americanas de coníferas e folhosas, obtidas por meio de ensaio padronizado ASTM E - 119 (1995).

Espécies	ρ (g/cm^3)	f_{car}	Taxa de Carbonização Linear (min./mm) (1)	Taxa de Carbonização Não-Linear (min./ mm^{1,23}) (2)
Southern Pine	0,51	0,6	1,24	0,56
Western red cedar	0,31	0,83	1,22	0,56
Oak, red	0,66	0,70	1,59	0,72
Yellow poplar	0,50	0,67	1,36	0,61

Fonte: Woodhandbook (1999).

(1)conforme equação (2.5)

(2)conforme equação (2.7)

Os modelos apresentados são apropriados a peças de madeira com dimensão estrutural. Considerando a afirmação de Lau et al (1998), é errônea utilização da taxa de carbonização estabelecida para peças estruturais na avaliação de elementos de madeira serrada de pequena dimensão, isto porque, quando a madeira de consideráveis dimensões, madeira estrutural (*heavy timber*), Tabela 2.7, é exposta a uma curva padronizada, a taxa de carbonização, no início de exposição, é normalmente elevada, e se estabiliza a uma taxa constante após a formação dos primeiros milímetros de carvão. Por isso, a exclusão dos dados iniciais não-lineares é um modo de aproximação razoável para a madeira serrada estrutural. No entanto, para a madeira de pequenas dimensões, os primeiros milímetros de carbonização representam

significante porção da área total da seção transversal e, portanto, assumir uma carbonização constante não é apropriado.

Tabela 2.7*Heavy Timber*, dimensões mínimas dos elementos construtivos

Localização	Elemento estrutural	Madeira serrada. mm	MLC mm	Madeira roliça (∅ mm)
Cobertura	colunas	140x191	130x190	180
	Arcos apoiados sob paredes	89x140	80x152	
	Vigas e tesouras	89x140	80x152	
	Arcos apoiados no piso ou próximo	140x140	130x152	
Piso, Piso/cobertura	colunas	191x191	175x190	200
	Vigas, arcos, tesouras	140x241 ou 191x191	130x228 ou 175x190	

Fonte: CANADIAN WOOD COUNCIL (1996). Fire safety design in building, p.33 apud NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA (1990). *National building code of Canada.* Ottawa, NRCC.

Pesquisas envolvendo a carbonização da madeira têm usado basicamente dois procedimentos experimentais de aquecimento para conduzir os ensaios: a) exposição a fluxos constantes de calor e b) curvas de temperatura-tempo padronizadas.

2.4.1 Tipos de Exposição

Existem dois métodos bastante difundidos para a exposição do elemento a ser ensaiado:

Exposição a fluxos constantes

A exposição em fluxo constante consiste em que as amostras sejam submetidas a fluxos de calor constantes, tanto em grandes fornos para ensaios em peças estruturais, (*Figura 2.9)* como em pequenos fornos para ensaio com peças de dimensão reduzida, como exemplifica a (*Figura 2.10*). Normalmente estes fluxos de exposição variam de 25 kW/m^2 a 75 kW/m^2.

Exposição por curva de aquecimento padronizada por norma

A exposição por curvas Temperatura-Tempo padronizadas, tais como a ASTM E119 (1995) e a ISO 834. No Brasil, a curva de aquecimento é prevista na NBR 5628 - Componentes construtivos estruturais, determinação da resistência ao fogo-método de ensaio (1980), entre outras normas.

Os experimentos são realizados em grandes fornos nos quais elementos estruturais são submetidos a carregamento. Estes fornos para a realização de ensaios de

resistência ao fogo possuem três formatos para atender a disposição construtiva dos elementos ou sistemas estruturais, a saber, lajes, vigas e colunas, visto que com base nestas normas são também realizados ensaios para determinação da resistência ao fogo de elementos, sistemas construtivos e materiais, (Pinto e Calil, 2002).

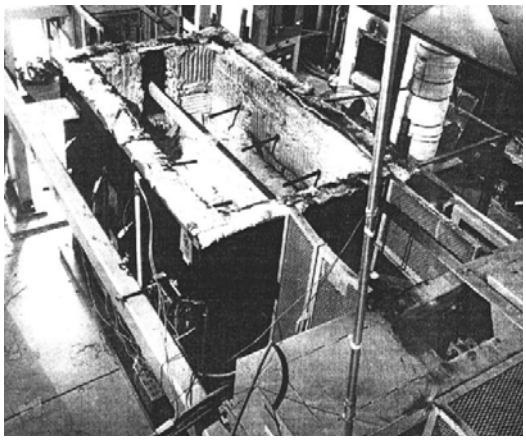

Figura 2.13 Forno horizontal a gás para realização de ensaio de resistência ao fogo sob flexão. Fonte: White (1990).

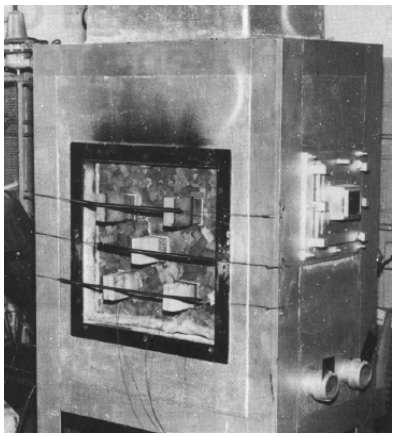

Figura 2.14 Forno vertical a gás para ensaios com amostras de pequenas dimensões. Fonte: White e Schaffer (1981).

Os experimentos de carbonização são feitos usualmente em vigas com seção retangular, portanto os fornos horizontais são mais adequados neste caso, (*Figura 2.13*). Quando se tratam de peças de pequenas dimensões, normalmente são utilizados fornos menores, (*Figura 2.14*).

2.5 A DEGRADAÇÃO TÉRMICA DA MADEIRA

Trabalhos realizados por Kanury[3] et al (1970) apud White (1988); Williams (1974); Browne (1958), Kollmann (1968), Steward (1974) colaboram para a compreensão da combustão da madeira e dos fatores envolvidos: difusão de vapores internos, convecção interna, propriedades da madeira parcialmente carbonizada, convecção externa, cinética da pirólise, taxa de carbonização externa, tempo de aquecimento, propriedades da madeira, fluxo de calor e gases.

3

Kanury, M. A.; Bkackshear, Jr. (1970). On the conbustion of wood II: Influence of internal convection on the transient pyrolysis of cellulose. In: Conbustion science and technology, 2, 5-9.

Combustíveis sólidos, como a madeira, são fontes compactas de armazenamento de energia, que passam por um processo de gaseificação para alimentar as reações de combustão. Exceção a esse comportamento ocorre com a combustão incandescente da madeira, quando o oxigênio se difunde para a superfície e a combustão ocorre na interface sólido-gasosa, (Williams,1974).

O maior desafio ao se realizar a análise teórica da combustão da madeira e a formulação de um modelo matemático reside no complexo processo químico e físico, bem como na aquisição de dados confiáveis para esta análise, Roberts[4] (1971) apud White (1988).

Williams (1974) considera que a obtenção de equações descrevendo os fluxos gasosos oferecem menores obstáculos que as equações necessárias para descrever a fase condensada onde as moléculas estão em interação com as de entorno. Considera que na zona de pirólise, a produção endotérmica de gás modifica a equação de energia e que na zona de carbonização dois sistemas devem ser considerados: 1) a transferência de calor entre o gás e o carvão e 2) a oxidação exotérmica e superficial do carvão.

Os modelos para a carbonização da madeira são baseados na equação de conservação de energia, os quais incluem termos para cada contribuição ao balanço interno de energia, Equação 2.9, White (1988).

$$\lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - q \frac{\partial m}{\partial t} = \rho C_W \frac{\partial \theta}{\partial t}, \qquad (2.9)$$

onde:

λ condutividade térmica;
θ temperatura ;
x localização da frente de carbonização;
m massa de produtos voláteis;
t tempo;
q calor de pirólise;
C_w calor específico da madeira;
ρ densidade.

Para que a madeira entre em combustão é preciso que ocorram simultaneamente as fases descritas a seguir, (Aguillar,1986):

[4] Roberts, A. F. (1970). “A review of kinetics data for the pyrolysis of wood and related substances. “ Combustion and Flame, 14, 261-272

- A madeira é aquecida até o ponto de decomposição;
- A madeira se decompõe em gases inflamáveis;
- A chama se propaga por meio dos gases inflamáveis.

As fases de degradação térmica da madeira são expressas por alguns autores por meio de faixas de temperaturas, como em Timber engineering steep I (s/d); Browne (1958); Enciclopedia of chemical technology (1998); Jankowsky (1986); Rowell,(1991); Williams (1974), IPT (1986), Juneja (1975); ocorrendo por vezes diferenças entre os valores de algumas faixas. No entanto, as variações são mínimas e os processos envolvidos não apresentam variações significativas.

Browne (1958) descreve as etapas seqüenciais da pirólise; na qual a madeira é aquecida em atmosfera inerte, e da combustão onde a madeira é aquecida em exposição ao ar; dividindo-as em 4 zonas ou regiões delimitadas por faixas de temperaturas. Esta classificação permite notar que há grande similaridade entre as etapas da pirólise e da combustão, o que possibilita relacionar as propriedades da madeira ao processo de combustão. Tais zonas são descritas a seguir:

2.5.1 Degradação térmica por pirólise

A degradação térmica ocorre na ausência de oxigênio.

Até os 200^{0}C, zona A

A camada superficial de madeira se desidrata, libera calor e CO_2, ácidos acético e fórmico e glioxal, mas basicamente água.

200^{0}C a 280 ^{0}C, zona B

A deterioração da camada superficial se desloca para o interior da madeira. Essa região é sucedida por uma camada na qual a pirólise se processa lentamente. São liberados vapores d'água, ácido fórmico e acético, glioxal, pequenas quantidades de CO e vapor d'água adicional da região superficial. A grande maioria das reações é endotérmica e os produtos gasosos não são combustíveis. Faixa característica da decomposição das hemiceluloses ou polioses, os primeiros constituintes da madeira a se decompor, seguidas da celulose a uma faixa de 240 a 350 ^{0}C, ocorre lenta formação de carvão.

280^{0}C a 500 ^{0}C, zona C

Ocorrem reações exotérmicas com a liberação de gases combustíveis e alcatrão que se apresenta como fumaça, o resíduo desta terceira região é o carvão. Faixa característica da decomposição da lignina.

Acima de 500 ^{0}C, zona D

Se a temperatura se mantiver em elevação a carbonização se completa. Reações secundárias, nas quais produtos gasosos e alcatrões são cada vez mais liberados das zonas internas da madeira favorecem a formação de produtos altamente combustíveis. Por exemplo, CO_2 e vapores d'água reagem com carbono e formam CO, H e formaldeído.

2.5.2 Degradação térmica por combustão

Ocorre na presença de oxigênio.

Até 200 ^{0}C, zona A

Ao ser aquecida a madeira libera inicialmente vapor de água e gases, (*Figura 2.15)* perdendo massa de modo uniforme se o aquecimento for lento, pirólise lenta, (*Figura 2.16).* A temperaturas acima de 95^{0}C a madeira carboniza. A madeira nessa zona normalmente não igniza.

Figura 2.15. Liberação de vapores e gases, pirólise.

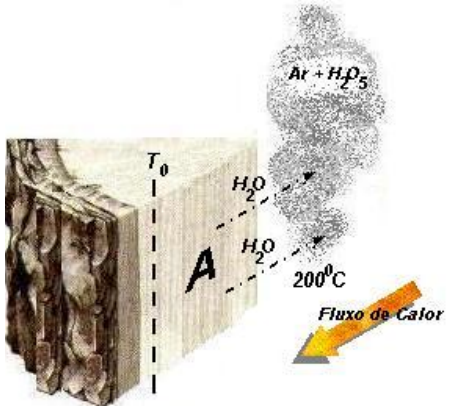

Figura 2.16. Reações de combustão, zona A, pirólise lenta.

200^{0}C a 280^{0}C, zona B

Mesmo que os gases rapidamente liberados não ignizem de imediato, uma condição exotérmica é atingida a temperaturas menores que na degradação térmica por pirólise. A temperatura na qual as reações se tornam exotérmicas é considerada em muitas definições como o ponto de ignição da madeira. Ocorrem vários registros desta temperatura: 235^{0}C a 240^{0}C, 232^{0}C a 260^{0}C, 192^{0}C a 220^{0}C, esta variação se deve ao tempo e a temperatura envolvida na ignição a baixas temperaturas. Esta fase é conhecida como Pirólise rápida (*Figura 2.19*).

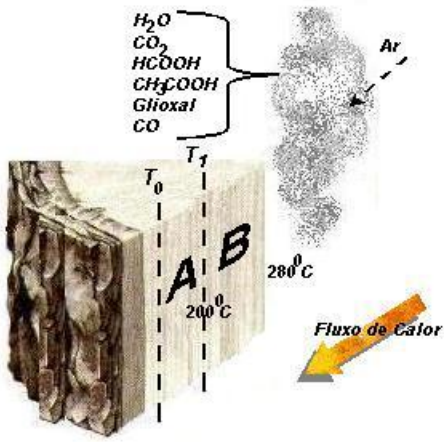

Figura 2.17. Reações de combustão, zona B, pirólise rápida.

280^0C a 500^0 C, zona C

Ocorre grande liberação de gases ricos em CO_2 e vapor d'água suficientes para manter a chama, (*Figura 2.18)* rapidamente estes gases se tornam mais combustíveis como resultado da pirólise secundária, (*Figura 2.19)*. Neste estágio ocorre a combustão flamejante de fase gasosa e exterior à madeira. Os gases liberados se misturam ao oxigênio do ar a uma certa distância da superfície da madeira até atingirem proporções de misturas que permitam sua ignição ao serem expostos a uma chama piloto.

A liberação rápida de gases forma um recobrimento sobre a superfície da madeira, a quantidade de oxigênio é reduzida e o carvão formado não consegue carbonizar, seu acúmulo retarda a penetração do calor, adiando a chegada do ponto exotérmico para as camadas internas da madeira, A e B.

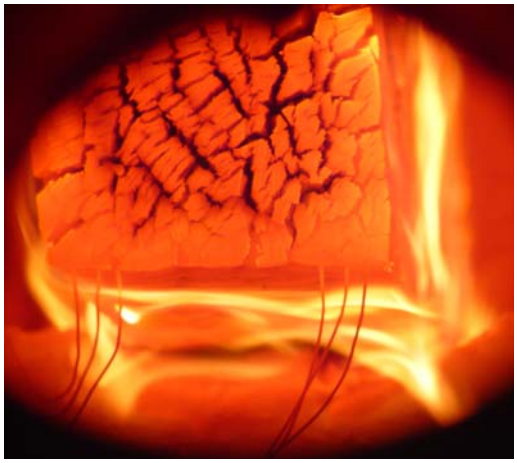

Figura 2.18. Combustão flamejante.

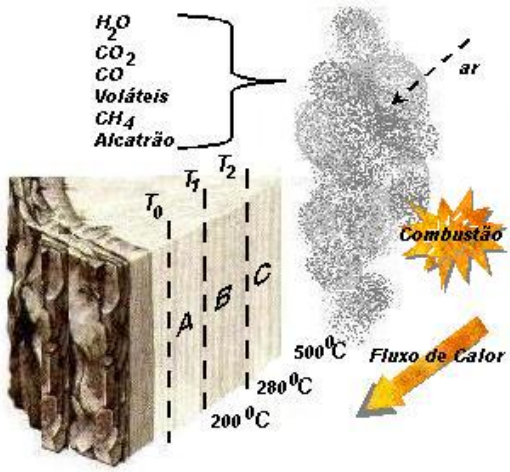

Figura 2.19. Reações de combustão, zona C, combustão flamejante.

Nesta fase além da formação de monóxido de carbono, metano, metanol, formaldeído, ácido fórmico e acético e hidrogênio, são também liberados alcatrões altamente inflamáveis, conduzidos para fora do corpo sólido por meio dos gases e vapores, formando uma suspensão de gotículas chamada fumaça. Nesta fase a perda de massa é da ordem de 70% em relação a massa original.

Acima de 500^{0}C , zona D

A 500^{0}C o carvão incandesce, (*Figura 2.20)* e se consome. No interior da madeira permanecem as zonas de temperatura nas zonas A,B e C. Quando a temperatura da superfície atinge aproximadamente 1000^{0}C o carbono é rapidamente consumido na superfície e as regiões de degradação penetram na madeira. As chamas desaparecem dando lugar a queima luminosa do monóxido de carbono e hidrogênio, combustão incandescente. Enfim, o carvão remanescente brilha com pouca ou nenhuma chama, (*Figura 2.21).*

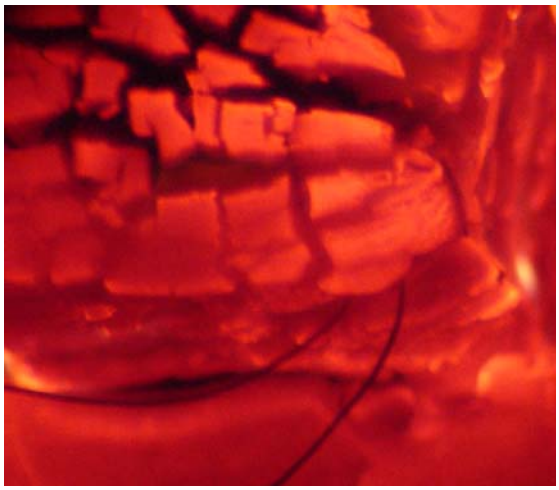

Figura 2.20. Combustão incandescente.

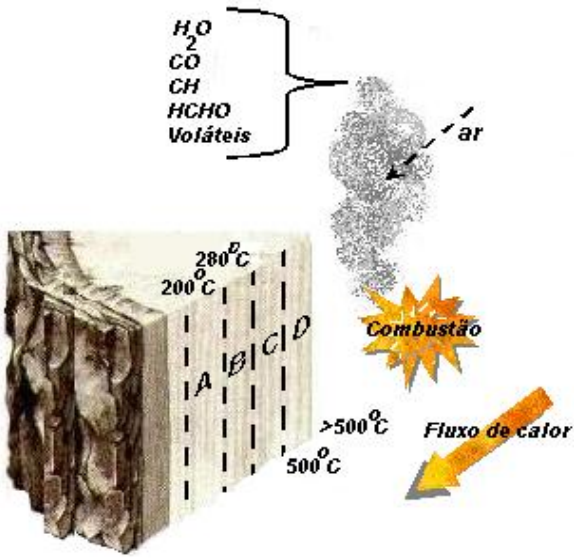

Figura 2.21. Reações de combustão, zona D, acima de 500^{0}C.

A combustão incandescente do carvão é um processo de fase sólida essencialmente independente do processo de combustão flamejante de fase gasosa. Segundo, Browne (1958):

$$C + \tfrac{1}{2} O_2 = CO + 26{,}43 kcal / mol; \quad (2.10)$$

$$CO + \tfrac{1}{2} O_2 = CO_2 + 67{,}96 kcal / mol. \quad (2.11)$$

Uma reação primária e incompleta ocorre na interface entre o carvão e o ar, menos exotérmica quando comparada a fase 2 (Equação 2.11), reação secundária que ocorre na fase gasosa e libera duas vezes e meia mais calor que a fase primária.

Estudos utilizando Análise Térmica Diferencial (DTA), realizados por Beall[5] et al (1970) apud Steward (1974) apresentam as mesmas características gerais com relação a pirólise, embora os resultados da DTA variem em função das espécies: uma região endotérmica começando abaixo de 100^0C que atinge seu ponto máximo entre 250^0C a 300^0C, seguido por uma região exotérmica até os 450^0C a 500^0C. As análises termogravimétricas indicaram que a perda de massa de modo significativo não ocorre antes dos 275^0C, mas que se completa rapidamente até os 375^0C, (Steward,1974).

A proporção de gases, vapores, alcatrões e a proporção de não inflamáveis e inflamáveis produzidos na pirólise varia em função da temperatura, pressão, tempo, dimensões da amostra. A Tabela 2.8 a seguir exemplifica a relação da temperatura de aquecimento e a liberação de gases durante a degradação térmica da madeira.

Tabela 2.8 Relação entre temperatura e produtos liberados durante o processo de degradação térmica da madeira.

Temperatura do Forno (^{0}C)	**150-200**	**200-280**	**280-380**	**380-500**	**500-700**	**700-900**
% de Carvão	60	68	78	84	89	91
% de volume CO_2	68	66,5	35,5	31,5	12,2	0,4
% de volume CO	30,5	30	20,5	12,3	24,5	9,6
% de volume H	0	0,2	5,5	7,5	42,7	80,7
% de volume hidrocarbonetos	2	3,3	36,5	48,7	20,4	8,7

Fonte: Instituto nacional de investigaciones agrarias (1982).

Os gases emitidos pela pirólise da madeira são prontamente diluídos a compostos não inflamáveis. Resultados de ensaios envolvendo a madeira norte americana Birch (*betual spp*) submetida a pirólise por 8 horas em pressão atmosférica indicou que para os 0,028 m^3 de madeira seca, resultaram 64,4 % de vapor d'água, 22,9% de gases inflamáveis e 12,7% de dióxido de carbono. (Browne, 1958). Uma mistura nestas proporções não conduz a inflamabilidade, o que efetivamente contribui para a formação de chamas é a presença de alcatrões. Há, portanto, uma estreita relação entre a formação de chamas e a produção de alcatrões.

2.6 A INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA NO PROCESSO DE COMBUSTÃO

O comportamento da madeira durante a combustão é influenciado principalmente pelas seguintes variáveis: a temperatura, a umidade e a densidade.

[5] Beall, F.C.; Eickner, H.W. (1970). Thermal degradation of wood components: a review of the literature. USDA, Forest Servie Research Paper, FPL 130.

A umidade presente no interior da madeira juntamente com a densidade é apontada pelas equações de regressão realizadas por diversos pesquisadores como White (1988) e Schaffer (1967), como um fator significativo na carbonização da madeira. O que pode ser compreendido pelo fato da umidade elevar a temperatura necessária para a ignição, retardando o processo de degradação.

O teor elevado de umidade dificulta o processo de combustão devido ao vapor resultante baixar a temperatura da área de combustão, resfriando a madeira, uma vez que ela cede energia para a evaporação da água e reduz a quantidade de oxigênio. Os espaços vazios são ocupados com vapor d'água, tornando necessária maior quantidade de calor para que ocorra a ignição.

Se o sólido está seco, a alteração no gradiente de temperatura promove a migração da umidade, principalmente por evaporação e condensação. Esta migração não ocorre necessariamente na direção do fluxo de calor, ela se manifesta quando ocorre elevações ou aumento na condutividade térmica do material, (Harmathy,1986).

Outros fatores também influenciam o comportamento da madeira exposta ao fogo: o baixo peso específico que atua facilitando a ignição, devido a maior quantidade de massa exposta; as dimensões da amostra (grandes seções promovem uma superfície carbonizada isolante); composição química da madeira; tempo de exposição; fluxo de calor; densidade; permeabilidade; condutividade térmica da madeira entre outros.

Dentre os três mecanismos essenciais de transporte do calor: a radiação, a convecção e a condução, a transmissão de calor por condução é característica do transporte por meio dos sólidos. As entidades responsáveis por esse transporte são os elétrons de condução e / ou as vibrações da rede cristalina.

A descrição matemática da transferência de calor pelo balanço energético por unidade de área no interior de um material celulósico pode ser representada pela Equação geral 2.12, (Steward,1974). No entanto, ela se limita a uma situação de transferência unidimensional de calor.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}\right] + aIe^{-ax} + \sum_i Q_i r_i - \frac{\partial}{\partial x}\left(m_v C_p T\right) = \rho C_p \frac{\partial \theta}{\partial t}, \qquad (2.12)$$

$$(condução) + (radiação) + (reação_química) - (convecção) = Inércia_térmica$$

onde:

λ condutividade térmica:
θ temperatura;
a coeficiente de absorção por radiação para materiais sólidos;
I intensidade da radiação;

Q_i entalpia da reação;

r_i taxa da reação química, obedece a equação de Arhenius;

m_v taxa de liberação de voláteis por área de superfície;

t tempo;

x distância;

C_p calor específico.

O fluxo térmico na madeira ocorre por: radiação, condução e convecção de calor pelo ar contido no lúmem das células, sendo os dois últimos mecanismos, os de maior eficiência na transferência de calor, (*Figura 2.18)*.

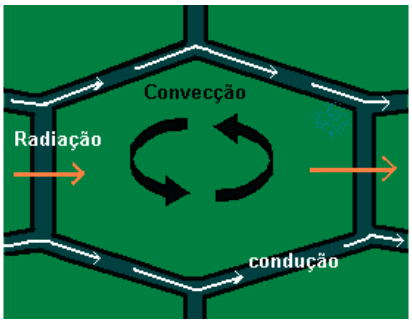

Figura 2.22. Formas de transferência de calor perpendicular a grã da madeira.
Fonte: Ilmari et al (1996), adaptado pela autora.

A má condutibilidade térmica da madeira promove sua lenta combustão e formação de uma camada superficial de carvão que atua como isolante térmico impedindo a saída rápida de maior parte dos gases combustíveis. O coeficiente de condutividade térmica do carvão é reduzido, 0,04154 W/mK, o que corresponde aproximadamente a 1/6 da condutividade da madeira. Seu comportamento isolante preserva as camadas interiores da exposição a elevadas temperaturas, tornando lenta a deterioração da madeira.

Diversos fatores alteram a condutividade térmica da madeira, principalmente: densidade, umidade, gradiente de calor, extrativos, direção da grã e anisotropia, resultando em valores diferentes para os diferentes sentidos de orientação da madeira, Rowley (1933)[6] apud Beger (1989), Kollmann (1968).

O modelo de condutividade térmica desenvolvido por Ilmari et al (1996) para o *Pinus silvestris* considera a somatória da condução por meio dos poros no lúmem da célula e ao longo da parede celular onde o efeito da radiação e convecção são menores. As dimensões e forma da célula no modelo são determinadas em função da espécie, ou seja, o modelo é adequado a prever a condutividade da espécie de *Pinus silvestris*. A equação para o modelo de condutividade térmica apresenta a seguinte forma:

---

[6] Rowley, F.B. (1933). The heat conductivity of wood at climatic temperature differences. Heating, piping and air conditioning. Volume 5 (6),p. 313-323.

$$\lambda^{\bullet} = \lambda_{cw} + \lambda_{w} + \lambda_{ca} + \lambda_{cc} + \lambda_{cr}\,, \tag{2.13}$$

Quando a convecção λ_{cc} e a radiação λ_{cr} são negligenciadas, a equação adota a seguinte forma:

$$\lambda^{\bullet} = k_s(\varphi, \psi, k)\left(\frac{V_{cw}}{V_{tot}}\lambda_{cw} + \frac{V_w}{V_{tot}}\lambda_w\right) + \frac{V_{ca}}{V_{tot}}\lambda_{ca}\,, \tag{2.14}$$

onde:

$\lambda^{\bullet}$ condutividade térmica perpendicular aparente;
λ_w condutividade térmica da água;
λ_{ca} condutividade térmica do ar no interior da célula;
λ_{cw} condutividade térmica da parede celular;
k_s tortuosidade da célula, dependente da geometria da célula (φ), razão entre madeira juvenil e tardia (ψ)e da transferência de calor x direção tangente da estrutura da célula (k).
V_{tot} volume total;
V_w volume de água;
V_{cw} volume da parede celular.

Durante o aquecimento, o fluxo de migração da umidade, devido principalmente ao mecanismo de evaporação e condensação, o que não ocorre necessariamente no sentido do fluxo de calor, resulta em aumento ou diminuição da condutividade térmica do material. Posteriormente, com a diminuição do teor de umidade e decomposição do material, o calor sensível é conduzido por meio dos gases produzidos pela degradação do material que se deslocam por meio das porosidades, (Schaffer, 1986).

A influência da temperatura na condutividade térmica é relativamente pequena; ocorre um aumento de 2 % a 3% a cada 10°C, (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999). No entanto, isto não pode ser adotado quando em temperaturas elevadas, pois a influência da transmissão de calor por radiação por meio da porosidade é maior. Para Schaffer (1986) e Harmathy (1986), os resultados estão atrelados a elevação da temperatura empregada e particularizados aos métodos empregados.

A condutividade térmica da madeira apresenta diferentes comportamentos, conforme o sentido das fibras. A presença de moléculas de celulose na direção longitudinal, por exemplo, favorece a transmissão de calor, enquanto que no sentido perpendicular, devido a maior presença de poros, o transporte de calor é menor, Tabela 2.9, (Beger,

1989). A diferença entre a condução longitudinal e transversal também pode ser explicada por meio da hipótese do transporte de calor ser decorrente das oscilações não harmônicas das moléculas, dispersando energia, além das perturbações entre as zonas cristalinas e amorfas, Rowley (1933)[7] apud Beger (1989).

Tabela 2.9 Relação entre fluxo de calor e direção da madeira.

Direção	Elementos	Fluxo de Calor (q)
Longitudinal	Vasos, fibras	1,5 a 2,8 q
Radial	Raios	1q
Tangencial	----------	0,9q

Fonte: Beger (1989)

A influência da permeabilidade da madeira na combustão ocorre por meio do controle do movimento de saída de gases e da umidade no interior da madeira, principalmente em situações onde a temperatura é superior ao ponto de vaporização da água, quando um gradiente de pressão interna é criado pela evaporação da umidade.

Mesmo sendo um material poroso, a madeira apresenta valores extremamente variáveis de permeabilidade, devido a sua anisotropia, arranjo de componentes das células e variação dos canais microscópicos entre as células. No sentido longitudinal ou axial, a permeabilidade é 50 a 100 vezes superior ao sentido transversal; observa-se que espécies com baixa permeabilidade apresentam menores velocidades de carbonização.

Há, enfim, uma grande interação entre os fenômenos físicos e químicos, de modo que a presença de componentes químicos interfere no processo de carbonização da madeira influenciando a cinética da pirólise. Este efeito pode ser descrito por meio da análise da composição química da madeira, relacionando a temperatura de decomposição, com as etapas da pirólise e a decomposição da estrutura celular.

A madeira é constituída por componentes de elevada e de baixa massa molecular. As macromoléculas (elevada massa molecular) representam mais de 90% da madeira, onde os principais elementos (C,H,O) se combinam para formar a celulose, hemiceluloses e lignina. As substâncias de baixa massa molecular podem ser divididas em substâncias orgânicas, genericamente denominadas extrativos, e as substâncias inorgânicas, chamadas cinzas, (Pimenta, 2002).

A composição química da madeira é afetada por inúmeras variáveis, entre elas a localização do plantio, condições climáticas, tipo de solo, idade do plantio e local de extração da amostra no interior da árvore. Por isso, a análise da composição química

[7] Rowley, F.B. (1933). The heat conductivity of wood at climatic temperature defferences. Heating, piping and air conditioning. Volume 5 (6),p. 313-323.

não é usada para caracterizar as diferentes espécies de madeira. Entretanto, algumas generalizações podem ser consideradas, (Enciclopedia of Chemical Technology,1998), tais como:

a) presença de menor quantidade de lignina em folhosas em comparação às coníferas;

b) determinação da composição elementar da madeira seca constituída por: 50% de Carbono, 44% de oxigênio, 6% de hidrogênio.

Estão presentes na madeira, porém não contribuem para a sua estrutura, alguns químicos orgânicos e minerais constituintes das cinzas da madeira carbonizada.

A quantidade de extrativos presente na madeira varia de 5 a 20% do seu peso. A quantidade de cinzas varia de 0,5 a 2,0% do peso das madeiras tropicais, sendo os componentes elementares: cálcio e potássio e, em menores quantidades, ãnions de carbonato, fosfato, sulfato e sílica, Enciclopedia of Chemical Technology (1998).

Os principais componentes químicos da madeira: a celulose, as hemiceluloses e a lignina se apresentam de modo geral nas seguintes porcentagens, (ver Tabela 2.10).

Tabela 2.10. Composição dos constituintes químicos da madeira.

Constituinte	Composição (%)	Natureza polimérica	função
Celulose	45-50	Molécula linear cristalina	sustentação
hemicelulose	20-25	Molécula ramificada amorfa	matriz
lignina	20-30	Molécula tridimensional amorfa	matriz

Fonte: Wood: Its Structure and Properties (1981).

A celulose é um polímero constituído por regiões cristalizadas, orientado em cadeia, cujo complexo manômero formado por 42 átomos e 10,3 Å de comprimento é formado por dois núcleos de glucose ligados um ao outro por eliminação de uma molécula de água. É o único constituinte microscópico da madeira parcialmente cristalino, (Guinier, 1996). Devido a esta parcial cristalização, é mais difícil sua hidrólise quando comparado aos demais constituintes básicos.

A organização física da parede celular baseada na celulose começa a se decompor quimicamente aos 200^0 C. Ela pode ser comparada a um esqueleto, fornecendo a forma e estrutura à parede celular primária e secundária. As moléculas de celulose são alinhadas em fileiras paralelas conhecidas como microfibrilas, arranjadas de maneira muito regular, várias centenas delas formam as macrofibrilas, que por sua vez se organizam como lamelas, compondo a parede celular, (Morey, s/d). A porção da celulose relativamente inativa e bem ordenada envolve as ligações de hidrogênio entre as hidroxilas adjacentes, e a porção ativa e desordenada é caracterizada por ligar as cadeias adjacentes por meio de moléculas de água. A estrutura deste sistema está

relacionada às forças intermoleculares e o contato com fontes elevadas de temperatura resultam na quebra desta estabilidade, devido a atividade térmica da água a estas temperaturas, (Browne,1958).

As Hemiceluloses ou polioses, moléculas lineares facilmente hidrolisadas, podem ser ramificadas de várias maneiras, fornecendo a matriz porosa encontrada ao redor das microfibrilas de celulose e formam um grupo muito diversificado de baixo peso molecular. São insolúveis em água e sua presença na parede celular determina maior higroscopicidade na madeira. As hemiceluloses se apresentam em maiores quantidades nas madeiras densas do que nas madeiras “moles”.

Dentre os três componentes, as hemiceluloses são mais suscetíveis à degradação térmica, seguida pela celulose, enquanto a lignina contribui em maior parte para a formação de carvão e conseqüentemente contribui menos para a formação das chamas quando comparada a celulose, (Rowell, 1991).

A lignina é uma substância fundamentalmente aromática e o único não-carbohidrato. Ela proporciona adesão à parede celular e está presente em maior quantidade na parede celular secundária, (Morey, s/d). No processo de degradação térmica ela se apresenta como o componente mais estável, no entanto começa a apresentar mudanças estruturais a temperaturas inferiores a 200°C, (Jankowsky,1986).

O tempo em que a estrutura da madeira se mantém estável após o início da pirólise está relacionado à proteção que a lignina promove devido ao fato das cavidades pelas quais os gases escapam serem formados por paredes ricas em celulose, com lamelas médias ricas em lignina. Entre elas, a presença de celulose carbonizada age como armadilhas à passagem de alcatrões provenientes da lignina, favorecendo a pirólise secundária, Browne (1958).

Experimentos conduzidos por Brito e Barrichelo (1977) utilizando amostras isoladas de lignina e celulose expostas a temperatura de 300° C, demonstraram a quase completa degradação da celulose da madeira, enquanto a lignina deixava ainda um teor de resíduo de 47% de sua massa. Isto está relacionado com a sua estrutura complexa aliada, ao fato de possuir cerca 65% de carbono elementar, enquanto a celulose apresenta 45%, além disto, as moléculas de lignina são do tipo covalente.

O teor de lignina tende a diminuir com a idade das árvores, ocorrendo de modo inverso ao comportamento da densidade, que tende a aumentar com a idade, por meio do aumento da espessura da parede celular, ou seja, as madeira maduras apresentam menor quantidade deste constituinte, se comparadas a madeiras juvenis, (Trugilho et al, 2002). Além disto, Migliorini et al (1980) constataram que em espaçamentos de plantio reduzidos ocorreu uma elevação no teor de lignina e na densidade básica de árvores de *Eucalyptus* com idade de 4 a 8 anos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A condução do trabalho foi realizada com a orientação de um planejamento de experimento e o modelo proposto para a determinação da taxa de carbonização das espécies ensaiadas é estabelecido a partir do tempo no qual os diferentes termopares atingem a temperatura de 290 ^{o}C conforme os procedimentos descritos neste capítulo.

Duas espécies de *Eucalyptus* foram selecionadas: o *E. citriodora* e o *E. grandis* em função de sua disponibilidade, aplicação corrente na construção civil e a suas propriedades físico-mecânicas,*Tabela 3.1*. As árvores coletadas foram doadas pela Estação Experimental de Itirapina por intermédio do Instituto Florestal do Estado de São Paulo.

Tabela 3.1 Espécies selecionadas para a determinação da taxa de carbonização.

Nome comum[(1)]	**Nome científico**[(1)]	$\rho_{ap\ (12\%)}$[(1)]	$f_{c0,m}$ **(MPa)**[(1)]	**Classe de Resistência**
Eucalipto Grandis	*Eucalyptus grandis*	640 kg/m^3	40,3	C40
Eucalipto Citriodora	*Eucalyptus citriodora*	999 kg/m^3	62,0	C60

$\rho_{ap\ (12\%)}$ massa específica aparente à 12% de umidade;
(1) fonte NBR 7190 (1997).

Da Estação Experimental, localizada no Município de Itirapina, altitude entre 700m a 827m, média de temperatura anual de 19^{0}7 C e Coordenadas S 22^0 13' 09" e W 47^0 54' 44", foram retiradas aleatoriamente por amostragem simples 12 árvores, não manejadas, com idade de 27 anos, sendo 6 referentes ao *E. grandis* com espaçamento de plantio 3,00m x 2,00m e 6 referentes ao *E. citriodora*, com espaçamento de plantio 3,00m x 1,00m.

A realização de ensaios em laboratório para a determinação das propriedades fornece, a partir das análises estatísticas dos resultados, os valores médios dessas propriedades. Conforme orientação da NBR 7190 (1997), no que diz respeito à

amostragem, para a utilização dessas propriedades em cálculos de estruturas de madeira, esses dados devem ser transformados em valor característicos e sequencialmente em valores de cálculo. A amostragem mínima prevista na referida norma deve possuir volume superior a 12,00m^3.

Para a retirada das árvores foi realizado o anelamento de todas as toras a uma distância de 30,00 cm da base com a finalidade de aliviar tensões de crescimento e evitar a severidade das rachaduras de topo (*Figuras 3.1 e 3.3)*. De cada árvore foram retiradas toras com 5,00 m de comprimento (*Figuras 3.2 e 3.4*).

Figura 3.1 Anelamento e corte de uma tora de E. citriodora.

Figura 3.2 Retirada de toras de E. citriodora, comprimento 5,00 m.

Figura 3.3 Anelamento e corte de uma tora de E. grandis.

Figura 3.4 Retirada das árvores.

Somente a madeira referente a oito árvores foi utilizada para confecção dos diferentes corpos de provas, totalizando aproximadamente 8,00 metros estéreo de madeira. Essa

redução se deve ao descarte motivado por defeitos de secagem e trincas provocadas por tensões de crescimento, (*Figura 3.5)*.

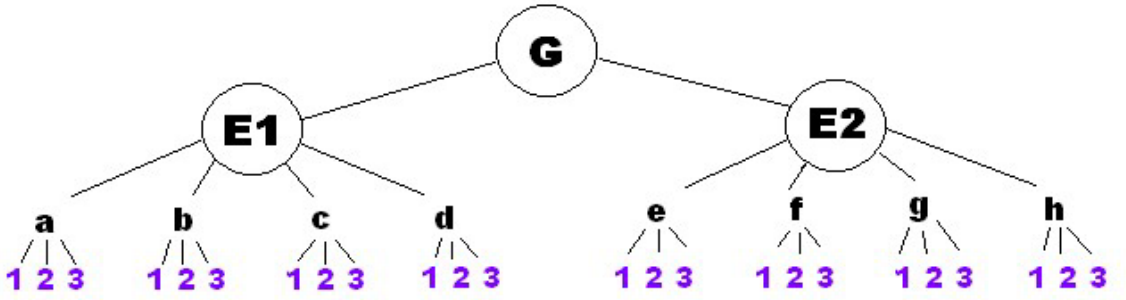

Figura 3.5 Planejamento de retirada dos corpos de prova.

onde:

G é o gênero *Eucalyptus;*
E1 é a espécie *citriodora;*
E2 é a espécie *grandis;*
a,b,c,d,e,f,g,h são as diferentes árvores coletadas e
1,2,3 número de corpos de prova de cada árvore para cada ensaio, 3 repetições.

As toras correspondentes aos primeiros 5,00 metros de cada árvore foram utilizadas para o desdobro em pranchas, com espessura variando entre 5,00 cm a 7,00 cm e os subseqüentes 5,00 m para a retirada das vigas com dimensão nominal de 17,00 cm x 27,00 cm. Considera-se para a realização deste trabalho, que as propriedades se mantêm constantes ao longo das pranchas.

Após o desdobro inicial as pranchas e as vigas de madeira foram transportadas ao LaMEM (Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira). As vigas foram cobertas com lona plástica e armazenadas em ambiente externo, passando assim por um período de secagem natural até a primeira etapa de extração dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram submetidos à secagem por ventilação forçada em estufa durante o período médio de duas semanas para acelerar a retirada da água livre, o teor de umidade inicial era de 30 a 40%, obtendo-se valores próximos a 24% (+ - 2%).

A partir do conhecimento da massa inicial e do teor de umidade foi realizado o acompanhamento da perda de umidade das amostras com o auxílio da Equação 3.1:

$$u = m \times \frac{(u_i + 100)}{m_i} - 100\,, \qquad (3.1)$$

onde:

u é o teor de umidade (%);
m é a massa em kg;
u_i é o teor de umidade inicial (%);
m_i é a massa inicial (kg).

Para a determinação da expressão da taxa de carbonização da madeira de *E. citriodora* e *E. grandis* em função de suas propriedades foram realizados os seguintes ensaios complementares: umidade da madeira (%), densidade da madeira (g/cm^3) , resistência (MPa) e rigidez (MPa) por meio da compressão paralela às fibras, retratibilidade, condutividade térmica da madeira (W/mk), determinação da composição química e análise térmica por TG.

Os ensaios para determinação do teor de umidade (%), densidade básica (ρ_{bas}) e aparente (ρ_{ap}); compressão paralela às fibras (f_{co}) e retratibilidade foram realizados em conformidade com a NBR 7190 (1997).

3.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Os ensaios para determinação da condutividade térmica transversal foram realizados no LaMEM - Laboratório de Madeiras e Estruturadas de Madeira - SET/EESC/USP em São Carlos.

A determinação da condutividade térmica transversal da madeira foi obtida utilizando-se o método do fio quente paralelo. O método consiste basicamente na realização de ensaios em regime não-estacionário de temperatura com uma fonte de calor contínua e linear, elevando a temperatura no interior da amostra com o passar do tempo.

Este método, previsto pela Norma DIN 51046, permite utilizar o material contendo umidade sem acarretar alteração na distribuição da mesma e permite ensaios de materiais com condutividade térmica até 25 W/mK. A aquisição dos dados por termopares ligados aos terminais permite a realização de leituras de temperatura em função do tempo, (Beger,1998), (Lima et al ,1992), (Lima,1989). O tempo de duração do ensaio é de 60 minutos para cada amostra.

Material utilizado:

- fio de aço kantal A, diâmetro 0,30 mm e resistência 7,88 Ω/m, comprimento 20,00cm (fio quente);
- fios condutores de cobre com diâmetro 1,00 mm e comprimento de 1,00m;
- fonte de corrente contínua, HP-MCDEL 6224B;
- termopares tipo T, cobre-constantan, diâmetro 0,226mm;
- corpos-de-prova com dimensão 5,00 x 10,00 x 20,00 cm;
- sistema de aquisição de dados (SAD) HP3497A, com placas de aquisição HP44421A;
- micro-computador e
- impressora HP 2631G.

Foram feitas duas ranhuras no sentido longitudinal da amostra, 1) uma central para a colocação do fio quente e 2) uma a distância de 1,50 cm da anterior, visando a colocação do termopar, com profundidade próxima à espessura dos respectivos fios. A superfície de contato entre as duas partes do corpo de prova (*Figura 3.6*) foram lixadas e limpas. A ranhura foi preenchida com pó de madeira extraída da própria amostra antes da colocação do fio quente e do termopar para possibilitar uma superfície plana de melhor contato, a seguir foi feito um ajuste entre ambos por meio de uma leve pressão com um peso próximo ao peso do corpo de prova.

As extremidades do fio quente, com resistência de 1,61 Ω, foram conectadas a dois fios condutores feitos de cobre, os quais são conectados à fonte de corrente contínua ajustada para 2 V.

Os terminais do fio quente (a-b) são ligados ao Sistema de Aquisição de Dados para medir a diferença de potencial aplicada. Ao acionar a fonte de corrente contínua, uma corrente percorre o fio quente liberando calor, o qual se propaga a partir do centro do corpo-de-prova de modo radial em relação ao fio, resultando em isotermas que são captadas pelos termopares diretamente ligados aos terminais do Sistema de Aquisição de Dados, (*Figura 3.6 e 3.7)*. As leituras são coletadas em μV (microvolts), transformadas em mV (milivolts) e convertidas em temperatura Kelvin (K) a intervalos de 30 segundos durante o período de 60 minutos, com auxilio de um computador e impressora.

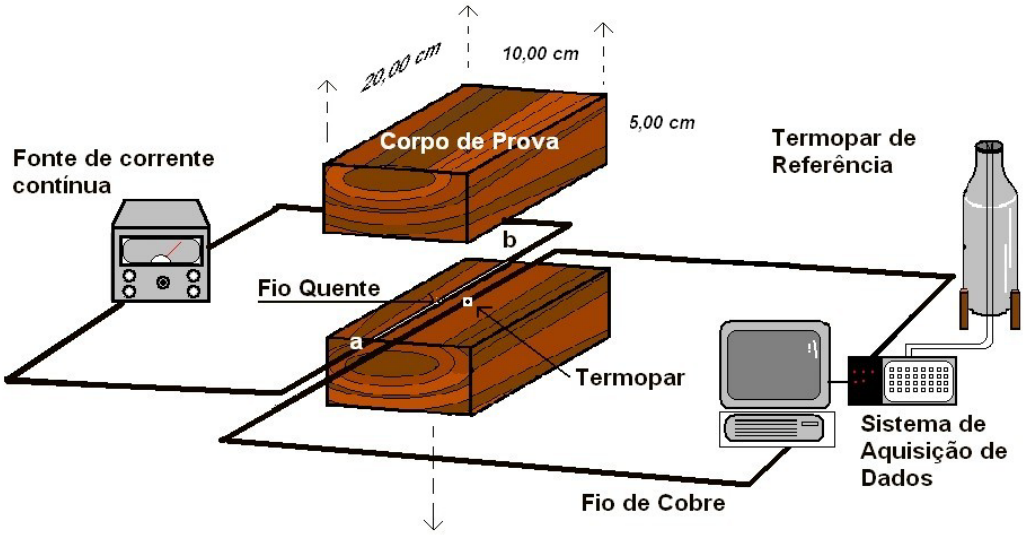

Figura 3.6 Sistema para determinação da condutividade térmica e dimensões do corpo de prova.

Figura 3.7 Equipamento para determinação da condutividade térmica da madeira.

Para o cálculo da condutividade é dada a Equação:

$$\lambda = \frac{RI^2}{4\pi l} \times \frac{-e(\frac{r^2}{4\alpha t})}{\Delta\theta(t)}) \,, \qquad (3.2)$$

onde:

α é a difusividade térmica (cm^2/s), medida da rapidez com que o material absorve o calor de seu entorno;
r distância em mm da fonte de calor (fio quente) ao termopar;
t tempo sem segundo, a partir da liberação de calor.

Os valores da exponencial, são tabelados em função da variação da temperatura. Para cada valor de $\frac{\theta(2t)}{\theta(t)}$ encontra-se o valor da função.

$$\frac{RI^2}{4\pi l}, \qquad (3.2.1)$$

onde:

R é a resistência dos 0,2 m de fio;
I^2 é a corrente do fio ao quadrado;
l comprimento do fio em metros.

Seqüência para o cálculo da condutividade

t (s.)	ΔT (mv)	ΔT (K)	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	$-e(\frac{r^2}{4\alpha t})$	$\frac{RI^2}{4\pi l} \times \frac{-e(\frac{r^2}{4\alpha t})}{\Delta\theta(t)})$	λ (W/mK)

onde:

t tempo em segundos;
t $\Delta\theta(t)$ gradiente de temperatura entre os termopares medidos em mV a cada intervalo Δt;
t $\Delta\theta(t)$ $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$ divisão dos gradientes de tempo 2t e t;
$e_i(\frac{-r^2}{4\alpha t})$ valores correspondentes aos valores de $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$.

3.2 CARBONIZAÇÃO

Os ensaios para determinação da taxa de carbonização transversal foram realizados segundo curva de aquecimento estabelecida pela norma ASTM E 119 – *"Standard test methods for fire tests of building construction and materials"* (1995), (*Figura 3.8)* com base na qual serão realizados dois tipos de ensaios:

- Em corpos de prova de dimensão nominal: 175 mm x 175 mm x 65 mm (C_1), com exposição unidimensional;

- Em vigas estruturais com dimensão nominal: 160 mm x 260 mm x 2000 mm (C_2), com exposição em quatro faces.

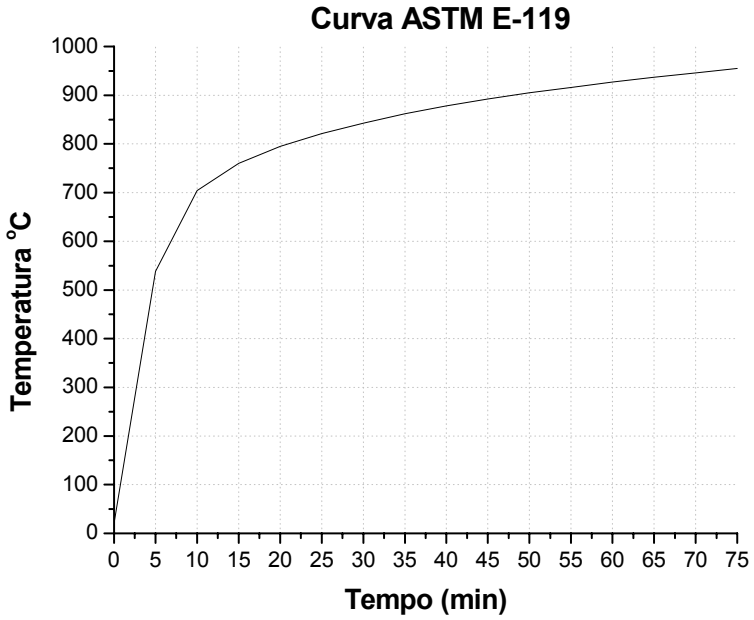

Figura 3.8. Curva temperatura x tempo ASTM E-119.

Os seguintes critérios foram considerados na determinação das dimensões dos corpos de prova: 1) utilizar dimensões similares a ensaios anteriormente descritos na literatura; 2) adotar dimensões compatíveis ao forno utilizado para o ensaio.

Durante os procedimentos de instrumentação, execução e retirada das amostras ensaiadas foram reportados seu comportamento, incluindo possíveis deformações,

fissuras, queima, presença de chamas e produção de fumaça, perda de massa e da resistência mecânica.

A temperatura de 288°C ou 550°F adotada por White (1988) e Schaffer (1967) é adotada, por consenso, como a temperatura característica da base da camada carbonizada. Sua determinação é fundamentada em estudos sobre o processo de combustão da madeira. Neste trabalho, a temperatura característica da base carbonizada por simplificação é de 290°C e considerada como a base para avaliar o avanço da velocidade da carbonização na madeira.

3.2.1 Taxa de carbonização unidimensional em corpos de prova de pequena dimensão (C_1).

Para a realização destes ensaios, os corpos de prova foram confeccionados na oficina do LaMEM/SET/EESC/USP. A preparação das peças compreendeu: medição das seções originais, o lixamento da superfície, marcação dos pontos para furação e posterior colocação dos termopares, pesagem, tomada das medidas finais.

As amostras foram envolvidas em plástico filme, *(Figura 3.9),* até o momento do ensaio de carbonização, para controle do teor de umidade, conforme procedimento descrito no item 3, Equação 3.1.

Os ensaios para determinação da taxa de carbonização unidimensional foram realizados no forno vertical, modelo FL 1300/60, com capacidade para 60 litros, aquecimento por radiação direta, resistência 220 V, trifásico, (*Figura 3.10*) da Faculdade de Engenharia Civil - Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção - Unicamp, Campinas.

Figura 3.9 Plastificação do corpo de prova visando preservar a umidade.

Figura 3.10 Forno utilizado na realização de ensaios de carbonização C_1.

O aquecimento do forno que seguiu a curva ASTM E-119 foi realizado em dois patamares: 1) a partir da temperatura ambiente até os 538^{0}C, taxa de aquecimento de 107,6^{0}C/min.) 538^{0}C até 955^{0}C, taxa de aquecimento 5,96^{0}C/min. com controle automatizado de elevação de temperatura.

Os ensaios forneceram: a taxa de carbonização da madeira do gênero *Eucalyptus*, espécies *grandis* e *citriodora,* possibilitando a avaliação posterior das variáveis a que está associada; avaliar a perda de massa das amostras após a carbonização e estabelecer gradientes de temperatura internos ao corpo de prova.

Foram realizados vinte e quatro (24) ensaios em corpos de prova com as seguintes dimensões nominais: 17,5cm x 17,5cm x 6,5cm,(*Figura 3.11 e Figura 3.12)*.

Somente uma face é exposta ao fogo (exposição unidimensional). Na face oposta à exposição ao fogo foram feitos sete orifícios com broca para madeira, ∅ 2,7 mm, onde foram introduzidos os termopares do tipo K, com bainha de 1,5 m.

Foram instalados sete termopares em quatro diferentes profundidades: dois a 5 mm; dois a 10 mm; dois a 15 mm, possibilitando assim a determinação dos valores médios e um a 25 mm, (*Figura 3.12)*. As leituras permitiram determinar o tempo decorrido até que fosse atingida a temperatura de 290^{0}C pelos distintos termopares. Um oitavo termopar foi posicionado no interior do forno, em contato com a madeira, para monitorar a temperatura superficial.

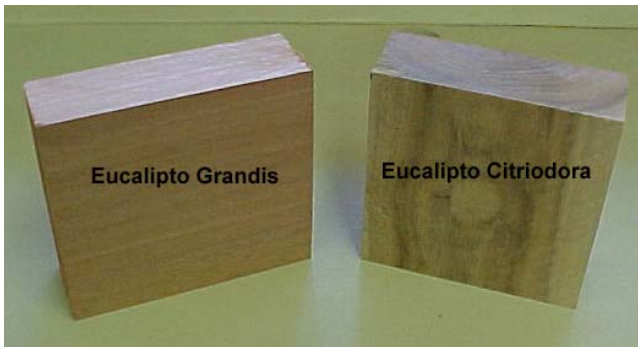

Figura 3.11. Corpos de prova de E.grandis e citriodora para carbonização C_1.

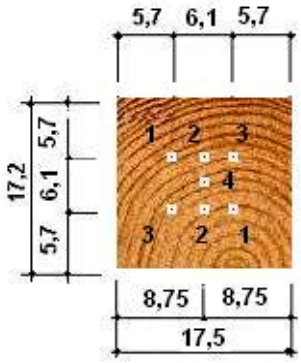

Figura 3.12. Eixos de implantação dos termopares a diferentes profundidades .

As leituras das temperaturas são coletadas por meio de um sistema de aquisição de dados, (*Figura 3.13)* e armazenadas em computador.

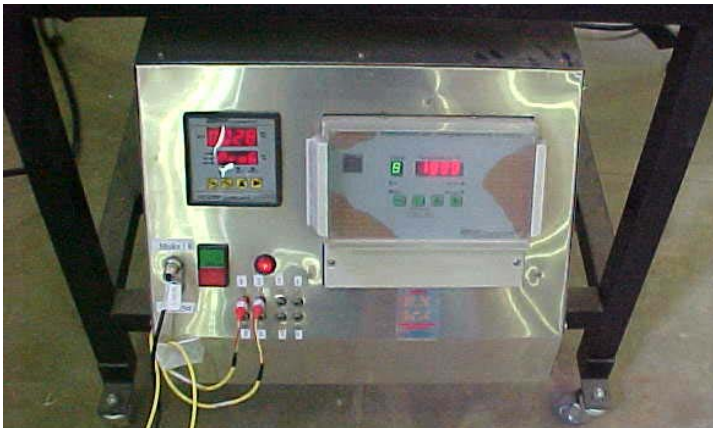

Figura 3.13 Sistema de aquisição de dados.

Inicialmente foram realizados ensaios preliminares, num total de 6 visando a adequação do equipamento e dos procedimentos. Os ensaios preliminares permitiram definir a profundidade dos termopares, a temperatura máxima empregada e o tempo médio de duração do ensaio.

Os corpos de prova recebem a ação da elevação de temperatura somente em uma de suas faces, para isto, o forno utilizado foi adaptado, (*Figura 3.14* a *Figura 3.17)*, e a amostra encaixada de modo a ficar 20,00 mm sobressalente à placa de fechamento, permitindo assim, preservar a estanqueidade lateral da peça.

Figura 3.14. Placa adaptada na abertura do forno.

Figura 3.15. Posicionamento dos termopares durante o ensaio.

Figura 3.16. Abafamento do corpo de prova em caixa de areia.

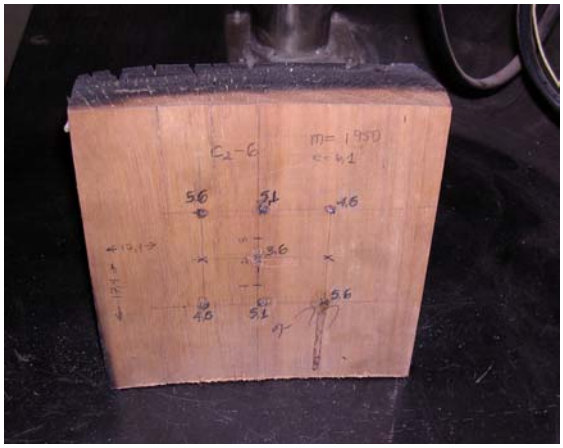

Figura 3.17. Aspecto final do corpo de prova.

Foi necessária a colocação de uma barra para evitar que o corpo de prova se soltasse durante a carbonização, devido a perda de seção e a contração da madeira. Todas as frestas foram preenchidas com lã de rocha para proporcionar o isolamento térmico e evitar a excessiva saída de fumaça que se apresenta em maior quantidade no início do processo de combustão, (*Figura 3.15)*.

Finalizado o tempo de exposição necessário para efetuar as seqüências de medição, o experimento se encerra e o corpo de prova é mergulhado em uma caixa contendo areia fina, (*Figura 3.17)* para interromper o processo de queima por meio de abafamento. O corpo de prova, depois de resfriado, (*Figura 3.18*) é pesado em balança digital e são retiradas suas dimensões avaliação da perda de massa e medidas da espessura carbonizada.

3.2.2 Taxa de carbonização em peças estruturais (C_2).

Os ensaios para determinação da taxa de carbonização de peças estruturais foram realizados no forno vertical do Laboratório de Desenvolvimento de Sistemas Construtivos, Furnas - Centrais Elétricas S.A., Aparecida de Goiânia, Goiás.

Seis peças estruturais de *Eucalyptus* (dimensões nominais: 0,16 m x 0,26 m x 2,00 m) foram expostas ao gradiente de temperatura segundo a curva de aquecimento proposta pela norma ASTM E 119 – *"Standard test methods for fire tests of building construction and materials"* (1995) em forno com sistema de aquecimento constituído por quatro queimadores a gás GLP, de baixa pressão e exaustão por dutos. O forno possui dimensões internas de 4,00m x 3,07m x 0,91m e volume interno de 11,17 m^3, conforme ilustra a (*Figura 3.18)*.

Figura 3.18 Forno para realização do ensaio de carbonização C_2.

As vigas de madeira utilizadas foram aparelhadas possibilitando o melhor esquadrilhamento para a furação e colocação dos termopares. Em cada corpo de prova foram feitos trinta e seis orifícios com broca para madeira, ∅ 2,7 mm e ∅ 1,5 mm, para a introdução dos termopares do tipo K, com bainha de 1,5 m, a três diferentes profundidades de 10 mm, 20 mm e 30 mm.

Os termopares foram instalados ao longo de 3 pontos da viga, seções 1, 2 e 3. Cada seção corresponde a 12 pontos de leitura distribuídos em quatro diferentes quadrantes (A,B,C e D) e a 3 diferentes profundidades, conforme ilustram as (*Figuras 3.19* a *3.22)*, totalizando 36 termopares.

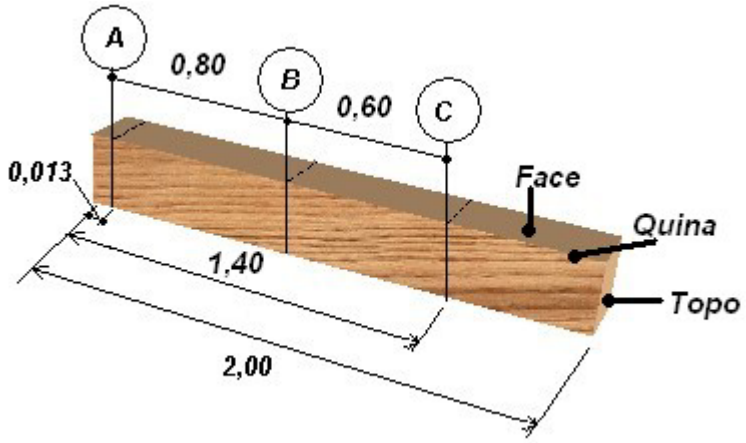

Figura 3.19 Seções de implantação dos termopares (1), (2), (3), medidas em metros.

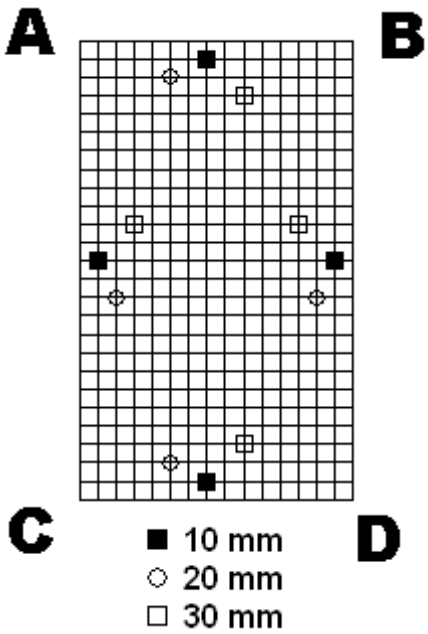

Figura 3.20 Seção nominal da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seção 2.

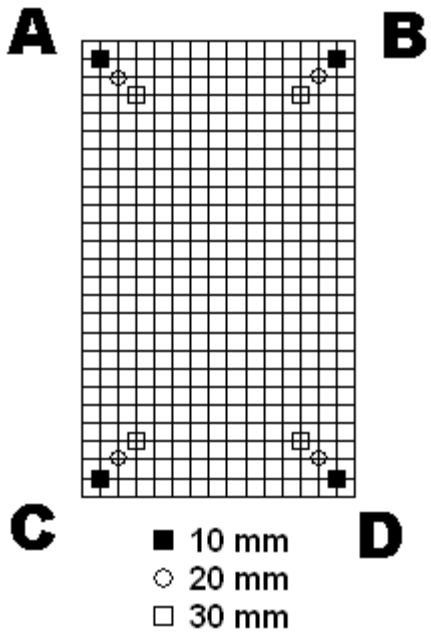

Figura 3.21 Seção da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seções 1 e 3.

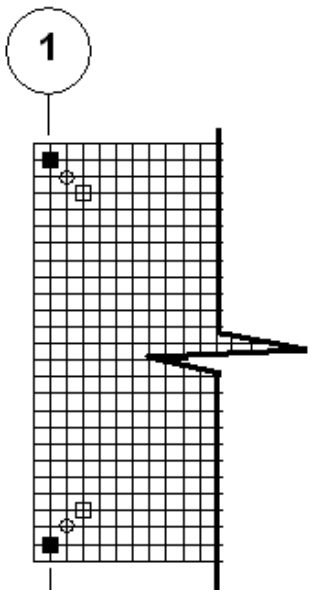

Figura 3.22 Seção longitudinal da viga com as profundidades de implantação dos termopares, seção 1.

Deste modo, as leituras obtidas da seção 1 permitem a avaliação da velocidade de carbonização no topo das peças; as da seção 2, possibilitam a avaliação da velocidade de carbonização a partir das faces e as da seção 3, permitem avaliar o efeito de arredondamento nas quinas da viga.

As leituras das temperaturas são coletadas por meio de um sistema de aquisição de dados, (*Figura 3.23)* , e armazenadas em computador.

Figura 3.23 Sistema de aquisição de dados.

Foi realizado um ensaio preliminar para adequação dos procedimentos a serem considerados e estimar o tempo necessário para sua execução. Como resultado deste ensaio preliminar foi determinada a redução das profundidades dos termopares, antes de 15 mm, 30 mm e 45 mm para 10 mm, 20 mm, 30 mm, devido ao comportamento da amostra de *E. grandis* que apresentou degradação acentuada e com bastante liberação de chamas pelo tubo de exaustão, (*Figuras 3.24 a 3.26).*

Figura 3.24 . Exaustão durante o teste com E. grandis.

Figura 3.25 . Flamabilidade acentuada durante o teste com E. grandis.

Figura 3.26 Aspectos finais da amostra de teste, após a abertura do forno.

Durante a preparação das peças e execução dos ensaios foram reportadas as condições das peças e comportamentos relevantes.

Os ensaios foram executados com o acionamento de 3 queimadores a gás. O controle da temperatura foi feito manualmente, a partir da leitura da temperatura fornecida por 5 termopares, posicionados nas proximidades da viga ensaiada, resultando em variações na temperatura de aquecimento do forno.

Após o aparelhamento e lixamento do topo das vigas, foi feita a marcação dos eixos e furação das peças para colocação dos termopares, (*Figura 3.27)*. As peças foram pesadas, (*Figura 3.28)*, e posicionadas no centro do forno a aproximadamente 1,30 m de altura, sobre três pontos de apoio, (*Figura 3.29)*.

Com os termopares instalados (*Figura 3.30*), o forno é fechado (*Figura 3.31*) e se procede o andamento do ensaio (*Figura 3.32 e 3.33*). Depois de atingida a temperatura de 290 ^{0}C pelo último termopar, os queimadores são desligados, o forno aberto e a peça retirada (*Figura 3.35*) recebe jateamento com água (*Figura 3.35*), baixando sua temperatura de superfície de 700 ^{o}C para aproximadamente 50 ^{o}C.

Figura 3.27 Preparação do corpo de prova, marcação das seções e pontos dos termopares.

Figura 3.28 Pesagem.

Figura 3.29 Posicionamento da viga no apoio.

Figura 3.30 Colocação dos termopares.

Figura 3.31 Fechamento do forno.

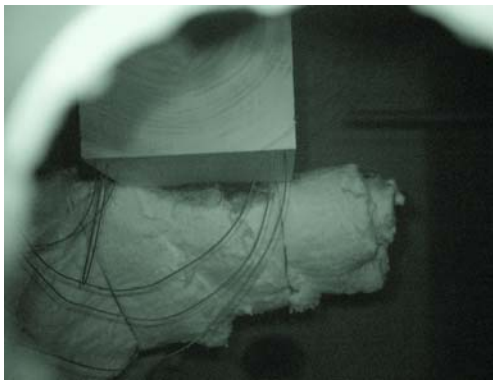

Figura 3.32 Corpo de prova no interior do forno, antes do aquecimento.

Figura 3.33 Corpo de prova durante o processo de carbonização.

Figura 3.34 Retirada do corpo de prova.

Figura 3.35 Resfriamento do corpo de prova com jato de água.

Após dois dias resfriando os corpos de prova foram novamente pesados e retiradas amostras de aproximadamente 50 cm de comprimento, entre as seções 2 e 3 de cada viga carbonizada, (*Figura 3.36 a 3.39)*. Estas peças foram enviadas ao LaMEM/SET/EESC/USP, onde foram confeccionados os seguintes corpos de prova, segundo a NBR 7190 (1997):

1) umidade;
2) densidade e
3) compressão paralela às fibras, antes e após a carbonização.

Figura 3.36 Corte das peças ensaiadas.

Figura 3.37 Acondicionamento das peças para transporte.

Figura 3.38 Seção carbonizada.

Figura 3.39 Desdobro das peças para confecção de corpos de prova de umidade, densidade e compressão.

3.3 ANÁLISE TÉRMICA

A análise termogravimétrica foi realizada no Laboratório de Caracterização do Grupo de Crescimento de Cristais e Materiais Cerâmicos do Instituto de Física da Universidade de São Paulo em São Carlos, utilizando o equipamento NETZSCH, modelo: TG 209. A taxa de aquecimento utilizada foi de 10^0 C/ min. a partir da temperatura ambiente até os 700 ^{0} C, em ambiente neutro de nitrogênio, fluxo de 20 ml/minuto.

O TG forneceu o percentual final de perda de peso da amostra, a temperatura correspondente à taxa máxima de perda de peso. Foram ensaiadas oito amostras com teor de umidade de 16% (+ - 3), sendo 4 correspondentes a *E. citriodora* e 4 correspondentes ao *E. grandis*.

Foi adotada uma taxa de aquecimento menor para possibilitar melhor definição das etapas nas quais transcorre o processo de pirólise, bem como proporcionar a homogeneização entre a temperatura da amostra e a temperatura de aquecimento, (Seye et al, 2000).

3.4 RETRATIBILIDADE DA MADEIRA

A retração da madeira ocorre basicamente pela perda da água de impregnação contida nas paredes celulares, causando contrações nos elementos anatômicos da madeira. Ela ocorre com intensidades diferentes nas distintas direções da madeira, devido a sua anisotropia. A variação das dimensões ocorre de modo desigual para os diferentes sentidos da madeira: retração linear, e para o volume: retração volumétrica ou contrações volumétricas, resultando em rachaduras e empenamentos. As variações dimensionais da madeira se processam praticamente até um valor de umidade próximo a 28%, conhecido como ponto de saturação das fibras, (Rezende, 2003).

Sabe-se que diversos fatores influenciam nas propriedades da madeira, tais como: as tensões de crescimento, propriedades químicas, conteúdo de umidade, densidade local de plantio, (Prata et al, 2002); (Calil et al, 2002).

Durante o processo de carbonização, a elevação de temperatura provoca a vaporização da água livre e posteriormente da água de impregnação. Pode ser observado durante os ensaios de carbonização com os corpos de prova de pequena dimensão C_1, que esta perda de água ocorre ainda por um determinado período de tempo após o encerramento do ensaio e que algumas espécies sofrem empenamento e rachaduras durante o processo de aquecimento, devido à perda de água. Importante considerar que a presença de rachaduras favorece a saída de gases e a ação do fluxo de calor para o interior da peça, contribuindo favoravelmente para a degradação térmica da madeira.

Nesse sentido, esses ensaios permitiram verificar a importância da retratibilidade, como um parâmetro, no processo de carbonização da madeira.

Os ensaios de retratibilidade da madeira foram realizados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira-LaMEM/SET/EESC/USP, de onde foram obtidos os dados experimentais da variação volumétrica e retratibilidade da madeira.

Os procedimentos para a determinação da retratibilidade, bem como os necessários para determinação da densidade e conteúdo de umidade seguiram a NBR 7190 (1997).

Para cada espécie foram feitas 3 repetições de ensaio, totalizando 9 ensaios para determinação da retratibilidade tangencial, 9 ensaios para retratibilidade radial, 9 ensaios para retratibilidade axial e 9 ensaios para a variação volumétrica.

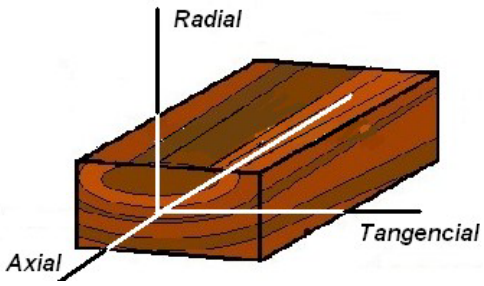

Figura 3.40 Direções principais da madeira.

Os corpos de prova foram submetidos à saturação, (*Figura 3.41)*, em um recipiente com água durante o período aproximado de 45 dias. Após o período de saturação, as amostras

passaram pelo processo de secagem natural, até atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente quando a partir de então foram secas em estufa.

Figura 3.41 Corpos de prova de retratibilidade imersos para saturação.

3.5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

Os procedimentos para determinação da composição química da madeira foram realizados no Laboratório de Físico-Química do Instituto de Química de São Carlos – IQSC, Universidade de São Paulo, seguindo orientação das normas ABCP M10 (1971) e TAPPI T 264 cm (1997).

Pequenos cavacos de madeira selecionada para este estudo foram transformados em serragem por meio de um moinho de facas e peneirados (42 mesh) para obtenção dos grânulos de serragem, totalizando 10g.

O teor de umidade das amostras foi medido usando uma balança OHAUS modelo MB200, onde 1g de madeira foi submetida a aquecimento por 180 minutos a 105°C, *(Figura 3.42)*.

A retirada dos extrativos organo-solúveis para as 8g de amostras em extrator tipo *Soxhlet* foi realizada em três etapas, 1) Extração de etanol por 4 horas; 2) 1:1 partes de ciclo-hexano/etanol, por 8 horas; 3) água fervente por 3 horas, (*Figura 3.43, Figura 3.44 e 3.45).* A serragem foi filtrada e submetida à lavagem com etanol 95%, seca ao ar e pesada, sendo o conteúdo de extrativos determinado com base na diferença entre a massa da serragem anterior e posterior ao processo de extração, segundo Machado (2000).

Figura 3.42 Determinação do teor de umidade de uma amostra de E. grandis.

Figura 3.43 Determinação da massa seca da amostra para realização do processo de extração.

Figura 3.44 Processo de retirada de extrativos.

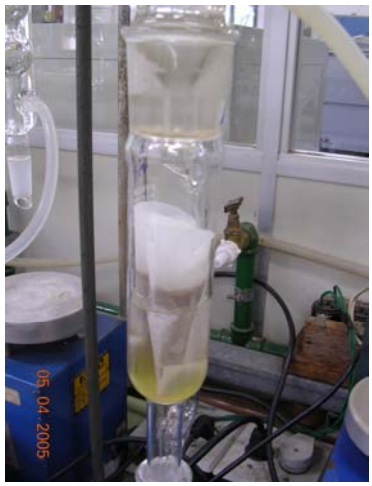

Figura 3.45 Detalhe da amostra durante o processo de extração.

Para determinação do teor de cinzas, o material inorgânico da amostra, 1g de serragem de cada corpo de prova foram colocados em cadinhos de porcelana e calcinados em uma mufla à 565 ^{o}C pelo período de 6 horas, (*Figura 3.46 e Figura 3.47)*.

Figura 3.46 Retirada da amostra calcinada da mufla.

Figura 3.47 Aspecto dos resíduos da calcinação da madeira.

Foi utilizada a seguinte expressão para cálculo do teor de cinzas da amostras:

$$C_z = \frac{m_r . 100}{m}, \tag{3.3}$$

onde:

C_z é o teor de cinzas da amostra em porcentagem;
m_r é a massa de resíduo em gramas;
m é a massa da amostra em gramas.

Para a determinação do teor de lignina Klason insolúvel, 1g de material pré-extraído, ou seja, livre de extrativos, é submetido à hidrólise com H_2 SO_4 72%, *(Figura 3.48)* durante

três horas em agitadores e posteriormente submetido a refluxo em água destilada fervente por 4 horas, em solução com $H_2 SO_4$ 3%.

A lignina insolúvel é filtrada em um funil de vidro sinterizado, número 4, previamente tarado do qual o resíduo é seco em estufa por 24 horas à ± 60 °C, (*Figura 3.49).*

Figura 3.48 Agitadores para realização do processo de hidrólise com $H_2 SO_4$ 72%.

Figura 3.49 Lignina Klason insolúvel.

O teor de lignina foi calculado pela seguinte expressão:

$$LK_i = \frac{m_l.100}{m_s}, \tag{3.4}$$

onde:

LK_i é o teor de lignina insolúvel da amostra em porcentagem;

m_l a massa de lignina em gramas;

m_s a massa seca da amostra.

Para a determinação da lignina Klason insolúvel, foi utilizado o método utilizado para determinação da lignina solúvel, no qual o filtrado obtido nas etapas de preparação referente a hidrólise ácida foi analisado por meio de espectroscopia de região UV/VIS nas seguintes absorbâncias 215 e 280 nm, tomando como referência uma solução de ácido sulfúrico diluído nas mesmas proporções. Para o cálculo foi utilizada a expressão, (Pimenta, 2002):

$$L_s = \frac{4{,}53.A_{215} - A_{280}}{300} \tag{3.5}$$

onde:

L_s é a concentração de lignina solúvel na amostra, ($g.L^{-1}$);

A_{215} valor de absorbância em 215 nm;

e A_{280} valores de absorbância em 280 nm.

A equação foi obtida utilizando-se os valores de absortividade da lignina da madeira e absortividade dos produtos obtidos da degradação dos glicídios presentes no filtrado.

O filtrado produzido pelo método de lignina Klason insolúvel foi utilizado para a determinação do teor de celulose e polioses, por meio de análises por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE). Uma pequena amostra da solução foi filtrada em membrana *Sep Pak* C_{18} e em seguida analisada quanto aos teores de celobiose, glicose, xilose, arabinose, ácido acético e ácido fórmico num cromatógrafo modelo C-R&A, com detector de índice de refração modelo RID-6A, de UV/VIS modelo SPD-10AV, forno modelo CTO-10^A, usando uma coluna Aminex HPX-87H BIO-RAD. A fase móvel utilizada foi H_2SO4 0,005 mol/l com fluxo de 0,6 ml/min. a 45° C, (Machado, 2000).

As concentrações de celobiose e glicose foram convertidas em celulose, as de xilose e arabinose convertidas em hemicelulose e a de ácido acético convertido em grupos acetila. As massas foram divididas pelo peso seco do material inicial e multiplicadas pelo fator de hidrólise que foi obtido por meio de uma relação matemática de massa molar dentro das relações estequiométricas das equações de degradação dos açúcares. Os fatores de conversão de glicose e celobiose para celulose são 0,90 e 0,95. O mesmo procedimento foi utilizado na conversão da xilose e arabinose em hemicelulose pelo fator 0,88. Para a conversão do ácido acético em grupo de acetila o fator de conversão utilizado foi 0,2, Machado (2000).

Neste trabalho buscou-se determinar a presença dos principais componentes químicos da madeira. Deste modo, não foram analisados os produtos de decomposição dos açucares: furfural e hidróximetilfurfural.

3.6 PODER CALORÍFICO

Para a determinação do poder calorífico do *E. citriodora* e *E. grandis*, foram realizados seis ensaios com a utilização do sistema calorimétrico (IKA C500 Duo Control). Para cada espécie, foram feitos três ensaios objetivando-se uma melhor precisão dos resultados.

O sistema calorimétrico é composto por:

- Vaso Interno;

- recipiente de desdobramento;
- oxigênio puro a pressão p=30bar;
- meio de ignição: fio ou pavio de ignição;
- cadinho;
- mostra de material;
- cilindro de combustão.

As etapas para realização da medição experimental foram:

- Determinação do teor de umidade (controlado em estufa)
- Raspagem da madeira para a obtenção dos corpos de prova
- Mediação da massa da porção de raspa de madeira por uma balança de grande precisão, devido o sistema IKA limitar os corpos de prova em 5 gramas.

Os dados de massa, bem como os específicos da substância a ser analisada são lançados via um monitor digital acoplado ao sistema calorimétrico. Decorridos alguns minutos o resultado do poder calorífico da substância é determinado e exibido com a unidade cal/g (caloria/grama).

Para a realização do ensaio, o sistema calorimétrico deve ser calibrado inicialmente, esta etapa é feita pelo próprio aparelho que, ao estabilizar-se, indica a temperatura de equilíbrio entre o material contido no recipiente de desdobramento e o vaso interno. A fase de estabilização é obtida pelo lançamento automático da água em direção ao recipiente de desdobramento.Quando a temperatura entre o recipiente de desdobramento e vaso interno forem iguais, o aparelho fornece a temperatura de equilíbrio ou de referência para o sistema.

Após a fase de estabilização, uma agulha injeta oxigênio puro a uma pressão de 30 bar no recipiente de desdobramento, um eletrodo é acionado disparando uma faísca incendiando o fio de ignição que esta em contato com a substância contida no cadinho. A substância vai sendo carbonizada ao longo do tempo e ao final do processo, o poder calorífico é encontrado.

O poder calorífico é determinado, além da massa, por valores obtidos pela relação tempo (minutos) X temperatura (ºC) que são calculados e armazenados no próprio software do sistema calorimétrico. O aparelho foi calibrado e a temperatura de referência determinada para esta amostra de madeira foi de 24,1496ºC.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de carbonização e ensaios complementares realizados para a elaboração desta pesquisa. Os resultados são apresentados na seguinte seqüência: caracterização mecânica das espécies com base em ensaios de resistência a compressão paralela às fibras; condutividade térmica; Carbonização C_1, Análise Térmica, Carbonização C_2, Retratibilidade da Madeira, Composição Química da Madeira e Poder Calorífico.

Confirmando o que inicialmente foi comentado no item 2.1 do Capítulo 2, com relação ao comportamento das espécies, observou-se que as madeiras desdobradas de *E. citriodora* apresentaram bolsas de resina em duas das seis árvores abatidas; rendimento volumétrico inferior; grã espiralada, presença de nós e diâmetros inferiores aos diâmetros apresentados pelo *E. grandis*, o qual apresentou menor presença de nós e de grã espiralada.

Quando feita a retirada dos pranchões, ambas as espécies apresentaram rachaduras durante o corte, bastante acentuadas para o *E. citriodora*, chegando a inutilizar algumas delas, o que permitiu concluir que o anelamento, como executado, não proporcionou maior estabilidade à madeira.

4.1 RESISTÊNCIA E RIGIDEZ

A caracterização da resistência e rigidez das amostras por meio do ensaio de compressão paralela às fibras para os corpos de prova C_1 e C_2 foi realizada nas dependências do LaMEM - Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira do Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, tendo como base a NBR7190 (1997).

Com os resultados dos ensaios foi obtido o valor médio do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras, determinados por meio de 3 ensaios por árvore, perfazendo o total de 12 amostras para cada espécie. Para a realização deste experimento foram determinados o conteúdo de umidade e a densidade das amostras ensaiadas. Os valores experimentais obtidos foram corrigidos para o teor de umidade de 12%.

O valor característico da resistência e do módulo de elasticidade para os dados não-agrupados foi estimado segundo o método dos Percentis, (Martinez et al, 2000); (Pinto et al, 2004). Os resultados referentes às propriedades de resistência e rigidez são apresentados na *Tabela 4.1*.

Na *Tabela 4.2* os valores médios e característicos de resistência e de rigidez obtidos dos corpos de prova, são apresentados juntamente com os valores médios fornecidos pela NBR 7190 (1997).

Tabela 4.1 Resultados de ensaios de resistência e rigidez obtidos por meio do ensaio de compressão paralela as fibras f_{co} (12%) relativos ao *E. citriodora* e *E. grandis*.

Espécie	CP	f_{co} (MPa)	f_{co} (12%) (MPa)	E_{co} (MPa)	E_{co} (12%) (MPa)	ρ_{bas}(g/cm^3)
citriodora	A1-1	68,3	129,0	23041	34861	0,89
	A1-2	67,7	109,3	30947	43636	0,89
	A1-3	65,9	126,7	23000	37171	0,89
	C2 -2	59,57	101,2	22365	34357	0,78
	C2 -3	58,46	102,1	20260	30347	0,78
	C2 -4	57,98	101,1	18385	26676	0,78
	E2 -1	57,3	91,2	16866	23512	0,83
	E2 -2	58,1	83,6	21351	27586	0,82
	E2 -3	59,6	90,2	14249	19123	0,89
	F-1	57,94	94,7	18776	26737	0,84
	F-2	55,11	84,0	21906	29573	0,88
	F-3	63,12	98,7	31522	43339	0,86
grandis	1-1	36,6	64,7	15237	23038	0,89
	1-2	36,8	59,4	29532	41682	0,89
	1-3	37,8	72,8	24898	40236	0,89
	4-1	54,1	74,4	28733	35916	0,74
	4-2	55,4	79,9	24928	32306	0,74
	4-3	53,5	72,9	26969	33496	0,74
	C3 -1	50,85	79,1	20467	28040	0,67
	C3 -2	40,45	57,4	11982	15345	0,70
	C3 -3	46,88	66,7	22542	28899	0,63
	D1-1	43,7	68,2	17294	23748	0,72
	D1-2	47,6	74,3	15350	21078	0,72
	D1-3	44,5	69,3	14111	19377	0,72

Tabela 4.2 Valores médios das propriedades de resistência e de rigidez das espécies estudadas fornecidas pela NBR 7190, comparados aos valores médios e característicos determinados para as amostras de *E. citriodora* e *E. grandis* estudadas, valores ajustados para teor de umidade de 12%.

Espécie	$f_{c0,m}$ (MPa)(1)	E_{c0} (MPa)(1)	$f_{c0,m}$ (MPa)(2)	$E_{c0,m}$ (MPa)(2)	$f_{c0,k}$ (MPa)(3)	$E_{c0,k}$ (MPa)(3)
grandis	40,3	12813	69,9	25603	57,4	15345
citriodora	62,0	18421	101	31394	83,6	19122

(1) valores médios para a espécie, (NBR 7190, 1997);
(2) valores médios determinados para as amostra ensaiadas;
(3) Valores característicos determinados para as amostra ensaiadas, segundo o método dos Percentis para dados não-agrupados.

As amostras ensaiadas apresentam valores médios acima dos valores médios apresentados pela NBR 7190 (1997) o que deve estar relacionado a idade de corte das árvores, 27 anos. Os resultados apontam para uma distribuição assimétrica dos dados, conforme apresentado na (*Figura 4.1)* referente à resistência a compressão das espécies, onde utilizando o gráfico *boxplot* ou diagrama de caixa, para verificação de pontos discrepantes no conjunto de dados foi possível verificar a maior variabilidade da espécie citriodora em relação ao *grandis*.

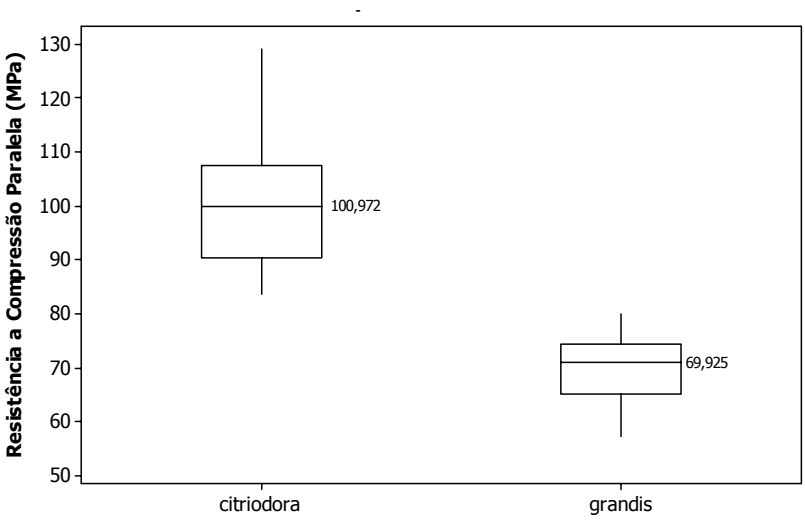

Figura 4.1 Diagrama de caixa para os resultados de ensaio de resistência a compressão paralela referentes aos E. citriodora e grandis.

Com relação aos valores referentes a propriedade de rigidez, conforme apresentado na (*Figura 4.2)*, os valores para o *E. citriodora* são assimétricos, no entanto com uma variação menor dos dados quando comparado ao *E. grandis*, que neste caso apresenta uma distribuição próxima a normal, porém com grande variação.

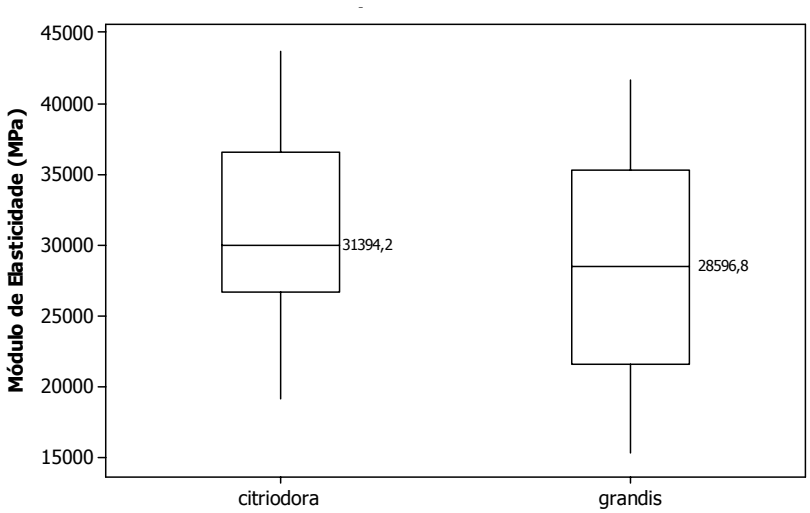

Figura 4.2 Diagrama de caixa para os resultados de ensaio de resistência a compressão paralela para determinação do módulo de elasticidade referente aos E. citriodora e E. grandis

4.2 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Conforme apresentado no item 3.2 do Capítulo 3, o valor resultante para a Equação 3.2.1 é

$$I = \frac{V}{R} = \frac{2}{1,61} = 1,24A \qquad \frac{2 \times 1,54}{4 \times 3,1415 \times 0,2} = 0,98$$

$$I^2 = 1,54$$

Na *Tabela 4.3* são apresentados os resultados de ensaios de condutividade térmica transversal a grã.

Para o *E. citriodora*, com condutividade média de 0,42 W/mK e densidade aparente de 1,02g/cm^3, os valores se mostraram próximos aos valores obtidos por Sales e Hellmeister (1990) para a madeira de maçaranduba com densidade 1,0g/ cm^3, similar à densidade do *E. citriodora*.

Com relação ao *E. grandis* os valores da condutividade λ= 0,38 W/mK, se mostraram superiores aos valores obtidos por Nogueira (1991), λ= 0,18 W/mK.

Tabela 4.3 Resultados de ensaio de condutividade térmica pelo método do fio quente paralelo para *E. citriodora* e *E. grandis*.

Espécie	Prancha	Amostra	U (%)	λ (W/mk)	λ (W/mk)	ρ_{bas}	ρ_{ap} g/m^3
Citriodora	A1	AB	16,71	0,42		0,87	1,0
		CD	15,47	0,44		0,9	1,04
		EF	16,70	0,43	0,43	0,89	1,03
	C2	CD	19,0	0,39		0,92	1,06
		OB	19,2	0,41		0,9	1,04
		LM	17,0	0,44	0,41	0,92	1,06
	E2	AB	17,60	0,42		0,89	1,02
		EF	16,90	0,42		0,91	1,05
		PQ	17,31	0,44	0,42	0,87	0,99
	X	AB	24,73	0,43		0,93	1,06
		CD	17,90	0,48		0,89	1,04
		EF	18,68	0,43	0,44	0,92	1,06
Grandis	1	AB	16,36	0,36		0,82	0,94
		GH	16,62	0,36		0,82	0,93
		IJ	17,23	0,36	0,36	0,79	0,90
	4	AB	18,62	0,36		0,74	0,84
		EF	16,45	0,36		0,79	0,90
		HI	15,33	0,39	0,37	0,78	0,89
	C3	AB	18,35	0,30		0,6	0,68
		CD	17,24	0,33		0,66	0,75
		EF	18,31	0,33	0,32	0,63	0,71
	D1	AB	18,70	0,38		0,76	0,87
		CD	18,20	0,37		0,56	0,61
		EH	17,50	0,37	0,37	0,77	0,88

A condutividade para o *E. citriodora*:

n = 12 $\bar{y}$ = 0,43 W/mK s = 0,0215 W/mk CV = 5,01%

A condutividade para o *E. grandis:*

n = 12 $\bar{y}$ = 0,35W/mK s =0,0246 W/mK CV = 6,93%

Para ambos a condutividade apresenta:

n = 24 $\bar{y}$ = 0,39 W/mK s =0,0437W/mK CV = 11, 15 %

4.3 CARBONIZAÇÃO C_1

Ao final da exposição a redução da massa da madeira representou 30% de sua massa inicial, semelhante porcentagem é também observada nos corpos de prova estruturais C2, para tempos semelhantes.

Com base em observações visuais o carvão formado pela degradação térmica apresenta diferenças em função da espécie e da presença de grã espiralada:

a) O *E. citriodora* produz um carvão mais consistente, enquanto o carvão produzido pela combustão do *E. grandis* promove mais trincas e se desprende com muita facilidade, (*Figura 4.3 e Figura 4.4).*

b) A presença da grã espiralada resulta em um carvão mais homogêneo. A (*Figura 4.3*) ilustra um corpo de prova com presença da grã espiralada no lado esquerdo do corpo de prova, o carvão formado nesta região se mostra mais consistente que o de grã normal presente no lado direito do mesmo corpo de prova.

Figura 4.3. Carvão resultante da combustão do E. citriodora, CP E2-4.

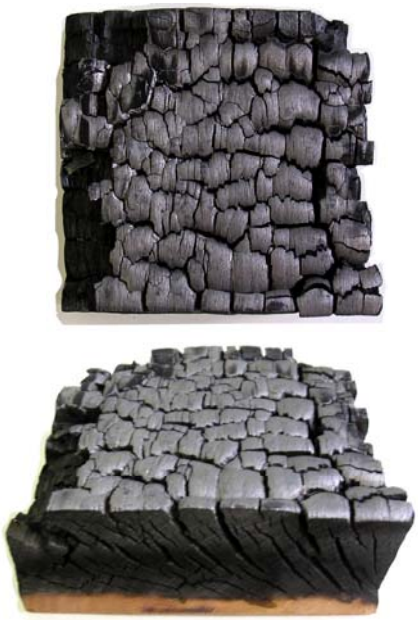

Figura 4.4. Carvão resultante da combustão do E. grandis, CP D1-1.

Durante os dez minutos iniciais ocorre uma intensa liberação de fumaça e vapores d'água. Os corpos de prova de *E. citriodora* se distinguiram pela eliminação de uma quantidade maior de fumaça, mais odorífica, principalmente os corpos de prova F e E2, fato relacionado à presença de extrativos, o que se confirma com os ensaios de composição que demonstraram uma quantidade maior de extrativos para estas duas amostras.

O *E. grandis,* por sua vez eliminou na fase endotérmica uma quantidade de vapor d'água muito superior à eliminada pelo *E. citriodora*, ocorreram também freqüentes estalidos durante a pirólise lenta.

A liberação da fumaça precede a súbita reação de combustão, cuja temperatura é marcada em 407 °C→503 °C (*E. grandis*) a 474 °C→631 °C (*E. citriodora*), em média 440 °C→540 °C, ver (*Figura 4.5)*.

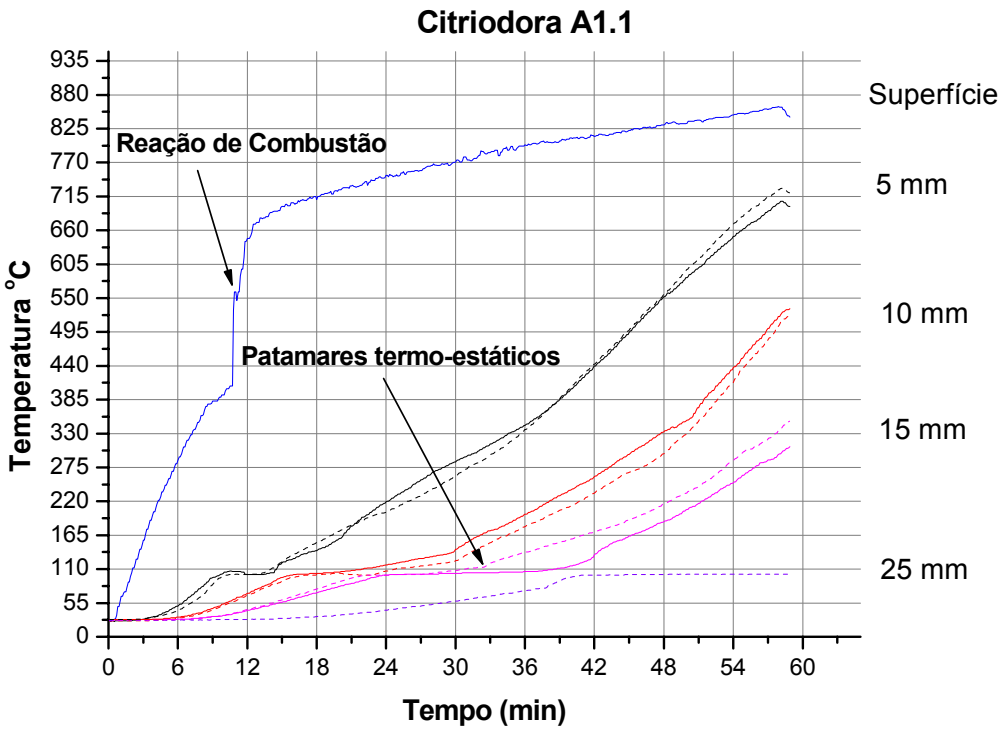

Figura 4.5. Curva temperatura x tempo, CP A1-1, E. citriodora.

Na etapa anterior a reação de combustão, as leituras constatam que a temperatura do forno é superior a da superfície da madeira, uma diferença entorno de 19%, o que representa uma variação de aproximadamente 100 °C.

Após a reação de combustão ocorre a elevação da temperatura na superfície dos corpos de prova, de modo que essa se mantém superior a temperatura do forno por alguns momentos, constatando assim, a reação exotérmica com formação de chamas que juntamente com o carvão incandescente de cor alaranjada se mantêm até a finalização do ensaio.

Próximo à temperatura de 100 °C, ocorre uma interrupção na elevação da temperatura no interior do corpo de prova, e conseqüente diminuição na taxa de carbonização, constatado pela presença de um patamar térmico, ver (*Figura 4.5)*. Esse efeito termo-estático verificado a temperaturas próximas ao ponto de ebulição da água apresenta relação com a distância do ponto monitorado x superfície do corpo de prova, ou seja,

quanto mais superficial o ponto de monitoração menor a permanência deste patamar, efeito reportado por Lingens *et al* (2005); White (1981).

Em estudos conduzidos por White (1981), foi constatado que a elevação da temperatura está associada a um pico do teor de umidade interno causado pela redistribuição e deslocamento da umidade por difusão e condensação do vapor da água livre. Esse pico representa um teor de umidade de 1,2 a 2,0 vezes superior a umidade inicial da peça.

Durante a permanência do efeito termo-estático está ocorrendo a vaporização da umidade. A elevação da pressão causada pelo aumento dos vapores nesta região diminui a pressão em regiões próximas a superfície da peça. Logo após o pico de umidade e em decorrência da elevação da temperatura ocorre uma queda do teor de umidade até os níveis próximos de 0%, (White, 1981). A *Tabela 4.4* apresenta os dados característicos dos corpos de prova utilizados para realização dos ensaios de carbonização C_1.

Tabela 4.4 Características dos corpos de prova para ensaio de Carbonização C_1.

Espécie	CP	ρ_{ap} (g/cm^3)	ρ_{bas}(g/cm^3)	m_i(g)	m_f (g)	Perda de massa (%)
citriodora	A1-1	1,01	0,84	2007,8	1304,0	35,53
	A1-3	1,03	0,85	2006,5	1250,0	37,70
	A1-4	1,03	0,85	2000,0	1310,5	32,50
	C2-3	1,01	0,87	2050,0	1338,1	34,47
	C2-4	1,07	0,88	1900,0	1273,4	32,97
	C2-6	1,05	0,86	1950,0	1269,6	34,89
	E2-2	1,08	0,85	2000,0	1275,9	36,21
	E2-4	1,10	0,88	1990,0	1185,5	40,42
	E2-7	1,05	0,82	2030,1	1354,4	33,28
	F-1	1,12	0,87	2000,0	1350,0	32,50
	F-2	1,11	0,86	1954,4	1313,6	32,78
	F-3	1,08	0,86	1992,9	1246,2	37,46
grandis	1-1	0,89	0,72	1585,3	1079,3	31,92
	1-3	0,84	0,70	1600,0	1052,7	34,20
	1-4	0,87	0,73	1600,0	1079,1	32,55
	4-1	0,96	0,80	1694,8	1151,6	32,05
	4-2	0,88	0,74	1692,3	1111,5	34,30
	4-3	0,95	0,79	1698,2	1058,5	37,70
	C3-2	0,82	0,66	1484,6	1005,2	32,29
	C3-3	0,87	0,70	1414,2	776,2	45,11
	C3-4	0,83	0,67	1484,1	956,2	35,57
	D1-1	0,80	0,63	1504,0	910,9	39,43
	D1-2	0,96	0,75	1500,0	921,4	38,57
	D1-3	0,88	0,69	1511,6	965,9	36,10

Os valores de densidade observados para o *Eucalyptus grandis* apresentam variações, chegando desde patamares próximos aos do *E. citriodora* até os valores mais aproximados de sua média por espécie, de qualquer modo, ambas as espécies apresentam valores superiores aos valores médios fornecidos pela NBR 7190 (1997).

A média ($\bar{y}$), o desvio padrão (s) e o coeficiente de variação (CV) para os dados não-agrupados da Tabela 4.4, são apresentados a seguir:

Para o *E.citriodora* a densidade aparente apresenta:

n = 12 $\bar{y}$ = 1,06 g/cm^3 s =0,04 g/cm^3 CV = 3,54 %

Para o *E. grandis* a densidade aparente apresenta:

n = 12 $\bar{y}$ = 0,88 g/cm^3 s =0,05 g/cm^3 CV = 6,14%

Para ambos a densidade aparente apresenta:

n = 24 $\bar{y}$ = 0,97 g/cm^3 s =0,10 g/cm^3 CV = 10,69 %

O tempo de carbonização apresentado na *Tabela 4.5*, permite previamente notar que o tempo de carbonização é similar para as duas espécies.

Tabela 4.5 Tempo de carbonização (t) para o *E. citriodora* e *E. grandis.*

Citriodora	CP	β	t (min) para 5 mm		t (min) para 10 mm		t (min) para 15 mm	
			Termopar 1	Termopar 8	Termopar 2	Termopar 7	Termopar 3	Termopar 6
	A1-1	0,27	30,26	32,69	44,44	47,44	54,21	57,65
	A1-3	0,29	32,52	32,09	47,53	48,47	53,18	50,57
	A1-4	0,28	24,25	25,04	34,54	51,20	45,13	60,00
	C2-3	0,26	37,34	34,38	36,03	49,19	58,46	59,08
	C2-4	0,25	43,05	33,46	47,53	46,53	58,54	62,00
	C2-6	0,25	38,40	49,00	53,43	51,20	61,01	60,00
	E2-2	0,26	31,15	30,40	43,04	42,51	-----	58,10
	E2-4	0,25	38,53	44,34	45,00	56,22	58,36	61,10
	E2-7	0,25	38,46	35,51	50,47	48,60	60,00	-----
	F-1	0,27	38,57	34,30	42,11	41,40	56,35	54,35
	F-2	0,30	32,46	32,40	42,00	41,05	54,58	46,24
	F-3	0,27	34,30	38,59	42,05	41,37	56,33	54,35
$\bar{y}$		0,26	35,06		43,76		56,34	
Grandis	1-1	0,24	30,15	35,25	48,45	48,26	63,04	61,52
	1-3	0,28	36,01	-----	44,29	42,10	54,30	54,28
	1-4	0,27	29,36	31,44	41,35	39,44	47,35	49,08
	4-1	0,27	34,30	33,50	46,12	47,04	-----	54,56
	4-2	0,26	38,35	30,25	47,56	46,00	54,31	61,10
	4-3	0,25	32,16	34,55	47,13	48,56	65,24	55,40
	C3-2	0,28	36,28	29,11	44,55	48,52	53,28	-----
	C3-3	0,25	30,26	28,27	40,40	48,44	53,53	64,56
	C3-4	0,26	37,15	35,35	47,10	50,20	55,10	58,31
	D1-1	0,26	36,44	31,20	49,04	47,27	53,46	62,54
	D1-2	0,25	38,10	42,48	52,36	55,20	61,04	58,38
	D1-3	0,27	34,05	34,50	44,01	49,21	50,56	61,00
$\bar{y}$		0,26	33,82		47,77		52,16	

β é a taxa de carbonização em mm/min.

A taxa de carbonização é calculada aplicando a Equação 2.5, onde (x_c = 15 mm) e t é o tempo médio decorrido para que os termopares atinjam a temperatura de 290° C (ver Tabela 4.6, coluna em destaque), como estes dados são fornecidos por um par de termopar, o tempo médio é utilizado.

Tabela 4.7. Medidas estatísticas para a taxa e o tempo de carbonização segundo a leitura dos diferentes termopares.

Profundidade	**5 mm**		**10 mm**		**15 mm**		β
Termopar	**1**	**8**	**2**	**7**	**3**	**6**	
$\bar{y}$	34,66	34,27	45,02	47,31	56,79	57,46	3,77
s	4,17	5,29	4,52	4,27	4,79	4,66	0,05
CV	12,03	15,45	10,03	9,03	8,58	8,11	6,37
s^2	17,37	28,03	20,39	18,24	22,91	21,69	0,06
n	24	23	24	24	22	22	24

β é a taxa de carbonização em min./mm., (calculada com base na razão entre o tempo pela profundidade de 15mm);
s Desvio padrão;
CV Coeficiente de variação;
s^2 variância;
n número de observações.

A redução das espessuras e volume foram mais acentuadas para os corpos de prova de *E. citriodora,* ver *Tabela 4.7 e (Figura 4.6)*. Com relação a perda de massa os resultados indicam que ambas as espécies possuem valores similares. A (*Figura 4.7*) demonstra que ambas as espécies apresentam dados assimétricos. A variação de perda de massa foi maior para *E. grandis.*

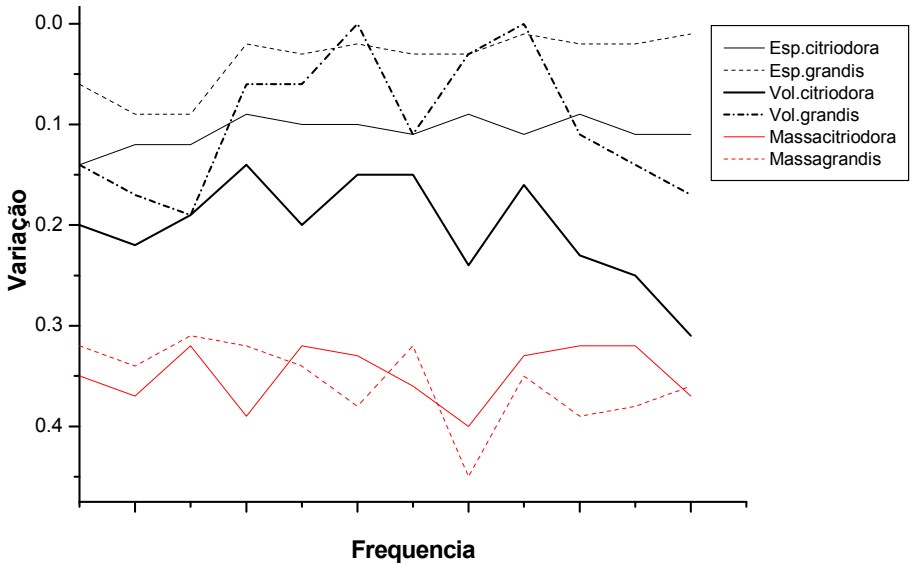

Figura 4.6 Variações de espessura, volume e massa dos corpos de prova de E. citriodora e E. grandis submetidos à carbonização.

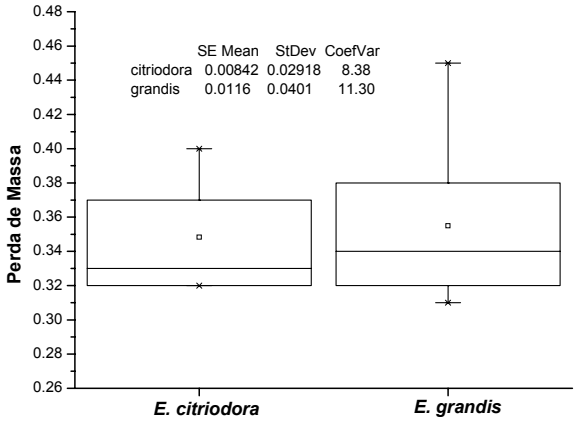

Figura 4.7 Diagrama de caixa para os resultados de variação da massa.

Tabela 4.7 Alterações na espessura (e), volume (v) e massa (m) dos corpos de prova de *E. citriodora* e *E. grandis* submetidos à carbonização.

	CP	Δe	Δv	Δm
Citriodora	A1-1	0.14	0.20	0.35
	A1-3	0.12	0.22	0.37
	A1-4	0.12	0.19	0.32
	C2-3	0.09	0.14	0.39
	C2-4	0.10	0.20	0.32
	C2-6	0.10	0.15	0.33
	E2-2	0.11	0.15	0.36
	E2-4	0.09	0.24	0.40
	E2-7	0.11	0.16	0.33
	F-1	0.09	0.23	0.32
	F-2	0.11	0.25	0.32
	F-3	0.11	0.31	0.37
$\bar{y}$		0.11	0.20	0.34
Grandis	1-1	0.06	0.14	0.32
	1-3	0.09	0.17	0.34
	1-4	0.09	0.19	0.31
	4-1	0.02	0.06	0.32
	4-2	0.03	0.06	0.34
	4-3	0.02	0	0.38
	C3-2	0.03	0.11	0.32
	C3-3	0.03	0.03	0.45
	C3-4	0.01	0	0.35
	D1-1	0.02	0.11	0.39
	D1-2	0.02	0.14	0.38
	D1-3	0.01	0.17	0.36
$\bar{y}$		0.04	0.10	0.35

4.4 ANÁLISE TÉRMICA

Na *Tabela 4.8*, são apresentados os resultados referentes as oito amostras. Nas (*Figuras 4.8 a 4.9)* são apresentados os gráficos correspondentes ao processo de perda de massa em decorrência da pirólise.

Como nesse estudo, o carvão é um importante agente no processo de carbonização devido a seu caráter de isolante térmico. Podemos considerar que à temperatura de 450 ^{o}C indicada para a produção de carvão vegetal (Seye et al. 2000). Os corpos de prova *citriodora* A1 e F. *grandis* 4 e D1, nessa seqüência, apresentaram maior quantidade de resíduos sólidos e portanto sob esse aspecto favorecem a produção de carvão residual.

Tabela 4.8. Resultados da análise Termogravimétrica. referentes a madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis*. com 27 anos de idade.

Espécies	CP	m_i (mg)	m_{450} (%)	$\Theta_{50\%}$ (^{o}C)	Θ T_{max} (^{o}C)	M_{600}(%)
citriodora	F	6.373	24.43	351.01	369.63	11.62
	A1	7.090	29.28	361.06	383.15	13.91
	C2	3.487	16.77	339.48	367.37	12.00
	E2	3.595	19.67	346.18	372.26	7.40
grandis	C3	6.605	20.19	358.23	381.49	17.17
	4	6.204	23.50	354.54	374.04	5.29
	1	3.755	16.83	346.40	373.13	4.91
	D1	3.596	21.70	344.65	370.07	0

CP = Corpo de Prova;
m_i = massa inicial da amostra;
m_{450}= massa final da amostra;
Θ_f = Temperatura correspondente a perda de massa a temperatura de 450 ^{0}C;
$\Theta_{50\%}$ = Temperatura correspondente a perda de 50% de massa;
Θ T_{max} = Temperatura correspondente a taxa máxima de perda de massa;
M_{600} = massa a 600 ^{0}C.

Os diferentes componentes químicos das amostras possuem temperaturas de decomposição distintas. Por meio do gráfico de leitura termogravimétrica, (*Figuras 4.8 e Figura 4.9)* é possível distinguir quatro etapas:

1. Perda de água representa aproximadamente 10% da massa inicial das amostras e ocorre até a temperatura de 126 ^{o}C;
2. Com temperatura na faixa de 260 ^{o}C e taxa de decomposição em torno dos 35%. Correspondente a faixa de temperatura das hemiceluloses (225 ^{o}C a 325 ^{o}C) (IPT. 1986);
3. Com temperaturas entre 345 ^{o}C a 385 ^{o}C, a terceira etapa apresenta maior taxa de perda de peso (80%), correspondem a faixa de temperatura de degradação da celulose (<325°C a 375 ^{o}C) e da lignina (250 ^{o}C a 500 ^{o}C), (IPT, 1986);
4. Na quarta etapa se apresentam os resíduos da pirólise incompleta.

A curva termogravimétrica de E2 e C2 indica maior conteúdo de umidade que A1 e F, A degradação para estas duas amostras inicia a uma temperatura ligeiramente maior que A1 e F. A degradação para C2 e E2 segue de modo semelhante até o final da terceira etapa, quando a amostra E2 passa a apresentar maior porcentagem de massa residual, de modo que, a taxa de degradação de C2 se torna maior na quarta etapa.

A curva termogravimétrica indica maior teor de umidade em D1 e 1 e uma temperatura maior de degradação para a terceira etapa para as amostras 4 e 3.

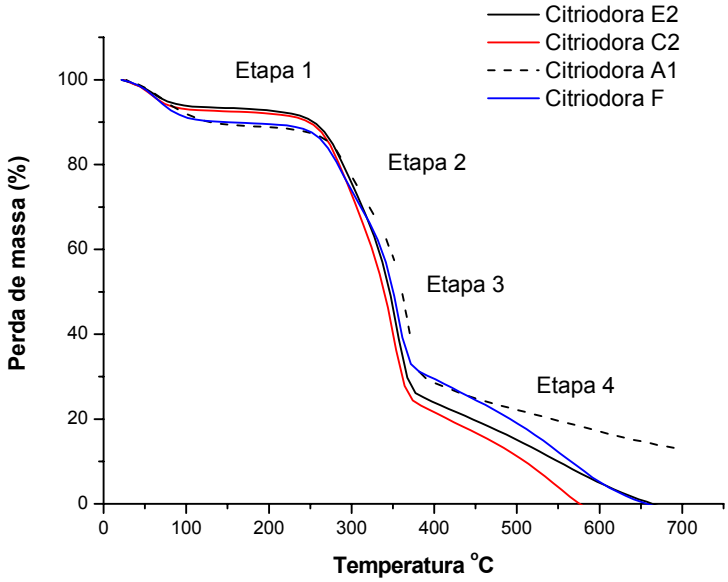

Figura 4.8 Curva termogravimétrica para o E. citriodora.

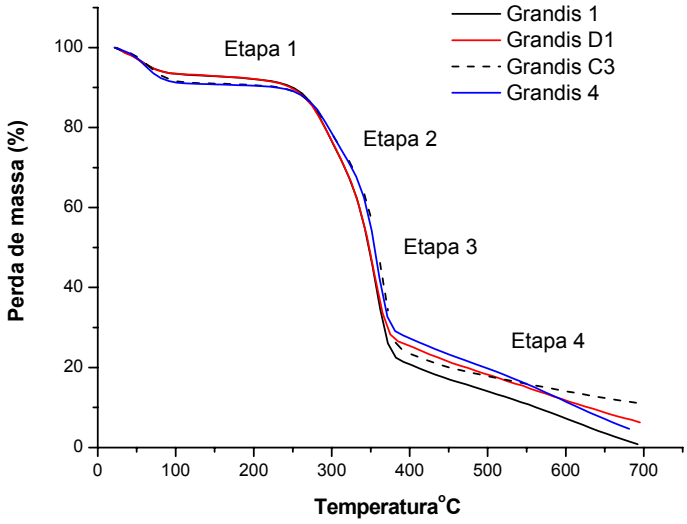

Figura 4.9 Curva termogravimétrica para o E. grandis.

4.5 CARBONIZAÇÃO C_2

Na *Tabela 4.9* são apresentados os valores da caracterização pelo teor de umidade, densidades e massa dos corpos de prova.

Tabela 4.9 Caracterização das vigas para ensaio de Carbonização C_2.

Espécie		CP	ρ_{ap} (g/cm^3)	ρ_{bas}(g/cm^3)	$\rho_{ap\ 12\%}$(g/cm^3)	u(%)	m (kg)
Anterior	citriodora	D3	0,97	0,81	0,96	19,3	85,25
		D1	1,08	0,83	1,05	30,6	100,45
		C2	1,07	0,86	1,05	27,5	104,65
	grandis	D1	0,94	0,65	0,83	35,7	63,30
		I	0,83	0,66	0,79	25,6	71,50
		E2	0,74	0,51	0,63	30,6	64,05
Posterior	citriodora	D3	0,96	0,68	0,87	39,1	58,35
		D1	1,14	0,59	0,74	91,8	66,50
		C2	1,12	0,78	1,01	43,5	73,15
	grandis	D1	0,95	0,70	0,87	35,7	45,05
		I	0,95	0,61	0,80	49,0	49,30
		E2	0,84	0,58	0,73	42,6	44,40

O carvão resultante da combustão da madeira de *E. citriodora* se apresenta mais compacto e rígido que o carvão resultante do *E. grandis*, que se apresenta mais frágil. Também é possível notar nas seções de *E. grandis*, maior degradação, particularmente acentuada na viga I, (*Figura 4.13)*, neste caso devido ao posicionamento de um dos queimadores a esta altura da viga, conforme (*Figuras 4.10* a *4.15)*.

Figura 4.10 Citriodora D3.

Figura 4.11 Citriodora D1.

Figura 4.12 Citriodora C2.

Figura 4.13 Grandis I.

Figura 4.14 Grandis D1.

Figura 4.15 Grandis E2.

Os corpos de prova de *E. grandis* apresentaram massa inicial 31% inferior aos corpos de prova de *E. citriodora, (Figura 4.16)*. A perda de massa final para o *E. grandis* (30%), foi inferior ao do *E. citriodora* (32%). Porém deve ser considerado o ganho de umidade ocasionado pelo procedimento utilizado para resfriar a viga ou mesmo pela migração da umidade durante o processo de pirólise, o que pode ser constatado ao se comparar as respectivas umidades fornecidas na *Tabela 4.8.*

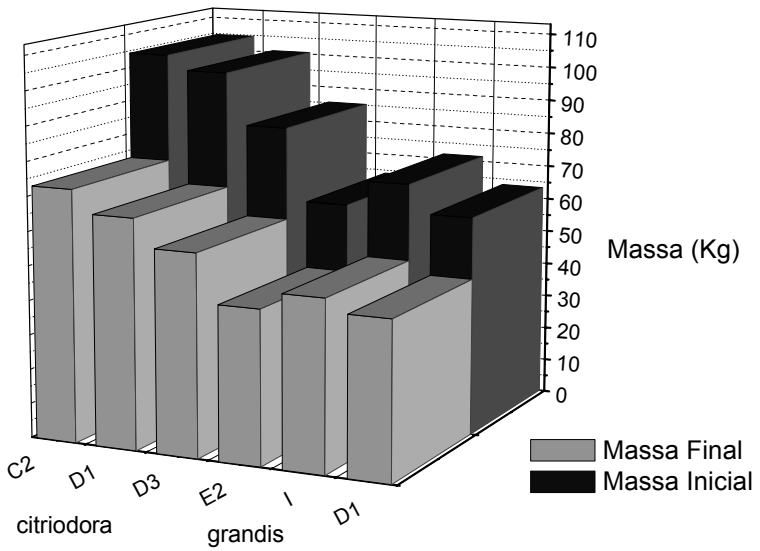

Figura 4.16 Perda de massa para corpos de prova de carbonização C2.

n = 6 $\bar{y}$ = 30,83% s = 1,76%

Por este motivo, procurou-se um método alternativo para a avaliação da degradação por meio da redução de área. Neste caso a redução para o *E. citriodora* é de 49% em relação área inicial, enquanto para o *E. grandis* é 50%, indicando uma pequena diferença entre a degradação.

Também foi possível notar que a redução da seção não ocorre de modo igual. Para a menor dimensão da viga, por exemplo, a espessura do carvão é menor, ver *Tabela 4.10, medidas b e h*. Fato não considerado pela normalização.

A diferença entre as duas dimensões é de 9% para o *E. citriodora* e de 16% para o *E. grandis*. No entanto, ao considerar as duas espécies conjuntamente esta diferença é de 12%.

Tabela 4.10 Espessura de carvão residual obtido experimentalmente e os dados calculados com base nas normas: AS 1720.4 e Eurocode 5.

CP		b (mm)	h (mm)	Variação nas dimensões (%) b x h	(e) Dados Experimentais	(e) AS 1720.4 (β_n)(1)	(e) Eurocode 5 (β_0)(2)	(e) Eurocode 5 (β_n)(1)
citriodora	D3	26,5	31,5	15,8	29,0	23,9	24,9	27,4
	D1	28,5	31,0	8,1	30,0	26,2	27,9	30,7
	C2	29,0	30,0	3,3	29,5	23,8	25,3	27,8
grandis	D1	31,0	24,0	22,6	27,5	27,7	27,1	28,8
	I	28,0	32,0	12,5	30,0	30,1	29,0	31,8
	E2	26,1	29,5	11,5	27,8	27,1	22,6	24,9
$\bar{y}$		28,2	29,6	12,30	28,9	26,5	26,1	28,5
s		1,78	2,93	6,60	1,09	2,40	2,32	2,47
CV		6,33	9,87	53,64	3,76	9,08	8,89	8,64
s^2		3,18	8,57	43,53	1,19	5,78	5,39	6,09

(e) Espessura carbonizada em mm;
(1) Espessura calculada com base na taxa de carbonização nominal, ou seja, considerando o arredondamento das quinas;
(2) Espessura calculada com base na taxa de carbonização com exposição linear.

Por meio da (*Figura 4.17)*, podemos concluir que a espessura de carbonização obtida pelos dados experimentais para as duas espécies, ver *Tabela 4.9*, demonstram uma aproximação maior com os dados referentes aos valores previstos pelo Eurocode 5 para taxa nominal. Em particular para os dados referentes ao *grandis*, os resultados são muito próximos da norma Australiana.

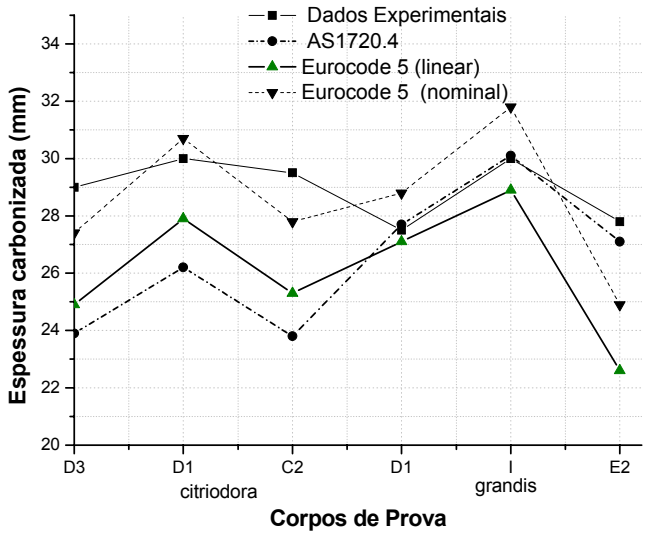

Figura 4.17 Espessura de Carbonização segundo os dados experimentais e previstos por norma.

No projeto estrutural, para seções retangulares, a peça é sempre utilizada no sentido da maior dimensão, Equação 4.1 e 4.2, (*Figura 4.18)*. Com base nos resultados desses ensaios, a maior dimensão sofre maior redução pela degradação. Portanto, seria necessário avaliar a maior perda de capacidade de carregamento pela formação de carvão nesta direção durante a execução dos cálculos, pela maior perda de seção.

$$I = \frac{b.h^3}{12}, \tag{4.1}$$

$$\sigma = \frac{M}{I}.y_{\max}, \tag{4.2}$$

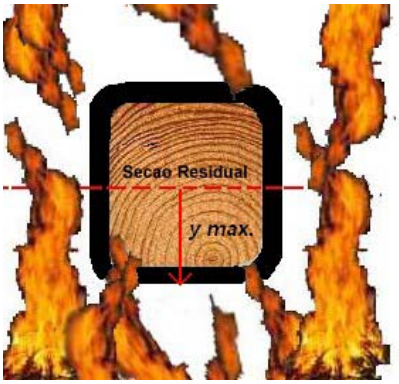

Figura. 4.18. Seção transversal retangular.

As *Tabelas 4.11 e 4.12* apresentam os valores médios dos resultados referentes aos ensaios de carbonização nas três seções de implantação de termopares, fornecendo o tempo médio de carbonização e a taxa de carbonização respectivamente.

Tabela 4.11 Tempo médio de carbonização (t) das diferentes espécies por média referente às seções.

Espécie	CP	Topo t (min.)			Face t (min.)			Quina t (min.)		
		10 mm	20 mm	30 mm	10 mm	20 mm	30 mm	10 mm	20 mm	30 mm
citriodora	D3	8,55	20,06	37,12	9,96	25,86	49,83	6,82	19,89	38,03
	D1	11,41	26,09	50,40	10,13	31,23	55,83	6,71	20,22	42,90
	C2	11,69	24,16	45,16	12,56	29,53	50,61	8,51	21,53	43,31
grandis	D1	7,94	19,72	36,43	11,17	33,91	54,29	6,20	21,84	39,36
	I	9,61	23,17	40,19	10,55	30,55	57,97	8,03	23,24	44,79
	E2	11,20	23,77	40,01	12,12	27,64	45,26	11,99	26,04	43,71

Quando analisada a carbonização da face, embora fosse esperado um melhor desempenho da espécie *E. citriodora* em função de sua densidade superior, a presença de maior conteúdo de umidade nas vigas de *E. grandis*, foi um fator de grande influência no tempo de carbonização, levando a uma homogeneização dos resultados.

A taxa de carbonização é calculada aplicando a Equação 2.5, onde (x_c = 30 mm) e t é o tempo médio decorrido até que os termopares atinjam a temperatura de 290° C, como estes dados são fornecidos por quatro termopares, o tempo médio é utilizado.

A Tabela 4.12 fornece os valores da taxa de carbonização: A taxa de carbonização da Topo é ligeiramente superior (β=0,73 mm/min.) que a da quina (β=0,71 mm/min.) as quais são superiores a da face (β=0,58 mm/min.). A degradação no topo foi mais rápida para o *E. grandis* (β=0,77 mm/min.), enquanto o *E. citriodora* (β=0,68 mm/min.). No Capítulo 3, a (*Figura 3.19*) ilustra essas três posições (topo, quina, face).

Tabela 4.12 Taxa de carbonização (β) das diferentes espécies por média referente às seções.

Espécie	CP	Topo β(mm/min.)			Face β(mm/min.)			Quina β(mm/min.)		
		10 mm	20 mm	30 mm	10 mm	20 mm	30 mm	10 mm	20 mm	30 mm
citriodora	D3	1,17	1,00	0,80	1,00	0,77	0,60	1,46	1,00	0,79
	D1	0,87	0,76	0,59	0,98	0,64	0,54	1,49	0,99	0,70
	C2	0,85	0,83	0,66	0,79	0,67	0,59	1,17	0,93	0,69
$\bar{y}$		0,96	0,86	0,68	0,92	0,69	0,58	1,37	0,97	0,73
grandis	D1	1,26	1,01	0,82	0,89	0,59	0,55	1,61	0,91	0,76
	I	1,04	0,86	0,74	0,95	0,65	0,52	1,24	0,86	0,67
	E2	0,89	0,84	0,75	0,82	0,72	0,66	0,83	0,77	0,68
$\bar{y}$		1,06	0,90	0,77	0,88	0,65	0,58	1,22	0,84	0,70

$\bar{y}$ média

As observações foram coletadas em três diferentes posições na viga, deste modo pode ser observado que a degradação é ligeiramente maior no topo, seguida pela quina e posteriormente pela face da viga, conforme ilustram as (*Figuras 4.10 a 24)* exceção para o *E. grandis,* que apresenta uma taxa de carbonização maior no topo que nas quinas.

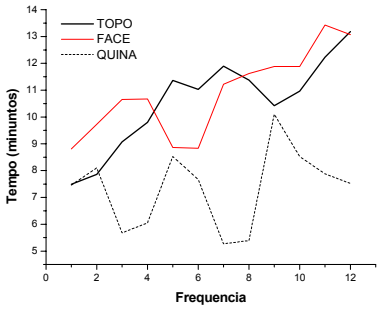

Figura 4.19. Tempo de Carbonização para o E. citriodora, 10mm.

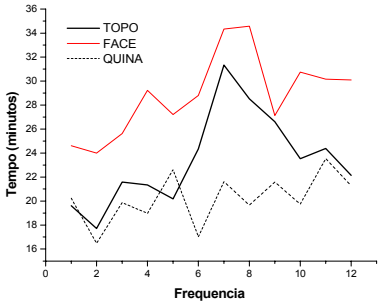

Figura 4.20. Tempo de Carbonização para o E. citriodora, 20mm.

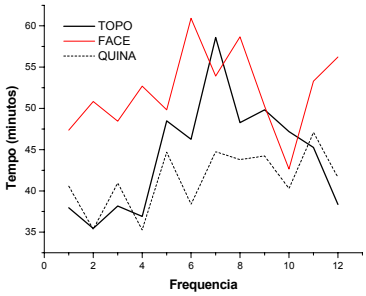

Figura 4.21. Tempo de Carbonização para o E. citriodora, 30mm.

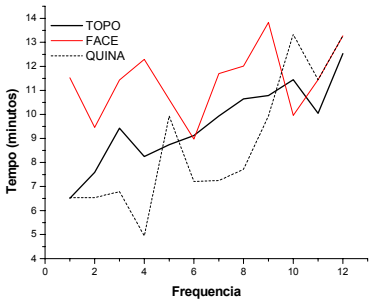

Figura 4.22 Tempo de Carbonização para o E. grandis, 10mm

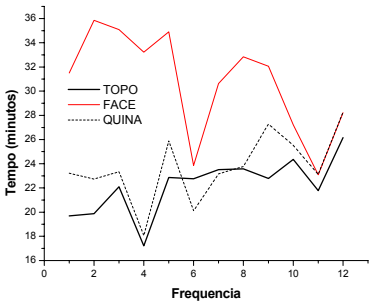

Figura 4.23 Tempo de Carbonização para o E. grandis, 20mm

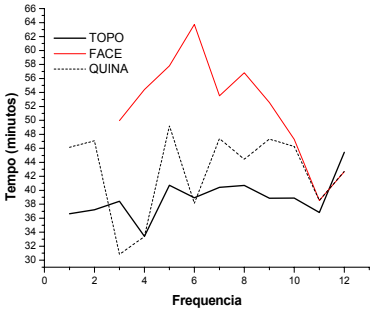

Figura 4.24 Tempo de Carbonização para o E. grandis, 30mm

É possível notar que a degradação térmica é maior para o topo e quina, (*Figuras 4.25 a 4.27)*. O desvio padrão e o coeficiente de variação se reduzem em função a profundidade, os dados tendem a se homogeneizarem: 10mm ($s = 0{,}0595$, CV=23,55); 20 mm ($s = 0{,}0318$, CV=16,39); 30mm ($s = 0{,}0219$,CV=13,78).

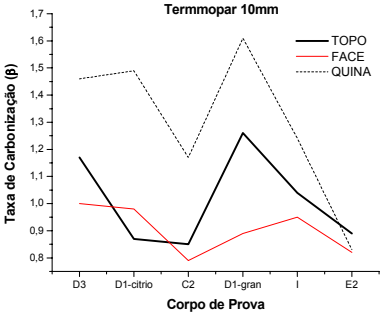

Figura 4. 25 Taxa de Carbonização, profundidade 10mm.

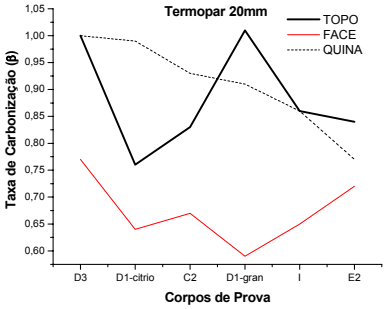

Figura 4.26 Taxa de Carbonização, profundidade 20mm.

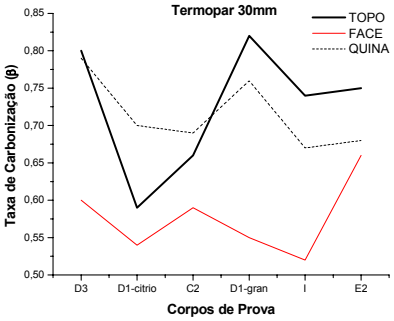

Figura 4. 27 Taxa de Carbonização, profundidade 30mm.

Os resultados permitiram observar que em média os valores experimentais para a taxa de carbonização da face: 0,58 mm/min., estão mais próximos dos valores tabelados pelo Eurocode 5: 0,55 mm/min., que dos valores calculados por meio da norma Australiana AS 1720.4: 0,51 mm/min, (*Figura 4.28).*

A norma australiana calcula a taxa de carbonização tendo como referência a densidade básica a 12%, Equação 2.2, enquanto o Eurocode 5 estabelece valores tabelados para madeiras serradas folhosas com densidade básica igual ou superior a 450kg/m^3, mostrando-se um método prático e conservador.

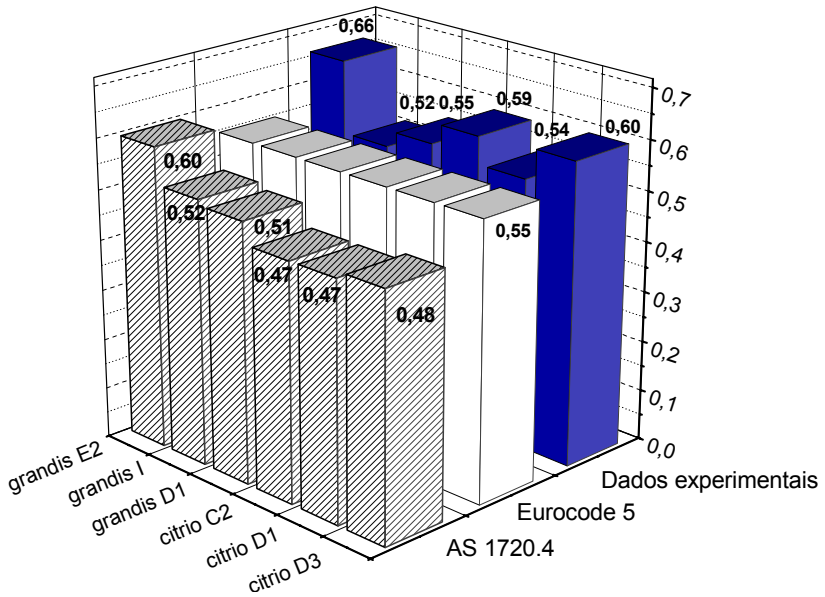

Figura 4.28 Comparação entre valores de Taxa de Carbonização, normas e dados experimentais.

A (*Figura 4.29)* apresenta um gradiente térmico com base nos resultados médios da leitura de 72 termopares alocados na seção 2 (ver Capítulo 3), correspondentes à taxa de carbonização de face,seção 2. As temperaturas são expressas a cada um centímetro. Deste modo, é possível avaliar que após aproximadamente 30 minutos de exposição ao fogo com aquecimento padronizado pela curva ASTM E-119, a temperatura da superfície da viga é de 840 ^{o}C e a três centímetros no interior da seção esta temperatura é de 180 ^{o}C, perfazendo as temperaturas intermediárias como mostra a referida ilustração.

O diagrama de caixa mostra que a variação para os resultados na profundidade de 30 mm são menos variáreis, quanto à carbonização inicial para 10mm e 20 mm.

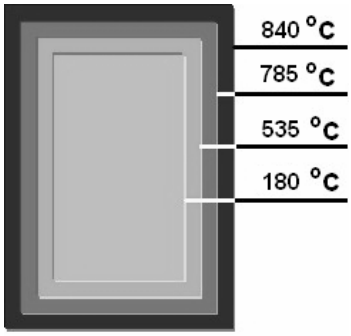

Figura 4.29 Gradiente de temperatura interno da seção correspondente a aproximadamente 30 minutos de exposição para leituras da seção 2.

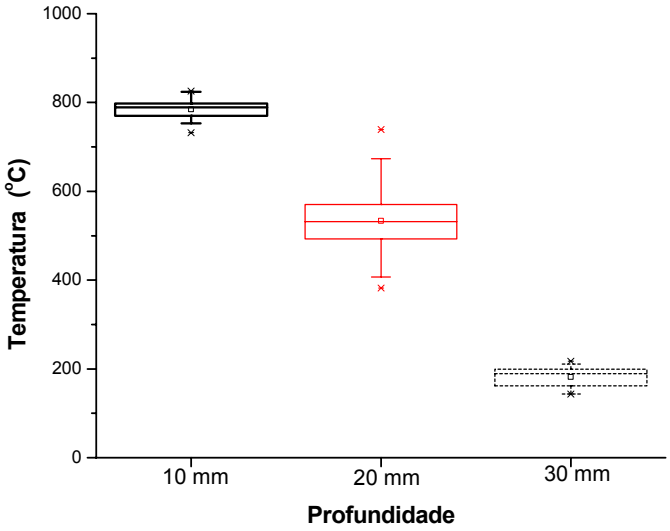

Figura 4.30 Diagrama de caixa para as leituras dos termopares a profundidade de 10mm, 20mm e 30mm.

A (*Figura 4.31)* ilustra por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) a degradação de uma amostra da madeira de *E. citriodora*. As ilustrações se referem a 3 pontos distintos da amostra: madeira sã, zona de pirólise e região carbonizada, apresentadas sob dois valores de ampliação: 250 e 2000 vezes.

A zona de pirólise se apresenta na madeira com a cor marrom escura, onde as temperaturas variam de 290 °C a aproximadamente 200 °C (base da zona de pirólise) (Holmes, 1977). A interface entre a zona de pirólise e região carbonizada é denominada base da camada carbonizada para a qual se adota a temperatura referência na definição do carvão: 550 °F ou 288 °C, (White,1988).

É possível observar, por comparação, que a degradação resultante da ação térmica provoca na região de madeira carbonizada maior presença de vazios, tornando-a assim mais porosa, o que efetivamente caracteriza a baixa densidade do carvão e o efeito isolante térmico que lhe é peculiar.

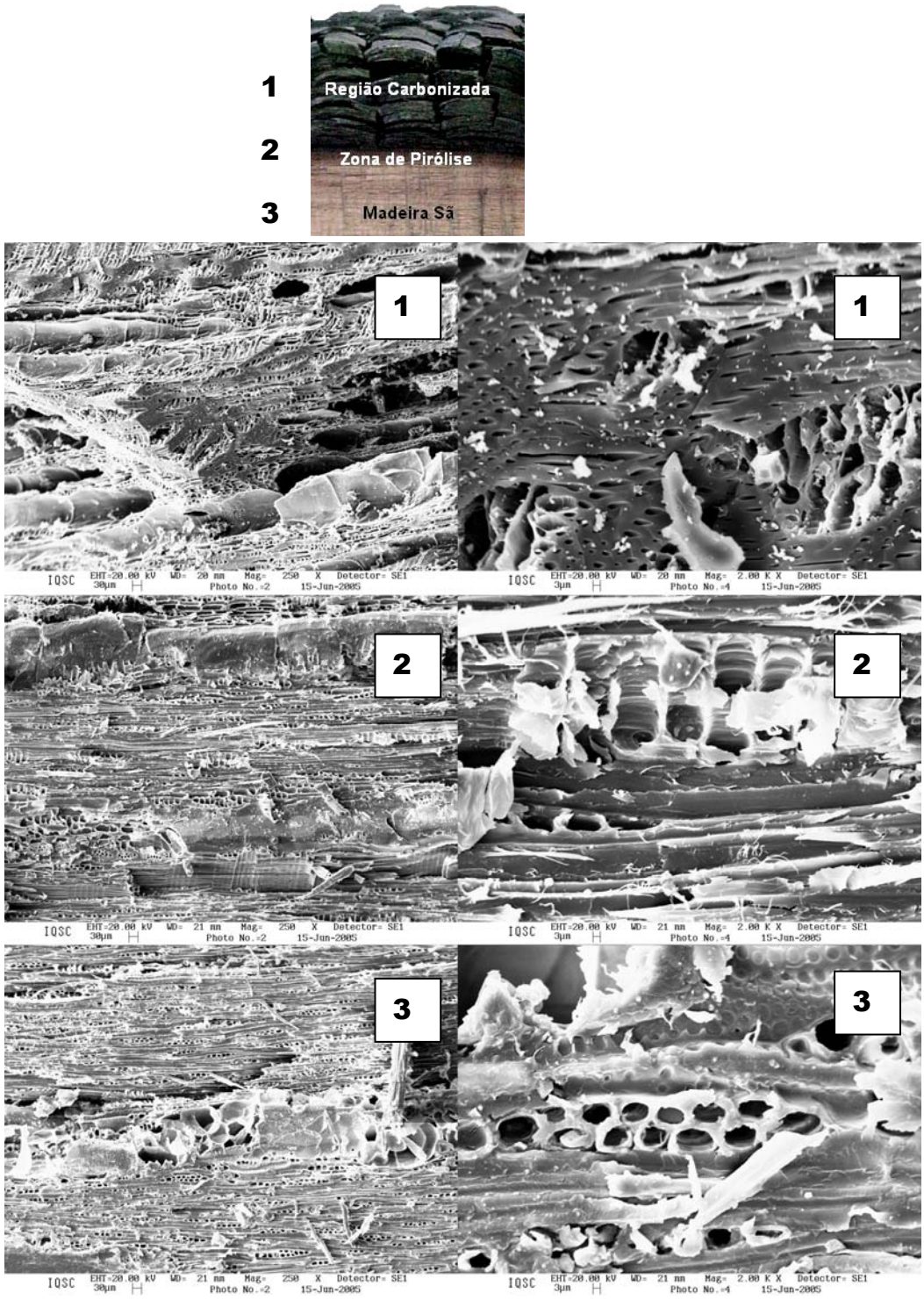

Figura 4.31 Zonas de degradação e Microscopia Eletrônica de Varredura para o E. citriodora (250x e 2000x)

4.6 RETRATIBILIDADE DA MADEIRA

Os resultados dos ensaios apresentados na *Tabela 4.13*, mostram a variação da retratibilidade volumétrica e linear com a umidade desde a madeira saturada até completamente seca (*u*=0%).

Tabela 4.13 . Resultados e médias para os ensaios de retratibilidade.

Espécie	CP	Retração axial (%)			Retração radial (%)			Retração tangencial (%)			Variação volumétrica			ρ_{ap} (g/cm^3)			ρ_{bas}(g/cm^3)		
citriodora	A1-1	-0,22	-0,14	0,32	6,26	6,07	7,47	7,80	7,97	8,60	15,46	15,8	18,62	1,06	1,09	1,06	0,93	0,94	0,88
	A1-2	-0,12			6,23			8,08			15,89			1,14			0,94		
	A1-3	-0,08			5,74			8,03			16,26			1,08			0,95		
	F-1	0,68	0,90		8,19	8,28		8,59	8,70		19,98	20,0		1,02	1,06		0,82	0,85	
	F-2	0,83			7,72			8,82			19,85			1,11			0,89		
	F-3	1,20			8,95			8,94			20,21			1,06			0,85		
	E2-1	0,34	0,28		7,89	8,20		9,16	8,49		19,92	19,4		1,05	1,08		0,84	0,86	
	E2-2	0,12			7,96			8,30			19,63			1,11			0,88		
	E2-3	0,40			8,76			8,02			19,65			1,08			0,87		
	C2-1	0,26	0,26		7,78	7,33		9,38	9,25		19,97	19,2		1,05	1,04		0,90	0,89	
	C2-2	0,29			7,39			9,23			19,30			1,04			0,89		
	C2-3	0,25			6,82			9,13			18,40			1,02			0,88		
grandis	4-1	0,08	0,02	0'23	8,06	7,89	7,35	7,38	6,97	7,62	17,33	17,2	17,31	0,92	0,93	0,86	0,75	0,76	0,70
	4-2	-0,02			7,15			6,77			15,50			0,94			0,77		
	4-3	0			8,48			6,77			19,06			0,93			0,75		
	1-1	0,18	0,1		8,84	8,89		7,95	7,88		19,39	19,4		0,95	0,95		0,77	0,76	
	1-2	0,14			8,69			7,84			19,39			0,93			0,75		
	1-3	-0,02			9,15			7,85			19,43			0,96			0,77		
	C3-1	0,44	0,55		6,78	6,7		6,95	6,37		15,80	15,1		0,65	0,62		0,53	0,51	
	C3-2	0,26			6,55			6,77			15,09			0,64			0,53		
	C3-3	0,94			6,77			5,39			14,42			0,58			0,48		
	D1-1	0,23	0,24		6,06	5,93		9,33	9,28		17,69	17,4		0,93	0,93		0,78	0,77	
	D1-2	0,19			5,80			8,87			16,73			0,93			0,78		
	D1-3	0,29			5,94			9,64			18,00			0,94			0,76		

A variação das retrações e volumetria do *E. citriodora* são superiores as registradas pelos dados referentes ao *E. grandis.* A variação é de:

- 30 % em retração axial;
- 1,6 % em retração radial;
- 11,4 % em retração tangencial e
- 7% em variação volumétrica

Os valores obtidos nesse ensaio são semelhantes aos obtidos por Oliveira (1997), porém superiores para a contração radial e volumétrica, sendo a radial: 6,6 para o *citriodora* e 4,7 para o *grandis*; tangencial: 9,0 para o *citriodora* e 9,1 para o *grandis*; volumétrica: 15,4 para o *citriodora* e 13,6 para o *grandis*, o Coeficiente de Anisotropia (razão entre a

retração tangencial pela radial) foi de 1,4 para o *citriodora* e 2,0 para o *grandis*, enquanto os valores determinados neste trabalho foram: 1,20 para o *citriodora* e 1,10 para o *grandis*.

A avaliação entre corpos de prova de *E. citriodora* indica que as retrações axiais,radiais tangencial e variação volumétrica foi maior para os corpos de prova F onde o coeficiente de anisotropia C.A. é de 1,06, e menores para as amostras A1(C.A.=1,32) as quais apresentam melhor estabilidade dimensional. .

Para o *E. grandis* a amostra C3 (C.A.=0,95) apresenta médias superiores para a retração axial, enquanto os menores valores são da amostra 4 (C.A.=0,85). No entanto, em relação a retração radial, tangencial e volumétrica a amostra C3 apresenta os menores valores, sendo que: a amostra 1 (C.A.=0,89) possui valores médios superiores para retração radial e a amostra D1 (C.A.=1,56) os maiores valores para retração tangencial e retração volumétrica, além do maior valor para o coeficiente de anisotropia.

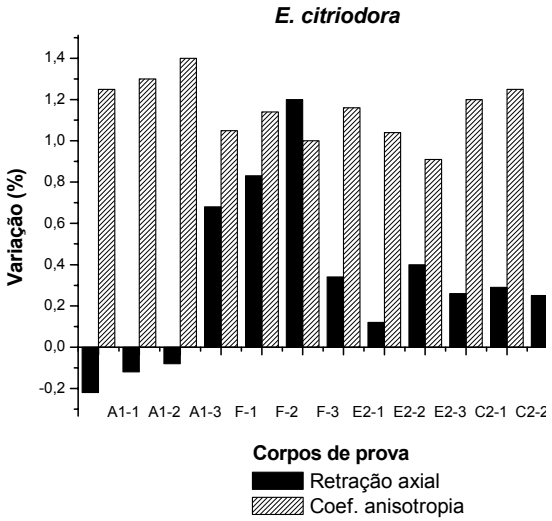

Figura 4.32 Resultados de retração axial e coeficiente de anisotropia para E. citriodora.

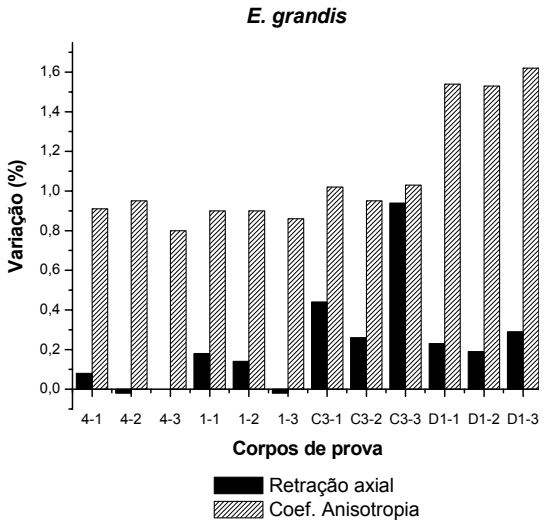

Figura 4.33 Resultados de retração axial e coeficiente de anisotropia para E. grandis.

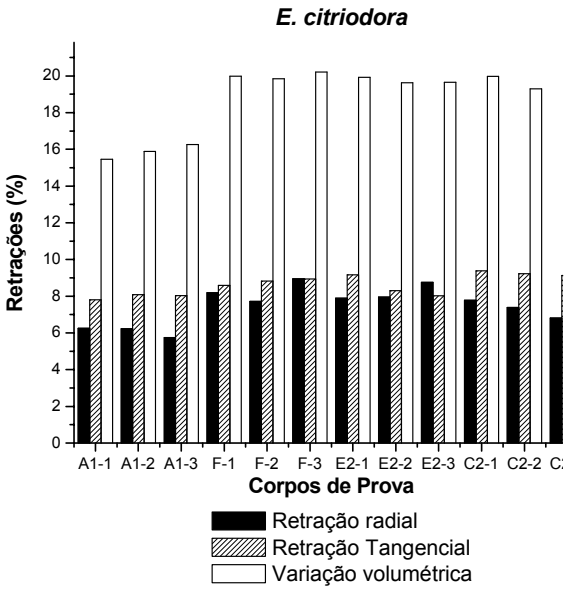

Figura 4.34 Resultados de retração radial, tangencial e retração volumétrica para E. citriodora

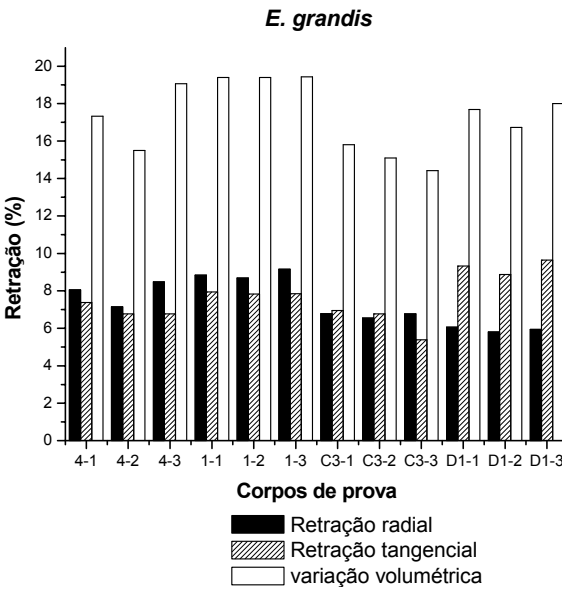

Figura 4.35 Resultados de retração radial, tangencial e retração volumétrica para E. grandis

4.7 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

A análise química da madeira determinou a seguinte composição para as duas espécies estudadas, ver *Tabelas 4.14 e 4.15*:

Tabela 4.14 . Composição química da madeira de *E.citriodora* e *E. grandis* .

Espécie	CP	Cinzas (%)	Extrativos (%)	Lignina* (%)	Celulose (%)	Polioses (%)
citriodora	A1	0,45	11,83	26,00	47,61	20,27
	C2	0,52	14,39	25,67	46,71	19,64
	E2	0,33	15,58	24,77	46,10	20,86
	F	0,26	18,34	24,65	48,25	22,01
grandis	1	0,11	9,45	28,93	52,67	12,22
	4	0,10	12,74	31,26	50,18	13,25
	C3	0,17	10,12	31,08	50,89	12,15
	D1	0,17	11,01	32,53	46,77	13,08

* Teor de lignina total, somatória da lignina Klason e lignina solúvel.

Tabela 4.15. Medidas estatísticas dos resultados da composição química da madeira de *E.citriodora* e *E. grandis*.

Componentes(%)	citriodora				grandis			
	n	$\bar{y}$	s	CV	n	$\bar{y}$	s	CV
Cinzas	8	0,39	0,11	27,75	8	0,14	0,35	25,42
Lignina	8	25,27	0,63	2,51	8	30,95	1,41	4,55
Celulose	8	47,17	1,22	2,59	8	50,13	2,31	4,61
Polioses	8	20,69	0,99	4,81	8	12,67	0,55	4,31
Extrativos	8	15,03	2,63	17,50	8	10,83	1,48	13,68

Os teores de lignina apresentados para ambas as espécies estão em acordo com os valores descritos na literatura para o gênero, Trugilho et al (2004). De modo similar podemos dizer o mesmo a respeito dos teores de celulose (45% a 50%), polioses (20% a 25%) e lignina (20% a 30%), descritos para as madeiras de folhosas por Wood: Its Structure and Properties (1981), Machado (2000), Cote (1965).

Em relação a quantidade de cinzas, a Enciclopedia of Chemical Technology (1998), fornece valores de quantidade de cinzas para espécies tropicais variando entre 0,5% a 2% da massa final da madeira. Os resultados para as amostras ensaiadas estão neste intervalo.

A espécie *citriodora* apresenta valores superiores para as polioses ou hemiceluloses, teor de cinzas e extrativos. O *grandis* apresenta valores superiores para lignina e celulose. Menores quantidades de lignina, como no caso do *E. citriodora,* estão associadas a uma menor de produção de carvão. Importante ressaltar que a presença da lignina está relacionada à estabilidade da madeira durante o início da fase de pirólise. Menores quantidades de extrativos apresentadas pelo *grandis* são favoráveis a menor produção de chamas, devido à relação de extrativos com a liberação de chamas e calor.

Os resultados referentes a polioses confirmam Rowell (1991) ao afirmar a maior presença deste componente em espécies mais densas. Elas estão associadas a formação de gases, (IPT, 1986).

A correlação entre os valores da composição química com os valores obtidos da curva termogravimétrica permite as seguintes observações:

Tabela 4.16. Correlação simples para os resultados de TG e Composição Química.

	m_{450}	m_{600}	T_{max}	espécie
Cinzas	0,13	0,41	-0,05	0,859*
Extrativos	0,17	0,03	-0,49*	0,747*
Lignina	-0,10	-0,62*	0,17	-0,943*
Celulose	-0,21	0,17	0,33	-0,674*
poliose	0,32	0,32	-0,19	0,985*
espécie	0,25	0,42	-0,15	--

* Significativo a 5% de probabilidade;
m_{450}= massa final da amostra a 450 ^{0}C ;
T_{max} = taxa máxima de perda de massa;
M_{600} = massa final da amostra a 600 ^{0}C.

A composição química possui forte correlação e valor significativo a 5% de probabilidade com as espécies;

Com relação à massa residual, somente a lignina descrita para perda de massa a 600ºC possui correlação moderadamente significativa.

4.8 PODER CALORÍFICO

Para a realização deste ensaio foi determinado inicialmente o teor de umidade das amostras *u* =12%. O poder calorífico para os corpos de prova ensaiados da espécie de *Eucalyptus citriodora* foi de 17.359,00 J/g, obtido pela média aritmética dos três valores experimentalmente obtidos. O valor representativo do poder calorífico para a espécie de *Eucalyptus grandis* foi de 17.846,00 J/g, obtido pela média aritmética dos três valores experimentalmente obtidos, Tabela 4.17.

Tabela 4.17. Poder calorífico do *E. citriodora* e *E. grandis*.

Espécie	massa (g)	Poder calorífico (J/g)
citriodora	0,5291	18033
	0,5179	16830
	0,5135	17213
grandis	0,5228	17904
	0,5173	17821
	0,5135	17813

O valor dos resultados experimentais do poder calorífico médio para ambas as espécies de eucalipto analisadas mostraram-se diferentes como o esperado, em função das suas densidades.

5. DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO MODELO

5.1 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O planejamento experimental realizado permitiu estabelecer a relação entre o valor da resposta y com k variáveis quantitativas, Equação 5.1, com o auxílio do programa para cálculos estatísticos Minitab 13 (2004):

$$y = f(x_1^*, x_2^* ... x_k^*) = f(\tilde{x}^*), \tag{5.1}$$

A função $f(\tilde{x}^*)$, assume uma forma exponencial e devido a repetição dos ensaios sob as mesmas condições, as medidas da resposta y sofrem variabilidade, sendo a relação desta função afetada por um erro:

$$y = f(\tilde{x}^*) + \varepsilon, \tag{5.2}$$

onde:
y é a variável dependente ou resposta;
$(\tilde{x}^*)$ são as variáveis independentes ou variáveis explicativas;
ε é o erro experimental.

Foram realizados dois tipos de experimentos:

1) $C_1 \rightarrow$ corpos de prova com pequena dimensão sob uma face de exposição $(n = 24)$ e
2) $C_2 \rightarrow$ exposição de vigas com dimensões estruturais, quatro faces de exposição $(n = 6)$.

O modelo a ser proposto para taxa de carbonização nesta pesquisa é calculado a partir do tempo no qual os diferentes termopares a três profundidades atingem a temperatura de 290^0C, segundo os procedimentos descritos no Capítulo 3, com base no trabalho desenvolvido por White (1988).

Primeiramente foram estimados os parâmetros m, $\ln m$ e a para o Tempo x Deslocamento do carvão, por meio de uma regressão linear dos resultados da carbonização em corpos de prova de pequena dimensão e corpos de prova estruturais, referente às três profundidades de localização dos termopares e os respectivos tempos associados estas leituras. Esta estimativa foi feita para se obter os parâmetros do deslocamento da camada carbonizada em função do tempo.

Foram estimados valores dos parâmetros para os resultados obtidos de peças de pequena dimensão com exposição unidimensional e valores para peças com dimensão estrutural e quatro faces de exposição.

Para os ensaios de carbonização C_1 foram adotadas as seguintes variáveis independentes:

x_1 teor de umidade (%);

x_2 densidade aparente (g/cm^3);

x_3 espécie;

x_4 condutividade térmica (W/mK);

x_5 coeficiente de anisotropia;

O modelo de carbonização para a carbonização C_1 é linear, o que representa a taxa de carbonização comumente utilizada. Este se mostrou mas adequado para estimar a taxa de carbonização para esse ensaio em detrimento da pouca variação das propriedades entre as espécies:

$$t = mx_c, \tag{2.5}$$

onde:
t = tempo em minutos;
x_c = espessura da camada carbonizada a partir da superfície original;
m = taxa de carbonização.

Para os ensaios de carbonização C_2 foram investigados as seguintes variáveis independentes ou fatores:

x_1 teor de umidade (%);

x_2 densidade básica (g/cm^3).

O modelo de carbonização determinado para a carbonização C_2 tem como base um modelo não-linear. O parâmetro a (Equação 5.3), determinado para os ensaios de C_2,

foi fixado e determinado pela média aritmética entre o maior valor e o menor valor deste parâmetro determinado pela regressão linear de $\ln(t)$ por $\ln(x_c)$, ver Tabela 5.6.

Com o valor de a fixado, somente um parâmetro precisa ser estimado: $\ln m$, o qual é obtido pela Equação 5.3, que expressa o comportamento não-linear da carbonização.

$$t = mx_c^a \tag{2.6}$$

$$\ln(t) = \ln(m) + a.\ln(x_c) \tag{5.3}$$

Para corpo de prova um $\ln(m)$ é obtido e então relacionado com as propriedades determinadas individualmente para cada um dos corpos de prova, por meio de regressão.

5.2 ANÁLISE DE ADEQUAÇÃO DO MODELO

Para verificar a adequação do modelo de taxa de carbonização para C_1 foi utilizada uma análise residual considerando o seguinte procedimento:

1) Para verificar se a variância é constante serão utilizados os gráficos dos resíduos $\hat{e}_i$ x valores ajustados $\hat{y}_i$, onde os valores estimados denotados por $\hat{y}_i$ são obtidos pela equação 5.3, e os resíduos pela Equação 5.4, (Neto et al, 2001), onde:

$$\hat{e}_i = y_i - \hat{y}_i, \tag{5.4}$$

sendo:

$\hat{e}_i$ resíduos;

y_i são os dados experimentais;

$\hat{y}_i$ são os dados ajustados ou estimados pelo modelo.

2) A verificação da normalidade dos resíduos será realizada através do gráfico de probabilidade normal dos resíduos e verificar a independência dos resíduos;

Para verificar a adequação do modelo foi realizada uma análise residual, além da verificação do coeficiente de determinação (R^2), que é a proporção da variação total da variável resposta que é explicada pela reta de regressão estimada.

Estudamos o comportamento do modelo usando o conjunto de dados observados (dados experimentais), notadamente as discrepâncias entre os valores observados e os valores ajustados pelo modelo, ou seja, fazendo uma análise dos resíduos. Existem várias técnicas formais para conduzir essa análise, foram aqui ressaltados métodos gráficos, Draper e Smith (1998) ou Martínez (2001). A avaliação do modelo para C_2, em detrimento do número de observações reduzido: (*n=6),* é realizado pela análise do p valor e do coeficiente de determinação R^2.

5.3 MODELO PARA CARBONIZAÇÃO C1

A Tabela 5.1 apresenta os tempos de carbonização para os diferentes corpos de prova e os valores são resultados da média de 2 termopares. É apresentado o parâmetro *m* obtido a partir da regressão dos tempos em função das medidas de profundidade.

Tabela 5.1 Valores médios de tempo de carbonização em minutos .

	CP	Tempo (minutos)		
		5mm	10mm	15mm
citriodora	A1-1	31,5	45,9	55,9
	A1-3	32,3	48,0	51,9
	A1-4	24,6	42,9	52,6
	C2-3	35,9	42,6	58,8
	C2-4	38,2	47,0	60,3
	C2-6	43,7	52,3	60,5
	E2-2	30,8	42,8	58,1*
	E2-4	41,4	50,6	59,7
	E2-7	37,0	49,5	60,0*
	F-1	36,4	41,7	55,3
	F-2	32,4	41,5	50,4
	F-3	36,4	41,7	55,13
$\bar{y}$		35,0	45,5	56,0
grandis	1-1	32,7	48,5	62,3
	1-3	36,0*	43,2	54,3
	1-4	30,4	40,4	48,2
	4-1	33,9	46,6	54,6*
	4-2	34,3	46,8	57,7
	4-3	33,3	47,8	60,3
	C3-2	32,7	46,5	53,3*
	C3-3	29,3	44,4	59,0
	C3-4	36,25	48,6	56,7
	D1-1	33,8	48,1	58,0
	D1-2	40,3	53,8	59,7
	D1-3	34,3	46,6	55,8
$\bar{y}$		33,8	46,7	52,2

* valor correspondente à leitura de um termopar.

A Tabela 5.2 demonstra coeficiente de variação inferior a 18% considerado bom em função do número de observações.

Tabela 5.2. Medidas estatísticas dos resultados do tempo de carbonização.

	Tempo em minutos		
	5 mm	10 mm	15 mm
$\bar{y}$	34,49	46,16	56,61
s	4,08	3,56	3,58
CV	11,83	7,71	6,32

$\bar{y}$ média aritmética; s Desvio padrão; CV Coeficiente de variação.

A Tabela 5.3 apresenta as propriedades a serem incorporadas ao modelo. Também é apresentado o valor de *m* para cada corpo de prova, calculado com base na regressão dos 3 tempos obtidos pelas 3 profundidades de observação da base carbonizada (5 mm, 10 mm e 15 mm).

Tabela 5.3. Variáveis e parâmetro para o modelo.

Espécie	CP	u (%)	ρ_{ap} (g/cm^3)	Espécie	Condutividade Térmica (W/mK)	Coeficiente de anisotropia	*m*
citriodora	**A1-1**	18,5	1,01	1	0,42	1,25	4,16
	A1-2	19,3	1,03	1	0,44	1,30	4,06
	A1-3	20,0	1,03	1	0,43	1,40	3,83
	C2-3	22,4	1,01	1	0,39	1,20	4,25
	C2-4	13,2	1,07	1	0,41	1,25	4,47
	C2-6	19,9	1,05	1	0,44	1,34	4,71
	E2-2	24,3	1,08	1	0,42	1,16	4,15
	E2-4	22,9	1,10	1	0,42	1,04	4,60
	E2-7	29,4	1,05	1	0,44	0,91	4,51
	F1	23,7	1,12	1	0,43	1,05	4,08
	F2	24,5	1,11	1	0,48	1,14	3,81
	F3	20,0	1,08	1	0,43	1,00	4,07
Grandei	**1-1**	22,3	0,89	-1	0,36	0,90	4,52
	1-3	18,8	0,84	-1	0,36	0,90	4,08
	1-4	21,4	0,87	-1	0,36	0,86	3,65
	4-1	16,9	0,96	-1	0,36	0,91	4,16
	4-2	17,6	0,88	-1	0,36	0,95	4,30
	4-3	17,8	0,95	-1	0,39	0,80	4,43
	C3-2	13,3	0,82	-1	0,30	1,02	4,08
	C3-3	12,0	0,87	-1	0,33	1,03	4,22
	C3-4	12,0	0,83	-1	0,33	0,80	4,34
	D1-1	17,0	0,80	-1	0,38	1,54	4,34
	D1-2	15,5	0,96	-1	0,37	1,53	4,67
	D1-3	18,3	0,88	-1	0,37	1,62	4,21

Foi feita uma regressão dos valores de *m* em relação a cada uma das propriedades investigadas apresentadas na Tabela 5.3, de onde resulta a Equação 5.5.

A Tabela 5.4 é apresenta a matriz de correlação entre a taxa de carbonização obtida pelos dados experimentais e as propriedades das madeiras estudadas. Por meio da observação podemos concluir que:

A densidade apresenta:

- Correlação moderada e significativa a 5% de probabilidade com o teor de umidade;
- forte correlação e significativa a 5% de probabilidade com a espécie;
- correlação não-significativa com o coeficiente de anisotropia;
- moderada correlação significativa a 5% de probabilidade com o teor de cinzas e polioses;
- moderada correlação negativa e significativa a 5% de probabilidade com o teor de celulose e lignina;

As espécies apresentam:

- Forte correlação e significativa a 5% de probabilidade com a condutividade térmica, extrativos, teor de cinzas e poliose;
- forte correlação negativa e significativa a 5% de probabilidade com a porcentagem de lignina e celulose;
- correlação não-significativa com o coeficiente de anisotropia.

Tabela 5.4 Valores de correlação simples entre as propriedades da madeira.

	ρ_{ap}	espécie	λ	CA	cinzas	extrativos	lignina	celulose
espécie	0.86*							
λ	0.85*	0.86*						
CA	0.23	0.21	0.26					
cinzas	0.63*	0.86*	0.63*	0.42				
extrativos	0.83*	0.75*	0.76*	-0.01	0.40*			
lignina	-0.79*	-0.94*	-0.80*	0.42	-0.72*	-0.72*		
celulose	-0.68*	-0.67*	-0.64*	-0.67*	-0.68*	-0.56*	0.44*	
poliose	0.90*	0.98*	0.89*	0.19	0.77*	0.83*	-0.93*	-0.68*

ρ_{ap} Densidade aparente;

λ Condutividade térmica transversal a grã;

CA Coeficiente de anisotropia, razão entre a contração tangencial e radial;

* significativo a 5% de probabilidade.

Diferentes modelos com e sem intercepto foram testados e se mostraram não-significativos até ordem 2 e com interações, para m. As demais variáveis investigadas (espécie, condutividade térmica, coeficiente de anisotropia) não se mostraram significativas para expressar a taxa de carbonização, bem como os modelos com o intercepto. A regressão dos dados da Tabela 5.3 possibilitou, por fim sem o intercepto, a seguinte expressão para explicar a carbonização dos corpos de prova:

$$m = 0{,}205u + 4{,}57\rho - 0{,}22u\rho \qquad (5.5)$$

onde:

m é o parâmetro estimado (taxa de carbonização);

ρ é a densidade aparente (g/cm^3) e

u é o teor de umidade (%);

u x ρ interação entre umidade e densidade.

Na Tabela 5.4 são apresentados os coeficientes das variáveis independentes, com seus respectivos desvios padrões (DP), valor da razão *t* (t), probabilidade (p) e número de observações (n). O valor t mostra a significância da variável no modelo correspondendo à probabilidade (p), caso o valor de *p* seja menor ou igual que 5% (*p* $\leq$0,05) aceita-se a variável como significativa ao nível de 5%.

Tabela 5.5 Coeficientes de regressão das variáveis independentes, DP, *t*, p, s, R^2 e n.

Variável	coeficiente	DP	*t*	p
u	0,20547	0,03754	5,47	0,0
ρ	4,5672	0,3437	13,29	0,0
u x ρ	-0,21955	0,03176	-6,91	0,0
s =0,290509 R^2 = 0,986% n=24				

Na Tabela 5.5, observa-se que todas as variáveis independentes apresentaram valores de p menores que 5%, sendo assim, todas as variáveis, são estatisticamente significativas. O que significa 95% de confiança.

As análises de resíduos em relação às variáveis independentes (*Figuras 5.1 e 5.2)* mostram que a variância é constante e que não existe correlação entre os resíduos e as variáveis independentes, o que se observa pela dispersão uniforme dos pontos em torno do zero, com 2 pontos discrepantes, confirmam a suposição 1) apresentada, o teste de normalidade dos resíduos na (*Figura 5.2)* confirma a hipótese 2) de que os resíduos e conseqüentemente a resposta, seguem uma distribuição normal. Essas

conclusões, confirmam a adequação do modelo dado pela Equação 5.5, e indicando que os testes utilizados para análises são adequados e possíveis de serem utilizados.

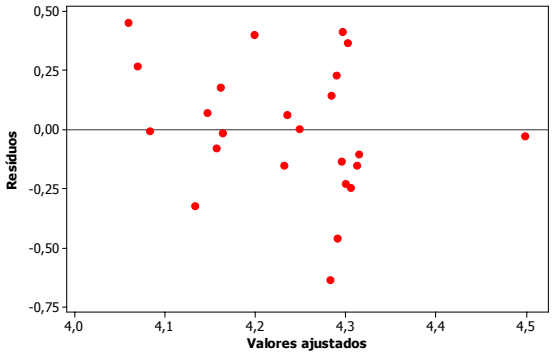

Figura 5.1 Gráfico dos resíduos contra valores ajustados ($\hat{y}_i$), para o modelo da Equação 5.5.

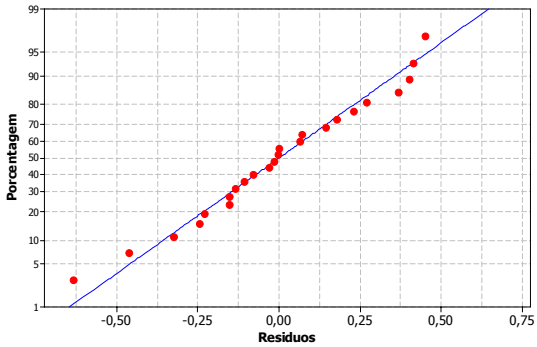

Figura 5.2 Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para o modelo da Equação 5.5.

Por meio do (Exemplo 1) será demonstrado como o modelo linear é utilizado para calcular a taxa de carbonização.

Exemplo 1

Considerando os dados do corpo de prova *citriodora* E2-2 ($u = 24{,}3\%$; $\rho = 1{,}08$ kg/m^3).

$$t = mx_c$$

onde,

$$m = 0{,}205u + 4{,}57\rho - 0{,}22u\rho$$

$$m = 0{,}205x24{,}3 + 4{,}57x1{,}08 - 0{,}22x24{,}3x1{,}08$$

$m =$ 4,14 min./mm ou 0,24 mm/min.

Dado experimental: $t =$ 58,10 minutos; $\beta = 3{,}87$ min./mm ou $\beta = 0{,}258$mm/min .
Dado calculado: $t =$ 62,13 minutos; $m = 4{,}14$ min./mm ou $m = 0{,}241$ mm/min.

5.4 MODELO PARA CARBONIZAÇÃO C2

Foi adotado o modelo de tempo x deslocamento analisado por White (1988), o qual expressa o comportamento variável da velocidade de carbonização.

$$\ln(t) = \ln(m) + a.\ln(x_c) \qquad (5.3)$$

O parâmetro $\ln(m)$, obtido individualmente para cada corpo de prova submetido à carbonização, Tabela 5.6, é usado para determinar o modelo que relaciona a taxa de carbonização com as propriedades da madeira obtidas através dos ensaios, Tabela 5.7.

Tabela 5.6 Parâmetros estimados para o deslocamento da camada carbonizada t x Xc.

CP	a^*	$\ln m^*$
D3	1,46	-1,070
D1 citriodora	1,56	-1,270
C2	1,26	-0,388
D1 grandis	1,46	-0,914
I	1,55	-1,210
E2	1,20	-0,266

(*) para a equação 5.3;

Foram testados modelos de até segunda ordem, com interação e sem intercepto. Estes não apresentaram resultados significativos, bem com o modelo com e sem intercepto utilizando o parâmetro $a = 1{,}23$, proposto por Robert White.

Tabela 5.7 Parâmetro estimado e as variáveis para a formulação do modelo.

CP	$\ln m$ para a =1,38	ρ_{ap} (g/cm^3)	u (%)
D3	-0,457	0,97	19,30
D1 citriodora	-0,513	1,08	30,60
C2	-0,465	1,07	27,50
D1 grandis	0,496	0,94	35,70
I	0,530	0,83	25,60
E2	0,410	0,74	30,65

Por meio da regressão dos valores de *ln m* correspondentes ao parâmetro a =1,38 pelos valores das propriedades: densidade e teor de umidade (Tabela 5.7) foi proposta a Equação 5.7.

$$\ln(m) = -4{,}12 - 0{,}136u\rho + 0{,}128u + 3{,}85\rho\,, \qquad (5.7)$$

onde:

$\ln(m)$ é o parâmetro estimado (1,38);

ρ é a densidade aparente (g/cm^3);

u é o teor de umidade (%);

u x ρ interação entre a umidade e densidade.

O coeficiente de determinação R^2 é de 94%, ver Tabela 5.8. São apresentados os coeficientes das variáveis independentes, correspondente ao teste de significância das variáveis, com seus respectivos desvios padrões (DP), valor da razão *t*, probabilidade (p) e número de observações (n). Os valores para as variáveis apresentam uma probabilidade menor que 95%.

Tabela 5.8 Coeficientes de regressão das variáveis independentes, DP, *t*, s, R^2 e n, carbonização C2.

Variável	**Coeficiente**	DP	***t***	p
constante	-4,1209	0,7451	-5,53	0,031
ρ	3,8544	0,7823	4,93	0,039
u	0,12834	0,0253	5,06	0,037
u x ρ	-0,13603	0,0266	-5,10	0,036
s = 0,0167507 R^2 = 94% n=6				

Na Tabela 5.9, são apresentados os valores do teste de significância do modelo: dados estimados e os resíduos ou erros do modelo.

Tabela 5.9 Resultados para as variáveis estudadas para formulação do modelo

CP	Dados Experimentais $y_i = \ln(m)$	Valores estimados $\hat{y}_i$	Resíduos ($\hat{e}_i = y_i - \hat{y}_i$)
D3	-0,4570	-0,45189	-0,00511
D1 citriodora	-0,5127	-0,52646	0,01376
C2	-0,4699	-0,46933	-0,00057
D1 grandis	-0,4960	-0,48094	0,01506
I	-0,5300	-0,52662	0,00338
E2	-0,4100	-0,42035	0,01035

Exemplo 2

Nesse exemplo será apresentada seqüencialmente, a partir da Equação 5.7, a determinação da taxa de carbonização com base nos dados de ensaio,.

Considerando os dados do corpo de prova *citriodora* D3 (u = 19,3%; ρ = 0,97 kg/m^3).

$t = mx_c^a$,

$$\ln t = \ln m + 1{,}38 \ln x_c \,,$$

onde:

$$\ln(m) = -4{,}12 - 0{,}136u\rho + 0{,}128u + 3{,}85\rho$$
$$\ln(m) = -4{,}12 - 0{,}136x19{,}3x0{,}97 + 0{,}128x19{,}3 + 3{,}85x0{,}97$$
$$\ln(m) = -0{,}4655$$
$$m = 0{,}62 mm/\min.$$

Dado calculado: $m = 0{,}62$ mm/min. Dado experimental: $\beta = 0{,}60$ mm/min.

A Tabela 5.10, apresenta os valores de taxa de carbonização para as vigas ensaiadas. O modelo proposto para estimar o tempo de carbonização das vigas ensaiadas no desenvolvimento desse trabalho, apresenta valores ligeiramente superiores aos dados experimentais, variação máxima de 9%.

Tabela 5.10 Comparação entre as taxas de carbonização obtidas por dados experimentais, pelo modelo e pela normalização.

CP		Modelo (mm/min.)	Experimental (mm/min.)	AS 1720.4 (mm/min.)	Eurocode 5 (mm/min.)
citriodora	D3	0,62	0,60	0,48	0,55
	D1	0,58	0,54	0,47	0,55
	C2	0,62	0,59	0,47	0,55
grandis	D1	0,60	0,55	0,51	0,55
	I	0,58	0,52	0,52	0,55
	E2	0,60	0,66	0,60	0,55

Exemplo 3

O exemplo ilustra de que modo a taxa de carbonização é utilizada para avaliar a resistência de uma viga de madeira em situação de incêndio. Considerando uma viga de *E. citriodora*, Classe C-60, com resistência de cálculo à Compressão Paralela às Fibras de 2,4 kN/cm^2($f_{c0,d} = 2{,}4 kN/cm^2$). Foram analisadas 4 condições:

1) cálculo da tensão atuante em condições normais;
2) cálculo da tensão atuante numa viga exposta a um tempo de exposição ao fogo de 60 min. e com taxa de carbonização fornecida pelo Eurocode;
3) cálculo da tensão atuante numa viga exposta a um tempo de exposição ao fogo de 60 min. e com taxa de carbonização fornecida pelos dados experimentais para o *E. citriodora* C-2;

4) cálculo da tensão atuante numa viga exposta a um tempo de exposição ao fogo de 60 min. e com taxa de carbonização fornecida pelo modelo para o *E. citriodora* C-2.

CONDIÇÃO 1

Viga simples de madeira em condições normais de utilização.

Dados:

Seção original da viga 0,40 m x 0,40m
Momento Fletor = 186 kN.m

Figura 5.3 Viga simples de madeira em condições normais de utilização.

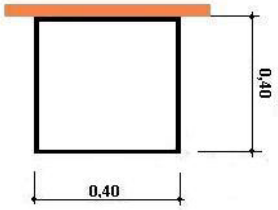

Figura 5.4 Dimensões da Viga em condições normais de utilização.

Resolução:

$$I = \frac{0{,}4x0{,}4^3}{12} = 0{,}00213m^4$$

$$\sigma_{\max} = \frac{186x0{,}20}{0{,}00213} = 17437{,}5kN/m^2 = 1{,}7437kN/cm^2 < f_{C0,d} = 2{,}4kN/cm^2$$

A tensão atuante é menor que a resistência de cálculo.

CONDIÇÃO 2 (com base no Eurocode)

Viga simples de madeira de *E. citriodora* exposta a uma curva de incêndio padrão por 60 min.

Dados:

Valor da taxa de carbonização nominal: β_n = 0,5 mm/min*.
Seção original da viga 0,40m x 0,40m.
Momento Fletor = 186kN.m (considerando a combinação excepcional ao incêndio).

Figura 5.5 Viga exposta ao fogo,incêndio-padrão, β_n =0,5 mm/min.

Resolução:

* (Taxa de carbonização segundo tabela 3.1 Eurocode 5, Design of Timber Structures, seção 3)

d = 60 min. x 0,5 mm/min.= 30 mm (espessura da madeira carbonizada).

Seção final [0,40-(0,03+0,03)] x (0,40-0,03) = 0,34m x 0,37m.

$$I = \frac{0{,}34x0{,}37^3}{12} = 0{,}001445m^4$$

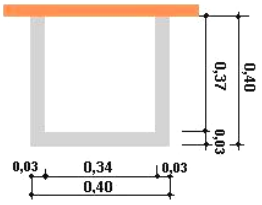

Figura 5.6 Dimensões da Viga exposta ao fogo, β_n =0,5 mm/min.

$$\sigma_{\max} = \frac{186x0{,}185}{0{,}001435} = 23976{,}28kN/m^2 = 2{,}39kN/cm^2 < f_{C0,d} = 2{,}4kN/cm^2$$

Para um tempo de exposição de 60 min e considerando a taxa de carbonização proposta pelo Eurocode 5, a tensão atuante é menor que a resistência de cálculo, Ou seja, a viga mantém a capacidade de carregamento.

CONDIÇÃO 3 (com base nos Dados Experimentais)

Viga simples de madeira exposta a um incêndio padrão por 60 min., viga exposta em três faces.

Figura 5.7 Viga exposta ao fogo,incêndio-padrão, β =0,59 mm/min.

Dados:

Corpo de prova *citriodora* C2
Valor da taxa de carbonização: m = 0,59 mm/min.
Seção original da viga 0,40 x 0,40m.
Momento Fletor = 186 kN.m (considerando a combinação excepcional ao incêndio).

Resolução:

d = 60 min. x 0,59 mm/min. = 35,4 mm (espessura da madeira carbonizada).

Seção final [0,40-(0,0354+0,0354)] x (0,40-0,0354) = 0,33m x 0,365m.

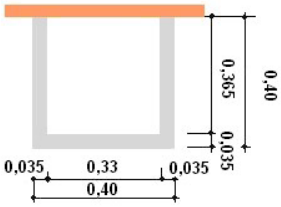

Figura 5.8 Dimensões da Viga exposta ao fogo, β =0,59 mm/min.

$$I = \frac{0{,}33x0{,}365^3}{12} = 0{,}001337m^4$$

$$\sigma_{\max} = \frac{186x0{,}185}{0{,}001337m^3} = 25501{,}81kN/m^2 = 2{,}55kN/cm^2 > f_{C0,d} = 2{,}4kN/cm^2$$

Para um tempo de exposição de 60 min. e a taxa de carbonização por dados experimentais, a tensão atuante é maior que a resistência de cálculo, ou seja, não passa no cálculo.

CONDIÇÃO 4 (com base no Modelo)

Figura 5.9 Viga exposta ao fogo,incêndio-padrão, $m = 0{,}62$mm/min.

Viga simples de madeira exposta a um incêndio padrão por 60 min., viga exposta em três faces.

Dados:

Corpo de prova *citriodora* C-2
Valor da taxa de carbonização: $m = 0{,}62$ mm/min.
Seção original da viga 0,40 x 0,40m.
Momento Fletor = 186 kN.m (considerando a combinação excepcional ao incêndio).

Resolução:

d = 60 min. x 0,62 mm/min. = 37,2 mm (espessura da madeira carbonizada).

Seção final [0,40-(0,0372+0,0372)] x (0,40-0,0372) = 0,325m x 0,3628m

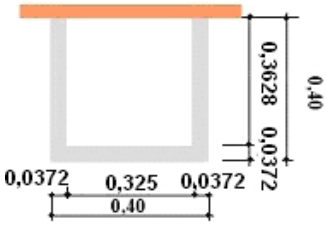

Figura 5.10 Dimensões da Viga exposta ao fogo, $m = 0{,}62$mm/min

$$I = \frac{0{,}325x0{,}3628^3}{12} = 0{,}00129m^4$$

$$\sigma_{\max} = \frac{186x0{,}1814}{0{,}00129m^3} = 26155{,}35kN/m^2 = 2{,}61kN/cm^2 > f_{C0,d} = 2{,}4kN/cm^2$$

Para um tempo de exposição de 60 min. e considerando a taxa de carbonização proposta pelo modelo (Equação 5.7), a tensão atuante é maior que a resistência de cálculo, ou seja, não passa no cálculo.

O tempo de resistência da viga fazendo uso da taxa de carbonização obtida pelos dados experimentais para o *Eucalyptus citriodora* C-2 é aproximadamente 17 % menor, quando comparado ao tempo de resistência calculado com a taxa de carbonização tabelada pelo Eurocode 5.

O modelo permitiu realizar estimativas da taxa de carbonização para as vigas ensaiadas. A umidade e a densidade foram apontadas como as duas principais propriedades influentes na carbonização da madeira. Entretanto, fica evidente que pesquisas devam ser realizadas com um número de observações para uma maior confiabilidade dos resultados, constando de diferentes níveis para a densidade e para o teor de umidade, permitindo, deste modo, a extrapolação abrangendo diferentes espécies.

Tanto os dados experimentais como os dados previstos pelo modelo são superiores aos do Eurocode e da AS 1720.4.

Com base nos exemplos resultados obtidos a partir de ensaios realizados em 6 vigas, é possível considerar que a adoção e extrapolação das taxas de carbonização propostas pelo Eurocode 5 e AS 1720.4, para as madeiras tropicais e madeiras plantadas no Brasil, devem ser assumidas com cautela, pois os valores propostos pelas duas normas indicam uma taxa de carbonização menor que os dados experimentais.

6. CONCLUSÕES

6.1 CONCLUSÕES

Por meio da realização de ensaios de carbonização em corpos de prova foram obtidas duas expressões para descrever o comportamento da carbonização dos corpos de prova das espécies de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus grandis* ensaiadas:

1) Modelo de taxa de carbonização C_1, para corpos de prova de pequena dimensão com exposição unidimensional, teve como base o modelo linear proposto por Schaffer (1967).

$$t = mx_c,$$

onde:

t o tempo de carbonização (min.);

x_c a espessura carbonizada (mm);

m a taxa de carbonização (min./mm)

sendo:

$m = 0{,}205u + 4{,}57\rho - 0{,}22u\rho$ (Modelo para os corpos de prova ensaiados)

onde:

m é o parâmetro estimado (taxa de carbonização);

ρ é a densidade aparente (g/cm^3) e

u é o teor de umidade (%);

2) Modelo de taxa de carbonização C_2, para corpos de prova de dimensão estrutural. teve como base o modelo linear proposto por White (1988).

$$t = mx_c^a$$

ou

$\ln t = \ln m + a \ln x_c$, Equação proposta por White (1988).

ou

$\ln t = \ln m + 1{,}38 \ln x_c$ parâmetro a = 1,38 determinado para os dados experimentais.

sendo:

$\ln(m) = -4{,}12 - 0{,}136u\rho + 0{,}128u + 3{,}85\rho$, (Modelo para os corpos de prova ensaiados)

onde:

$\ln(m)$ é o parâmetro estimado ;

ρ é a densidade aparente (g/cm^3);

u é o teor de umidade (%);

u x ρ interação entre a umidade e densidade.

Com relação aos ensaios de carbonização em peças de pequena dimensão, C_1

- A perda de massa de 30 % referente a aproximadamente uma hora de exposição ao fogo, é semelhante para ambos os tipos de ensaio, C_1 e C_2. Para estes ensaios observou-se que o *Eucalyptus citriodora* apresentou maior variação volumétrica que o *Eucalyptus grandis.*

- Os ensaios em corpos de prova de pequena dimensão não se mostraram adequados para explicar o comportamento da madeira como material estrutural. A carbonização mais lenta para os primeiros milímetros, com $\beta = 0{,}14$ mm/min., se mostrou inferior à carbonização em maiores profundidades $\beta = 0{,}28$ mm/min, indicando um comportamento oposto ao que se define para a carbonização de peças estruturais. Os motivos esperados para este comportamento podem estar relacionados: às dimensões das amostras resultando em uma insuficiente área de exposição unidimensional; a escala do experimento; e o uso de forno de resistência elétrica.

- Embora os resultados da carbonização em pequenos corpos de prova não se mostrem adequados para definição do comportamento em peças estruturais, estes possibilitaram a avaliação e determinação das propriedades da madeiras estudadas (condutividade térmica, composição química, retratibilidade, densidade) contribuindo, assim, para a formação de um banco de dados e permitindo correlacionar estas propriedades com a degradação térmica da madeira.

Com relação aos ensaios de carbonização em peças estruturais, C2

- Os resultados obtidos das peças estruturais com exposição em 4 faces se mostraram mais adequados para a determinação da taxa de carbonização, reproduzindo de modo realista à condição de incêndio.
- A taxa de carbonização obtida individualmente para as duas espécies é similar: $\beta = 0{,}58$ mm/min. Embora fosse esperado um melhor desempenho da espécie *E. citriodora* em função de sua densidade superior, a presença de maior teor de umidade nas vigas de *E. grandis*, foi um fator de grande influência no tempo de carbonização. Além disto, as duas espécies estudadas apresentaram propriedades físicas e mecânicas muito próximas.
- Os dados permitiram observar que o resultado médio para as duas espécies: 0,58 mm/minuto é ligeiramente superior aos valores descritos pelo Eurocode 5 e pela norma Australiana AS 1720.4. O valor tabelado pelo Eurocode não se mostra adequado para determinar a taxa de carbonização das espécies aqui estudadas.
- A velocidade de carbonização é maior para os primeiros 10 mm da viga e sofre uma redução em torno de 30% quando observada na profundidade de 30 mm, constatando o comportamento não-linear da carbonização da madeira, cuja velocidade é maior para os primeiros milímetros e se reduz com a profundidade, momento no qual assume um comportamento próximo da linearidade e menor variação nos dados, devido principalmente a formação do carvão que atua como isolante térmico.
- Para a taxa de carbonização, pode-se concluir que a degradação térmica é maior no topo da viga ($\beta = 0{,}73$ mm/min.) seguida da quina da viga ($\beta = 0{,}71$ mm/min.), e menor para a degradação da superfície $\beta = 0{,}58$ mm/min.
- Com base nos resultados dos ensaios das 6 vigas, é possível afirmar que a maior dimensão da seção transversal da peça apresenta maior redução pela degradação.

6.2 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se para futuros trabalhos:

- Um número maior de observações e de espécies de madeira com características distintas entre si, permitindo assim, maior variabilidade nos dados, avaliação estatística, obtenção de valores característicos e a inserção de mais níveis em um planejamento fatorial, permitindo assim, a extrapolação para diferentes espécies e condições.

- Investigação do comportamento das espécies tropicais, nativas brasileiras, de modo a termos valores de taxa de carbonização mais próximos a nossa realidade, tomando como variáveis a umidade e a densidade.

- Avaliação da perda de capacidade de carregamento pela formação de carvão que ocorre de modo acentuado na maior dimensão da seção transversal da peça estrutural.

- Pesquisas sobre a taxa de carbonização das quinas da seção que resultam no efeito de arredondamento.

- desempenho de peças com seção roliça, as quais são amplamente empregadas na construção civil e as peças de madeira serrada com dimensões comerciais empregadas em nosso país, visto serem de seção inferior a aquelas descritas como estruturais por países como Canadá e EUA.

AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

Nome do Autor Edna Moura Pinto

Assinatura do autor: _____

Instituição: EESC/USP

Local: São Carlos

Endereço:

E-mail: emoura@sc.usp.br
emourapinto@yahoo.com.br

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILLAR, D. (1986). Combustibilidade e tratamento ignífugo da madeira. São Carlos. 99p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharias de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ALMEIDA, P. A. de O.; SANCHES, S.B. (1998) O efeito da temperatura nas resistências da madeira e do concreto. In: Revista Téchne, março-abril, n. 33, ISSN - 0104.1053, ed. PINI.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). ASTM E119-95a – ***Fire tests of building construction and materials*** (CD ROM). Philadelphia.

ANDRADE, E.N. (1960). O Eucalipto. 2ª Edição. Rio Claro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "Dimensionamento de Estruturas de Aço em Edifícios em situação de incêndio". NBR14323, Rio de Janeiro, 1999.

[ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "Projeto de Estruturas de Concreto em situação de Incêndio". NBR15200, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). NBR 7190 - *Projeto de estruturas de madeira.* Rio de Janeiro.

AUSTRALIAN STANDARD (1990). AS 1720.4 –1990. Timber structures. Part 4: Fire resistance of structural timber members. Sidney.

BEGER, S. B. (1989). *Condutividade térmica da Madeira.* São Carlos. 170p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

BIN, Y.; BUCHANAN, A.H; MOSS, P.J. (2002). Elevated temperature and mechanical properties for use in fire simulations. In: World conference on timber engineering (7), WCTE 2002, p. 243-247, august12-15, Shah Alam, Malaysia.

BOX, G.E.P; HUNTER W.G; HUNTER J.S (1998). Statistics for experimenters: Na introduction to design, data analysis an Model Building. John Wiley & Sons. New York.

BROWNE, F.L. (1958). Theories of the combustion of wood and its control, a survey of the literature. FPL Report 2136.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. (1977). Comportamento isolado da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização. Circular Técnica n. 28. IPEF, Esalq/USP, Piracicaba.

BUCHANAN, A.H. (1998). **Mechanical Properties of Wood Exposed to fires** In: 5th Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland. Proceedings. Montreux, Switzerland. p.238-245.

BUCHANAN, A.H. (1999). Burning issues In timber engineering. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Rotorua, New Zealand, 1999. ***Proceedings***. Rotorua, New Zealand Forest Research Institute. v.3, p.1-11. (Forest Research Bulletin, 212)

BUCHANAN, A.H. (2004). International developments in design for structural fire safety. In: Revista sul-americana de engenharia estrutural. Editora UPF. V.1,n.1 maio/ago 2004. Passo fundo-RS.

CALIL, C. Jr.; INO, A.; ACHCAR, J.(1992). Análise Estatística da retração de algumas espécies de eucalito. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, São Carlos, 1992. *Anais*. São Carlos, LaMEM/ EESC/ USP.

CANADIAN WOOD COUNCIL (1996). ***Fire safety design in buildings***. Canada.

CAMPINHOS E. Jr (2001). A Importância da produção de madeira de Eucalyptus, geneticamente melhorado para os setores moveleiros e de construção civil: Perspectivas e desafios Madeira de eucalipto: tendências e usos. In: Seminário madeira de eucalipto: tendências e Usos 29-30-31 de agosto de 2001. Centro de Ciências Florestais e da Madeira-Curitiba-PR. 6p.

CAVALCANTE, A. A. (1991). Ocorrência de Colapso na secagem da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* . Piracicaba. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. e (2002). Estruturas de concreto armado em situação de Incêndio. JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, XXX. 27 a 31 de Maio de 2002. Universidade de Brasília. UnB, Brasília, DF, Brasil.

CÔTE, A. Jr. (1965). Cellular Ultrastructure of woody Plants. Syracuse University Press, NY.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. (1998). **Applied Regression Analysis**, John Wiley & Sons, Inc,, New York, 668 p.

EUROPEAN STANDARD EUROCODE. Eurocode 5 (2002): Design of timber structures. Part 1-2: General rules-Structural fire design. European Committee for standardization, Brussels.

ENCICLOPEDIA OF CHEMICAL TECHNOLOGY (1998). Ed. John Wiley & Sons. Ed.4, v. 25

FOOD AND AGRICULTURAE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, (1981). ***Eucalypts for planting***. 677p. Roma.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (1999). ***Wood handbook*** – wood as an engineering material. Madison, USDA.

GUINIER, A. (1996). A Estrutura da Matéria. Edusp.

HARMATHY, T. (1986). Properties of buildings materials: bases for fire safety design. In: Design of Structures against fire. Ed. R.D. Anchor; H.L. MALHOTRA; J.A. PURKISS, Proceedings of the International Conference on design of structures against fire, 16 april-1986. Birmingham, UK.

HOLMES, C. A. (1977). Effect of fire retardant treatments on performance properties of wood. In: Wood technology: Chemical Aspects. Ed. ACS Symposium, series 43. American Chemical Society. Whashington.

ILMARI, A.;SIHVONEN, J.; SIMO, K.;TEPPO,L.; TAINA ;KOSKELO;T OMI,T. (1996). Modeling fundamental properties of Wood products. In: International Word Conference 1996. v.2, p. 487494.

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGRARIAS (1982). Comportamiento al fuego de materiales y estructuras. Ministerio de agricultura, pesca y alimentación. Madrid. 1982.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- IPT (2003). Madeira: Uso sustentável na construção civil. São Paulo, Sinduscon-SP, Publicação IPT; 2980.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- IPT (1986). Manual de preservação de madeiras. São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo, Publicação IPT.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Fire Resistance tests – Elements of building construction, (1999). Part 1. General requirements. ISO 834. Geneva.

JANKOWSKY, I. P. (1986). *Potencialidade d creosoto de Eucalyptus SPP como preservativo para madeiras*. Piracicaba. 159p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

JUNEJA, S.C. (1975) Combustion of cellulosic Materials and its Retardance – Status and Trends. Part 1. Ignition, Combustion Process and Trends. In: Wood Science, vol. 7 n. 3,p.201-208.

KIRCHHOF, L. D. (2004). Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

KOLLMANN, F.E.P.; CÔTE, Jr. (1968). Principles of wood science and technology, v. 1, Heidelberg Germany,592p.

KONIG, J.; WALLEIJ, L.(1999). Performance of timber frame assemblies. In PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Rotorua, 1999. Proceedings. Rotorua, New Zealand Forest Research Institute. v.3, p.14-18. (Forest Research Bulletin, 212).

LAU, P. W. C.; ZEELAND, I.; WHITE, R. (1998) . Modeling the char behavior of structural timber. In: Proceedings of the Fire and Materials. 98 Conference 23-24 February. 5 th International Conference, San Antonio-Texas.

LIE, T.T (1977). A Method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns. Canadian J. Civil Engineering, 4, 161-169.

LINGENS, A.; WINDEISEN, E.;WEGENER,G. (2005). Investigating the combustion behaviour of various wood especies. In: Wood Science and Technology, p. 39-49.

LIMA, C.R.; (1989). Método do fio-quente, aplicabilidade ao estudo das propriedades térmicas de madeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2,v.6, São Carlos, 1989. *Anais*. São Carlos, LaMEM/ EESC/ USP.

LIMA, C.R.; PAES, B.J.;OLIVEIRA, E. (1992). Método do fio-quente, uma nova tecnologia para determinação de condutividade térmica em madeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, São Carlos, 1992. *Anais*. São Carlos, LaMEM/ EESC/ USP.

MACHADO, G. de O. M. (2000). Preparação e caracterização de CMC e CMC grafitada. São Carlos. 101p. Dissertação (Mestrado)- Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MAGALHÃES, M.N.; LIMA, A. C. P. de (2001). Noções de probabilidade e estatística. 3 ed.. São Paulo, IME-USP, 392p.

MAGLIORINI, A.J.;BRITO, J. O.;BARRICHELO, L. E. G. (1980). Influência das práticas silviculturais na produção de carvão vegetal. Circular Técnica n. 104. IPEF, Esalq/USP, Piracicaba.

MARTÍNEZ, M. E.; CALIL, C. J. (2000) Determinação do valor característico da resistência da madeira: distribuições de probabilidades simétricas e assimétricas**.** *Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia*. Ano 1, n. 2/ ISSN: 1516-2850, p.25-30, mai/ago.

MARTINEZ, M.E. (2001). *Desenvolvimento de um modelo estatístico para aplicação e no estudo de fadiga em emendas dentadas de madeira*. São Carlos. 160p. Tese (Doutorado)- Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MIGLIORINI, A. J.; BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E.G. (1980). Influencia das práticas silviculturais na produção de carvão. Circular técnica n. 104, junho de 1980.

MITIDIERI, M.L.(1998). – Reação ao fogo. *Proposta de classificação de materiais e componentes construtivos com relação ao comportamento frente ao fogo.* São Paulo. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MITIDIERI FILHO, C.V. (1998). *Avaliação de desempenho de componentes e elementos inovadores destinados a habitações, proposições específicas à avaliação de desempenho estrutural*. São Paulo. 218p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MINITAB 13. (2004). **Minitab statistical software**. Minitab Inc, release 13. www.minitab.com (08/06/2004)

MORAES, P. D.; ZUCS, C. A (2000). Análise de normas de projeto para estruturas de madeira considerando a resistência ao fogo (CD ROM). In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 7, São Carlos, 2000. *Anais*. São Carlos, LaMEM/ EESC/ USP.

MOREY , P.R. (s/d). O crescimento das árvores. EPU-Edusp. Volume 19.

NETO, B. de B: SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. (2001). Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Industria. Campinas, SP. Ed. Unicamp.

NJANKOUO, J. M.;DOTREPPE, J.C.; FRANSSEN, J. M. (2004). Fire resistance of timbers from tropical countries and comparison of experimental charring rates with various models. In: Construction and Building material, v. 19, p.376-386.

NOGUEIRA, M.T.J.A. (1991). *Indicações para o Emprego de Dezesseis Espécies de Eucalipto na Construção Civil.* São Carlos. 116p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

NOGUEIRA, M.T.J.A. (1992). Propriedades térmicas da madeira de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, São Carlos, 1992. *Anais*. São Carlos, LaMEM/ EESC/ USP.

OLIVEIRA, J.T. da SILVA. (1997). *Caracterização da madeira de Eucalipto para a construção civil*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ONO, R. (1997). *Segurança contra incêndio em edificações, um sistema de coleta e análise de dados para avaliação de desempenho***.** São Paulo. 270p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

PIMENTA, M.T.B (2002). *Polpação organossolve de Pinus taeda utilizando CO_2 no estado supercrítico – Utilização de misturas Álcool/água como co-solvente*. Dissertação (Mestrado) São Carlos. Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PINTO E.M, Martinez. M. CALIL, C. (2004). *Métodos para determinação do valor característico da resistência à Compressão Paralela.* In: Revista Madeira Arquitetura e Engenharia. São Carlos, São Paulo. Ano 5,n.14. set/dez.

PINTO, E. M.; CALIL, C. Jr. (2004). Estudo da taxa de carbonização da madeira e a resistência mecânica de peças estruturais (CD ROM). In: IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 9, Cuiabá, 2004. *Anais*. Cuiabá, UFMT.

PINTO, E.M; CALIL, C. Jr. (2002). *Ensaios para avaliação do comportamento de materiais expostos ao fogo: Resistência e Reação*. In: Revista Madeira Arquitetura e Engenharia, v.9. ISSN 1516-2850. São Carlos.

PINTO, E. M. (2001). Proteção contra incêndio para habitações em madeira. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PRATA, J.G.; FONSECA, A.F.C. de; MATOS, J.L.M. de; NOGUEIRA, D.G.F (2002). Estudos da influência do sítio de crescimento sobre a retratibilidade da madeira de *Pinus taeda*. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, 2002. *Anais*. Uberlândia, MG.

REVISTA DA MADEIRA (2001). Eucalipto, a madeira do futuro. Edição Especial, set. 2001.

REZENDE, M.A. (2003). Retratibilidade da Madeira de *pinus caribaea var. hondurensis* e de *Eucalyptus grandis* e suas relações com a umidade e densidade. In: Scientia forestalis, n. 64, p120-127, dez, Piracicaba.

ROWELL, R. M. (1991). Chemical Modification of Wood. In: Wood and cellulosic chemistry. New York, cap.15 p. 703-756. David Hon & Nobuo Shiraishi editor.

SALES, A.; HELLMEISTER, J.C. (1990). Determinação da condutividade térmica, do calor específico, da difusividade térmica em madeiras de alta, média e baixa densidade. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência de Materiais, 9, Águas de São Pedro, 1990. Edilé Serviços gráficos e Editora. p. 782-785.

SANTOS, E.S.; BALLARIN, A.W.(2002). Correlações entre os módulos de Elasticidade à compressão paralela às fibras e à flexão para algumas espécies de eucalipto. In: VIII

ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, 2002. *Anais*. Uberlândia, MG.

SCHAFFER E. (1977). State of structural timber fire endurance. In: Wood and fiber, 9(2), p.147-170. Forest Products Laboratory, Madison, Wiscosin.

SCHAFFER, E.L.(1967). Charring rate of selected woods-transverse to grain. FPL. 69. Madison, WI: US Department of agriculture, Forest Products Laboratory.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, INSTITUTO FLORESTAL (2002). Inventário floresta das áreas plantadas do Estado de São Paulo. Editor. Kronka, J.N., 148p, São Paulo.

SECRETARIA DE ESTADO DOS NEGÓCIOS DA SEGURANÇA PÚBLICA DE SÃO PAULO. INSTRUÇÃO TÉCNICA N^{O} 08/04 (2004). *Segurança Estrutural nas Edificações-Resistência ao Fogo dos Elementos de Construção*.

SEYE, O;CORTEZ, L.A.B.;GÓMEZ, E.O. (2000). Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. Encontro de energia no meio rural, ano 3, setembro.

SEITO, A.I. (1988). Tópicos da segurança contra incêndio. In: ***TECNOLOGIA de edificações***. São Paulo, IPT/PINI. Cap.4, p.373-376.

SEITO (1995). *Metodologia de análise de risco de incêndio***.** São Paulo. Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.

STEWARD, F.R. (1974), Ignition of cellulosic materials. In: Heat transfer in fires: Thermophysics, social aspects, economic impact, ed. Perry l. Blackshear, University of Minnesota, cap. 3, p.163-192.

SIA PROTECTION incendie dans la construction em bois. (1998). Zurich, SIA/LIGNUM.

SILVA, V.P. (2001). *Estruturas de Aço em situação de Incêndio*. Ed. Zigurate, São Paulo.

SOUZA, R. (1988). Cooperação técnica Brasil-Japão na área de prevenção de Incêndios. In: ***TECNOLOGIA de edificações***, São Paulo, IPT/PINI. Cap. 4, p.333-338.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY (1997). *Preparation of wood for chemical analysis*. Atlanta.

TIMBER ENGINEERING, STEEP 1 (s/d). Basis of design, material properties, structural components and joints. Behavior of timber and wood-based materials in fire. A13.

TR10. TECHNICAL REPORT 10 (2003) - Calculating the fire resistance of exposed wood members, ***American Wood Council***, Washington, DC. 2003.

TRUGILHO, P.F.; ROSADO, S.C. da S.; MORI, F.A.;;LIMA, J.T;CAIXETA, R.P.(2002). Variação na composição química da madeira em árvores de *Eucalyptus*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, Uberlândia,MG, 2002. *Anais*. UFMG, MG

VARGAS, M. R.; SILVA, V.P. (2003). *Resistência ao fogo das estruturas de aço*. Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS/ Centro Brasileiro da Construção em Aço – CBCA.

VITAL, B.R.; DELLA LUCIA, R.M.; EUCLIDES, R.F (1983). Efeito de aquecimento em algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus saligna*. In: Revista Árvore, v. 7(2), p. 136-146.

WHITE, H. R.; NORDHEIM (1992). Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. ***Fire technology****,* v.28, n.1, p.5-27, Febr.

WHITE, R.H. (1988). Charring rates of different wood species. Thesis for degree of PhD. University of Wisconsin-Madison, EUA.

WHITE, R.H. (1995). Analytical methods for determining fire resistance of timber menbers. In: ***The SFPE handbook of fire protection engineering***. 2.ed. Boston, Society of fire protection engineers. Seção 4, Cap. p.217-29.

WHITE, R.H.; DIETENBERGER, M.A. (1999). *Fire safety* In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook - wood as an engineering material. Madison, USDA. Cap.17, p.17-1-17-17.

WHITE, R. H. (2000). Charring rate of composite timber products. In: Wood and fire safety. 4th International Scientific Conference, may-19, 2000. Techmical University of Zvolen, Slovak Republic.

WHITE, R.H. (1990). *Fire endurance research at the Forest Products Laboratory*. Forest Products Laboratory, Wisconsin. 7p.

WHITE, R.H.; SCHAFFER, E.L. (1981). *Transient moisture gradient in fire exposed wood slabs* In: WOOD AND FIBER. 13 (1). Cap.17, p. 17-38.

WHITE, R.H.; SCHAFFER, E.L. (1981). *Thermal Characteristics of thick red oak flakeboard*. Forest Products Laboratory, Wisconsin. 9p.

WILLIANS, F. (1974), Condensed-phase mass and energy balances. In: Heat transfer in fires: Thermophysics, social aspects, economic impact, ed. Perry I. Blackshear, University of Minnesota, cap. 3,p.163-192.

WOOD: ITS STRUCTURE AND PROPERTIES (1981). Ed. F. F. Wangaard. Forest Products Laboratory. Madison,WI.