INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**ESTUDO DO EFEITO DA RADIAÇÃO GAMA SOBRE ALGUMAS
PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE MADEIRAS USADAS EM
PATRIMÔNIOS ARTÍSTICOS E CULTURAIS BRASILEIROS**

LÚCIO CESAR SEVERIANO

**Dissertação apresentada como
parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear – Aplicações.**

**Orientadora:
Dra. Luci Diva Brocardo Machado**

SÃO PAULO

2010

À minha mãe:

“Toda a minha glória deriva da sua oração.”

Ao Dr. Daisaku Ikeda.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Luci Diva Brocardo Machado, pela confiança, respeito, orientação e motivação;

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pela concessão da bolsa de mestrado;

Ao Professor Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr, pelo apoio na realização de todas as etapas do trabalho e pela dedicação em transmitir seus ensinamentos;

Aos técnicos do LaMEM (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras – Universidade de São Paulo – São Carlos), pelo auxílio na realização dos ensaios físicos e mecânicos das madeiras estudadas;

Ao Dr. Daisaku Ikeda e esposa Kaneko Ikeda, pelos incentivos e direcionamento;

Ao colega Marcelo Augusto Gonçalves Bardi, pelo apoio incondicional;

À Melhoramentos Indústria de Papéis, pela doação de amostras de madeiras;

À MSc. Márcia Mathias Rizzo, restauradora de obras de arte, pela orientação sobre a utilização de madeiras em obras de arte;

Ao Danilo Brás dos Santos, entalhador em madeira, pelo apoio e auxílio na escolha das espécies a serem estudadas;

Ao Professor Dr. Jivaldo do Rosário de Mattos, pela autorização do uso de equipamentos do Laboratório de Análise Térmica do IQ-USP;

À MSc. Yasko Kodama e Paulo Santos, pelo apoio na irradiação das amostras;

Aos companheiros do Centro de Tecnologia das Radiações, CTR-IPEN, pelos bons momentos compartilhados;

Aos meus familiares, pela motivação e confiança;

Aos Companheiros da família SOKA (BSGI - Brasil Soka Gakkai Internacional), pelo apoio nos momentos difíceis;

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

***Seja como for, a grandiosa
revolução humana de uma única
pessoa irá um dia impulsionar a
mudança total do destino de um
país e, além disso, será capaz de
transformar o destino de toda a
humanidade.***

DAISAKU IKEDA

ESTUDO DO EFEITO DA RADIAÇÃO GAMA SOBRE ALGUMAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE MADEIRAS USADAS EM PATRIMÔNIOS ARTÍSTICOS E CULTURAIS BRASILEIROS

Lúcio Cesar Severiano

RESUMO

A madeira é considerada um compósito natural de extrema complexidade, constituído basicamente por celulose, lignina, hemicelulose (polioses) e extrativos. Sua composição favorece ataques biológicos de diferentes espécies. Neste contexto, inúmeras técnicas vêm sendo estudadas e aplicadas para desinfestar e descontaminar obras de arte e bens culturais móveis elaborados em madeira e que sofreram ataques por fungos, bactérias ou insetos. A irradiação com raios gama, emitidos por isótopos instáveis como o cobalto-60, também vem sendo estudada como uma alternativa para esta finalidade. Este processo tem-se mostrado eficiente para eliminar infestação por insetos e microorganismos em objetos de madeira. Além disso, é rápido e não exige quarentena porque não gera resíduos tóxicos. Neste trabalho, objetivou-se avaliar os efeitos da radiação gama sobre algumas características das espécies de madeira Cedro Rosa e Imbuia. Para tanto, considerou-se que, tal como os demais métodos usualmente empregados na eliminação de microorganismos e insetos que atacam madeiras, o processamento por radiação não impede a reinfestação ou a recontaminação do objeto irradiado. Assim, foram aplicadas doses de radiação gama relativamente altas, até 100 kGy, de modo a investigar os efeitos da radiação, mesmo que as peças de madeira sejam submetidas repetidas vezes ao processo de irradiação, já que a dose absorvida é sempre cumulativa. Estudou-se a influência da radiação gama em propriedades físicas – densidade aparente e retratibilidade –, em propriedades mecânicas – compressão paralela às fibras, flexão no módulo de elasticidade, dureza e cisalhamento – e em propriedades térmicas – estabilidade térmica– das madeiras consideradas. Os resultados demonstraram que a radiação gama, na faixa de dose estudada, não promove alterações nas propriedades das espécies de madeiras investigadas.

INFLUENCE OF GAMMA RADIATION ON SOME PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD USED IN BRAZILIAN CULTURAL HERITAGE

Lúcio Cesar Severiano

ABSTRACT

Wood is considered a natural composite of extreme complexity, basically composed by cellulose, lignin, hemicelulose (polyosis) and extractives. Its composition favors biological attacks from different species. In this context, several techniques have been studied and applied for disinfecting and decontaminating wood-made works of art and cultural heritage, which have been damaged by fungi, bacteria and insects. Gamma radiation emitted by unstable isotopes, such as 60-cobalt, has also been studied as an alternative to the conventional wood preservatives. So, gamma rays treatment has been shown to be efficient to the removal of infestations by insects and microorganisms in wood-made artifacts, to be fast and not to require quarantine because it does not generate toxic waste. Similar to other techniques, this process does not prevent the irradiated material of re-infestation or recontamination. In this context, the effects of relatively high disinfestation gamma radiation doses (up to 100 kGy) on *Cedro Rosa* and *Imbuia*, two typical Brazilian wood species, are accompanied by the changes on the following attributes: apparent density, retracting, parallel compression to fibers, bending in the modulus of elasticity, hardness, shear and thermal stability. Results have shown that gamma radiation, in the studied dose range, does not promote alterations on properties of investigated wood species. In case of a re-infestation, these observations indicate that the wood species can be submitted to repeatedly irradiation processes without causing damage to their structure up to the studied dose range, in despite of radiation effects be always cumulative.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	7
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
3 REVISÃO DA LITERATURA	18
3.1 Principais considerações sobre a madeira	18
3.2 Classificações	19
3.2.1 Cedro Rosa (<i>Cedrela fissilis</i>)	20
3.2.2 Imbuia (<i>Ocotea porosa</i>)	21
3.3 Composição química da madeira	22
3.3.1 Celulose	23
3.3.2 Lignina	25
3.3.3 Polioses	25
3.3.4 Extrativos	26
3.4 Trabalhabilidade na madeira	27
3.5 Deterioração do patrimônio artístico e cultural em madeira	29
3.6 Tratamentos preservantes da madeira	33
3.6.1 Desinfestação de madeiras com substâncias tóxicas	35
3.6.2 Desinfestação de madeiras com substâncias não tóxicas	36
3.7 Interações da radiação com a matéria	38
3.7.1 Mecanismos de reações promovidas por radiação ionizante em materiais poliméricos	40
3.7.2 Efeitos da radiação gama na madeira	40
3.7.3 Efeitos radiação gama em insetos e microorganismos	43
4 MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 Materiais	45
4.2 Métodos	45
4.2.1 Preparação das amostras	45
4.2.2 Irradiação das amostras	45
4.2.3 Caracterização dos corpos- de- prova	46
4.2.3.1 Termogravimetria (TG)	46
4.2.3.2 Umidade	46
4.2.3.3 Massa específica aparente	47
4.2.3.4 Retratabilidade	48
4.2.3.5 Ensaio mecânicos	51
4.2.3.5.1 Resistência à compressão paralela às fibras	52

4.2.3.5.2	Módulo de elasticidade na flexão estática.....	53
4.2.3.5.3	Dureza (Método Janka).....	56
4.2.3.5.4	Resistência ao cisalhamento	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	Ensaio de densidade aparente	59
5.2	Ensaio de retratibilidade.....	61
5.3	Ensaio de compressão paralela às fibras	62
5.4	Módulo de elasticidade na flexão estática	65
5.5	Ensaio de dureza	67
5.6	Ensaio de cisalhamento	68
5.7	Termogravimetria (TG)	70
6	CONCLUSÕES.....	79
7	SUGESTÕES DE TRABALHOS COMPLEMENTARES	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Ilustração de uma seção transversal do tronco de uma árvore	19
FIGURA 2 – (a) Árvore de Cedro Rosa ; (b) Corte longitudinal de Cedro Rosa ...	21
FIGURA 3 – (a) Árvore Imbuia (<i>Ocotea porosa</i>); (b) Corte longitudinal da madeira de Imbuia	22
FIGURA 4 – Ilustração esquemática da distribuição dos componentes da madeira quanto a massa molar	23
FIGURA 5 – Ilustração da unidade estrutural de celulose	24
FIGURA 6 – Estrutura da lignina	25
FIGURA 7 – Principais açúcares que compõem as unidades estruturais das polioses	26
FIGURA 8 – Principais compostos presentes na classe dos extrativos	27
FIGURA 9 – (a) Adulto e larva <i>anobiidae</i> ; (b) Broca <i>Lyctidae</i> ; (c) Broca <i>Cerambycidae</i> ; (d) Madeira atacada por brocas	30
FIGURA 10 – (a) Ciclo de vida dos cupins; (b) e (c) Madeiras infestadas por cupins.....	31
FIGURA 11 – (a) Fungos machadores; (b) Fungos Emboloradores; (c) e (d) Presença de podridão na madeira	32
FIGURA 12 – (a) Ilustração do projeto do irradiador com fonte de 60-Co; (b) Fontes de 60-Co submersas em piscina; Instalações do Irradiador de Co-60 do CTR-IPEN.	39
FIGURA 13 – Mecanismos de reações nas unidades estruturais da celulose após a irradiação com raios gama.....	42
FIGURA 14 – Ilustração das principais direções na madeira	49
FIGURA 15 – Equipamento Universal AMSLER para realização de ensaios mecânicos em madeira	51
FIGURA 16 – Ilustração do comportamento da madeira nos ensaios de tração, compressão e cisalhamento.	52
FIGURA 17 – Extensômetros comparadores usados para realização dos ensaios de compressão paralela às fibras.	53
FIGURA 18 – Corpo-de-prova da espécie Cedro Rosa para ensaio de flexão no módulo de elasticidade.	53
FIGURA 19 – Equipamento para ensaio de flexão da amostra de Cedro Rosa ...	54
FIGURA 20 – Diagrama carga vs deslocamento para a determinação da rigidez à flexão	55
FIGURA 21 – Diagrama de carregamento para o ensaio de flexão	56
FIGURA 22 – Dimensões do corpo-de-prova para o ensaio de dureza	57
FIGURA 23 – Ensaio de dureza Janka.	57

FIGURA 24 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento	58
FIGURA 25 – Comportamento da madeira no cisalhamento.	58
FIGURA 26 – Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras da amostra de Cedro Rosa irradiadas e não irradiadas.....	59
FIGURA 27 – Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras da amostra de Imbuia irradiadas e não irradiadas.....	60
FIGURA 28 – Módulo de elasticidade na flexão estática das amostras de Cedro Rosa, não irradiadas e irradiadas.	61
FIGURA 29 – Módulo de elasticidade na flexão estática das amostras de Imbuia, não irradiadas e irradiadas.....	62
FIGURA 30 – Valores médios da densidade aparente de diferentes teores de umidade da espécie das amostras de Cedro Rosa irradiadas e não irradiadas	63
FIGURA 31 – Valores médios da densidade aparente de diferentes teores de umidade da espécie das amostras de Imbuia irradiadas e não irradiadas ...	64
FIGURA 32 – Porcentagens médias de retração tangencial e retração radial da espécie Cedro Rosa irradiadas e não irradiadas	65
FIGURA 33 – Porcentagens médias de retração tangencial e retração radial da espécie Imbuia irradiadas e não irradiadas.....	62
FIGURA 34 – Gráfico dos valores médios de resistência ao cisalhamento da espécie Cedro Rosa irradiadas e não irradiadas	69
FIGURA 35 – Gráfico dos valores médios de resistência ao cisalhamento da espécie Imbuia irradiadas e não irradiadas.....	68
FIGURA 36 – Valores médios da dureza perpendicular às fibras da espécie Cedro Rosa irradiadas e não irradiadas	69
FIGURA 37 – Valores médios da dureza perpendicular às fibras da espécie Imbuia irradiadas e não irradiadas.....	70
FIGURA 38 – Curvas TG/DTG da amostra de Imbuia não irradiada	71
FIGURA 39 – Curvas TG/DTG da amostra de Imbuia irradiada a 25kGy	71
FIGURA 40 – Curvas TG/DTG da amostra de Imbuia irradiada a 50kGy	72
FIGURA 41 – Curvas TG/DTG da amostra de Imbuia irradiada a 100 kGy	72
FIGURA 42 – Curvas TG da espécie Imbuia não irradiada e irradiadas a 25 kGy, 50 kGy e 100 kGy	73
FIGURA 43 – Curvas TG/DTG da amostra de Cedro Rosa não irradiada	73
FIGURA 44 – Curvas TG/DTG da amostra de Cedro Rosa irradiada a 25 kGy...	74
FIGURA 45 – Curvas TG/DTG da amostra de Cedro Rosa irradiada a 50 kGy....	74
FIGURA 46 – Curvas TG/DTG da amostra de Cedro Rosa irradiada a 100 kGy..	75
FIGURA 47 – Curvas TG da amostra de Cedro Rosa não irradiada e irradiadas a 25 kGy, 50 kGy e 100 kGy	75

FIGURA 48 – Curvas de TG das amostras de madeira Cedro Rosa e Imbuia não irradiadas e irradiadas a 100 kGy.....	76
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Principais constituintes químicos das madeiras coníferas e folhosas	23
TABELA 2 – Conteúdo médio de celulose presente em diferentes espécies de plantas	24
TABELA 3 – Teores de umidade de árvores em equilíbrio com o ambiente.....	29
TABELA 4 – Tipos de tratamentos e de preservantes para madeira.	34
TABELA 5 – Alterações físico-químicas que os materiais sofrem, quando submetidos à tratamentos com diferentes agentes químicos	36
TABELA 6 – Valores médios dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras nas espécies de madeiras de Cedro Rosa e Imbuia não irradiadas e e submetidas à irradiação.....	59
TABELA 7 – Módulo de Elasticidade (MOE) das espécies Cedro Rosa e Imbuia a diferentes doses de radiação e não irradiadas	65
TABELA 8 – Valores médios experimentais da densidade aparente para diferentes teores de umidade das espécies de madeiras Cedro Rosa e Imbuia em diferentes doses de irradiação e não irradiadas	63
TABELA 9 – Porcentagens médias de retração tangencial e retração radial das espécies Imbuia e Cedro Rosa irradiadas e não irradiadas.....	61
TABELA 10 – Valores médios dos ensaios de resistência ao cisalhamento nas espécies de Cedro Rosa e Imbuia irradiados e não irradiados.....	69
TABELA 11 – Valores médios da dureza perpendicular às fibras nas espécies de Cedro Rosa e Imbuia irradiadas e não irradiadas.....	67
TABELA 12 – Perdas de massa da espécie Imbuia irradiadas à 25 kGy, 50 kGy, 100 kGy e não irradiadas	76
TABELA 13 – Perdas de massa da espécie Cedro Rosa irradiadas à 25 kGy, 50 kGy, 100 kGy e não irradiadas.....	77

ABREVIATURAS

$A_{\text{seção diametral}}$	Área da seção diametral da esfera, igual a 1cm^2
A_{v0}	Área inicial da seção crítica do corpo-de-prova, num plano paralelo às fibras, em metro quadrado (m^2)
$^{137}\text{-Cs}$	Césio 137
$^{60}\text{-Co}$	Cobalto 60
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
b e h	Largura e altura da seção transversal do corpo-de-prova
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CTR	Centro de Tecnologia das Radiações, IPEN-CNEN/SP
DTG	Termogravimetria derivada
$F_{v0,\text{máx}}$	Máxima força cisalhante aplicada ao corpo-de-prova, em Newton (N)
f_{c0}	Resistência à compressão paralela às fibras
$F_{c0,\text{max}}$	Força máxima de compressão paralela às fibras
$FM_{10\%}$ e $FM_{50\%}$	Forças correspondentes a 10% e 50% da força máxima estimada
F_{max}	Força máxima aplicada ao corpo-de-prova necessária à penetração de uma semi-esfera de seção diametral com 1cm^2 de área na profundidade igual ao seu raio (N)
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
GeV	Gigaeletronvolt
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPHAN	Instituto Patrimônio Cultural e Artístico Nacional
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
keV	Quiloeletronvolt
kGy	Quilogray
M_{12}	Massa da madeira a 12% de umidade
mg	Miligrama
m_i	Massa inicial
mL/min	Mililitro por minuto
MOE	Módulo de resistência elástico da seção transversal E_{M0}

MPa	Megapascal
m_s	Massa seca
mV	Milivolt
NBR	Norma Brasileira
°C/min	Graus Célsius por minuto
pH	Potencial hidrogeniônico
TG	Termogravimetria
U (%)	Porcentagem de umidade
UV	Ultravioleta
V_0	Volume da madeira seca
$v_{10\%}$ e $v_{50\%}$	Deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da força máxima
V_{12}	Volume da madeira a 12% de umidade
ρ_{ap}	Densidade aparente

1 INTRODUÇÃO

As madeiras apresentam fortes afirmações e influências da cultura por meio de sua utilização na confecção de móveis e na escultura de objetos encontrados em igrejas antigas e museus, tais como imagens, adornos, altares, molduras e outros.

No Brasil, país em que a variedade e a riqueza das madeiras são muito grandes, os primeiros estudos sobre as características mecânicas da madeira só tiveram início no começo do século XX. Os resultados obtidos na ocasião propiciaram o conhecimento das propriedades de algumas espécies florestais. Os elementos assim colhidos, além de estabelecer limites de resistência peculiares às espécies, permitiram atribuir o valor comercial relativo das mesmas (IPT, 1985).

A escolha das madeiras para fins industriais, estruturais ou artísticos só pode ser realizada com o conhecimento preciso das propriedades físicas e mecânicas que as caracterizam. Há que se considerar, ainda, que essas propriedades variam significativamente entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e, mesmo, entre diferentes partes de uma mesma árvore (PANSIN, DE ZEEUW 1980).

De acordo com MANO (2003), a madeira é considerada um compósito natural de extrema complexidade, em que os elementos de resistências são representados pelas fibras de celulose, e o material aglutinante, pela lignina. Assim, sua composição predominantemente orgânica favorece ataques biológicos de diferentes espécies e reduz sua resistência às intempéries.

De acordo com LARA (1992), é triste constatar que grande número de construções históricas e bens culturais e artísticos brasileiros se acham em estado de deterioração, merecendo cuidados, em todas as regiões do país. Obras do século XVII, XVIII e XIX ultrapassam todos os limites de autodefesa da madeira, mesmo dos tipos de melhor qualidade.

Inúmeras técnicas para desinfestação e descontaminação da madeira vêm sendo estudadas. A técnica da irradiação com raios gama, emitidos por isótopos instáveis como cobalto-60, surge como uma alternativa neste campo. Em

várias aplicações, o uso da radiação gama pode ser interessante, uma vez que pode descontaminar e desinfestar peças de madeira que sofreram ataques biológicos. Entretanto, a interação da radiação gama nos materiais poliméricos, incluindo as madeiras, transfere energia aos materiais e pode promover modificações permanentes em suas estruturas moleculares, conseqüentemente, em suas propriedades físico-químicas.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos da radiação gama sobre algumas propriedades físicas e mecânicas de madeiras usadas em patrimônio artístico e cultural brasileiro. Foram escolhidas as espécies Cedro Rosa (*Cedrella fissillis*) e Imbuia (*Ocotea porosa*), por estarem entre as madeiras mais utilizadas, seja em trabalhos de escultura, seja em mobiliário.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizadas diferentes doses de radiação até 100 kGy. As doses aplicadas são relativamente altas para a descontaminação e desinfestação de materiais atacados por insetos e fungos. Porém, como o tratamento com radiação não evita a recontaminação, foram escolhidas doses que permitem conhecer os efeitos da radiação na madeira mesmo que seja necessário repetir o processo de irradiação devido à reinfestação do objeto, sempre levando em conta que a dose absorvida é cumulativa. Os resultados obtidos permitiram observar a influência das diferentes doses de radiação absorvidas pelas amostras sobre as propriedades das espécies estudadas e não foram observadas modificações significativas que comprometam a aplicação da radiação gama nos materiais estudados, dentro da faixa de dose investigada.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo estudar o efeito da radiação gama, emitida por fonte de cobalto-60, nas propriedades físico-mecânicas das madeiras de Cedro Rosa (*Cedrela fissilis*) e Imbuia (*Ocotea porosa*), visando à aplicação do processo de irradiação na desinfestação e descontaminação de artefatos do patrimônio artístico e cultural brasileiro.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Principais considerações sobre a madeira

Dentre os vários materiais utilizados pelo homem ao longo de sua história, a madeira sempre ocupou posição de destaque, sendo amplamente empregada em vários setores, como na construção civil, no mobiliário e nas artes, apresentando a possibilidade de fabricar esculturas, imagens, altares e artigos para decoração. Entretanto, sua baixa resistência aos agentes externos, tais como intempéries, microorganismos e insetos, impossibilita seu uso estendido (LELIS e MOTEIRO, 1992).

Assim, diversas características desse material podem ser consideradas como determinantes da grande utilização:

- é um material renovável;
- sua extração pode ser feita em grande quantidade com custos relativamente baixos;
- sua transformação em bens de consumo requer menos energia do que outros materiais, tais como aço e plásticos;
- é capaz de resistir a esforços de compressão e tração elevados;
- não estilhaça quando golpeada;
- apresenta grande disponibilidade em formas e tamanhos diversos.

No corte transversal de uma árvore, podem-se observar três regiões distintas: o cerne, o alburno (responsáveis pelo transporte de água e sais minerais, na forma de seiva, para as folhas) e a casca (FIG.1).

Com o crescimento da árvore, as células do alburno perdem sua atividade fisiológica e vão-se transformando em depósitos de substâncias extrativas. Estas substâncias, por sua vez, são responsáveis por conferir à madeira propriedades distintas (ex.: odor, cor e sabor), bem como, em alguns casos, produzir substâncias inibidoras ou tóxicas aos organismos que as atacam. Sabe-se, também, que o grau de resistência mecânica da madeira é intimamente dependente da qualidade e quantidade de extrativos presentes (KLOCK *et al.*, 2005).

Fonte: KLOCK et al., 2005).

FIGURA 1 - Ilustração de uma seção transversal do tronco de uma árvore

De acordo com HELLMEISTER (1973), por meio das estruturas da madeiras apresentadas na FIG. 1, a seiva bruta sobe pelo alburno e a seiva elaborada desce pelas camadas internas da casca, penetrando na madeira pelos anéis. Neste caso, a água livre circula nos espaços vazios da madeira sem alterar suas dimensões e características.

A madeira seca em condições ambiente retém cerca de 8 a 16% de água nas paredes celulares. A madeira seca em fornos retém apenas um pequeno teor de umidade e, para quaisquer propósitos que não sejam químicos, são consideradas completamente secas. Em geral, o teor de água presente entre as mais variadas espécies é um dos fatores que garantem maciez à madeira. O mais relevante, porém, é a densidade aparente. Espécies de densidade aparente baixa são bem mais macias do que aquelas de densidade elevada.

3.2 Classificação

A madeira é um material produzido a partir do tecido formado pelas plantas lenhosas com funções de sustentação mecânica. Dessa forma, cada espécie de madeira apresenta características específicas que podem diferenciá-la e que são fundamentais para definição de usos.

Quanto à germinação, as árvores podem-se classificar como:

- a) Endógenas, que apresentam germinação interna. Seu caule se desenvolve de dentro para fora, ficando, assim, a parte mais antiga e mais dura na face externa. No Brasil, são utilizadas como material de construção; e
- b) Exógenas, que apresentam germinação externa, ou seja, seu caule se desenvolve de fora para dentro. Possuem estruturas similares a anéis, conhecidas como anéis de crescimento. De acordo com KLOCK et al. (2005), estas árvores podem ser subdividas em coníferas ou *gimnospermas* (ex.: Pinus, Araucárias e Ciprestes), e folhosas ou *dicotiledôneas* (*angiospermas*). A estrutura anatômica das espécies coníferas é mais simples que a das folhosas, apresentando maior permeabilidade e menor volume em seu cerne (DIAS e LAHR, 2004).

3.2.1 Cedro Rosa (*Cedrela fissilis*)

O Cedro Rosa é uma espécie arbórea nativa, cuja ocorrência, no Brasil, se estende do Rio Grande do Sul a Minas Gerais, na Floresta Amazônica e em Alta Floresta (municípios no norte do Estado do Mato Grosso). É uma madeira de alta qualidade que vem sendo dizimada pela exploração extrativista em consequência da demanda de mercado por madeiras nobres. A floração ocorre de setembro a dezembro, e os frutos amadurecem após a queda das folhas, entre julho e agosto, sendo que cada árvore chega a produzir mais de 1.500 frutos, com mais de 60.000 sementes férteis (CARVALHO, 1994; REITZ, KEIN e REIS, 1983). Esta árvore pode atingir até 40 metros de altura e 200 cm de diâmetro. Seu tronco é cilíndrico, longo, reto ou pouco tortuoso e quando se ramifica produz uma copa alta e frondosa. Possui casca com fissuras longitudinais profundas e largas, muito típicas. A casca interna é avermelhada e exala odor agradável.

RIZZINI (1981) afirma que o Cedro Rosa se destaca entre as madeiras mais apreciadas no comércio brasileiro e nas exportações. Sua madeira é parecida com a do Mogno (*Swietenia macrophylla*), sendo, porém, mais mole e de textura mais grossa. Possibilita o uso muito diversificado, superado somente pela madeira de Pinheiro-do-Paraná (*Araucaria angustifolia*). Esta madeira é muito empregada na construção civil e, devido ao seu custo alto, reduz-se a viabilidade

do seu emprego na geração de energia. Na medicina popular, é utilizada como tônica, adstringente, no combate à febre, na cicatrização de feridas e úlceras. A espécie é recomendada para arborização de praças públicas, parques e grandes jardins, assim como para recuperação de ecossistemas degradados e para reposição de matas ciliares em locais com ausência de inundação.

Nas FIG. 2a e FIG. 2b são mostradas a árvore de Cedro Rosa e o corte longitudinal da espécie de madeira, respectivamente.

FIGURA 2 – (a) Árvore de Cedro Rosa; (b) Corte longitudinal de Cedro Rosa

3.2.2 Imbuia (*Ocotea porosa*)

A espécie Imbuia (*Ocotea porosa*) é encontrada em grande parte do sul do país e é considerada como uma madeira nobre, muito empregada em mobiliários, na construção civil e na confecção de obras de arte (REGO et al., 2008; TONIN e PEREZ, 2006).

Segundo CARVALHO (1994), a Imbuia apresenta crescimento lento. Porém, árvores observadas em Campo Mourão, PR, em solo fértil, apresentaram incrementos médios anuais de 84 cm e 1,5 cm, em altura e em diâmetro, respectivamente, até o oitavo ano de vida, o que desmistifica a versão corrente no

sul do Brasil de que a Imbuia é a espécie nativa que cresce menos do que as demais. O crescimento inicial obtido pela Imbuia, neste caso, é superior ao de outras árvores nativas produtoras de madeira de lei.

As FIG. 3a e 3b apresentam a árvore de Imbuia e o corte longitudinal da madeira.

(a)

(b)

FIGURA 3 – (a) Árvore Imbuia (*Ocotea porosa*); (b) Corte longitudinal da madeira de Imbuia

3.3 Composição química da madeira

De acordo com publicação do INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (2001), o tronco das árvores coníferas e folhosas é formado por células constituídas fundamentalmente de macromoléculas de celulose, lignina e hemicelulose ou polioses. De acordo com a TAB.1, o teor dos principais constituintes químicos existentes em uma madeira permite a distinção dentre as mais variadas espécies.

TABELA 1 - Principais constituintes químicos das madeiras coníferas e folhosas

CONSTITUINTES	CONÍFERAS	FOLHOSAS
Celulose	42 ± 2%	45 ± 2%
Polioses	27 ± 2%	30 ± 5%
Lignina	28 ± 2%	20 ± 4%
Extrativos	5 ± 3%	3 ± 2%

Fonte: (adaptado de FENGEL, 1989)

Além dos compostos macromoleculares, há na madeira substâncias denominadas extrativos - compostos orgânicos, e sais minerais - compostos inorgânicos, tal como ilustra a FIG. 4.

Fonte: Figura adaptada de KLOCK, 2005

FIGURA 4 - Ilustração esquemática da distribuição dos componentes da madeira quanto ao peso molecular.

3.3.1 Celulose

A celulose é uma molécula linear de açúcar ou um polissacarídeo composto por monômeros de *β-D-glucose* (FIG. 5). As unidades de celulose apresentam morfologia fibrilar e formam moléculas complexas. Os polímeros de celulose compõem cerca de 40-45% da massa seca da maioria das madeiras. É o componente que se apresenta em maior proporção tanto nas espécies coníferas como nas folhosas. Sua resistência é devida à força de interações moleculares existentes entre as cadeias, formando pontes de hidrogênio (KLOCK et al., 2005).

FIGURA 5 – Ilustração da unidade estrutural de celulose

A celulose encontra-se ligada a vários tipos de polissacarídeos, designados por hemiceluloses, além de lignina, breu, proteínas, traços de substâncias minerais e outros componentes, dependendo da espécie botânica (VAN BEEK et al., 2007).

A TAB. 2 apresenta o teor médio de celulose presente em diferentes espécies de plantas.

TABELA 2 - Conteúdo médio de celulose presente em diferentes espécies de plantas

PLANTA	CELULOSE (%)
Algodão	95 – 99
Rami	80 – 90
Bambu	40 – 50
Madeira	40 – 50
Casca de Árvores	20 – 30
Musgos	25 – 30

Fonte: FENGEL e WEGNER et al., 1989.

As hidroxilas presentes nas moléculas de celulose, hemicelulose e lignina são capazes de interagir, formando moléculas de água que constituem a água de impregnação (HELLMEISTER, 1973). As unidades básicas de celulose se reúnem em cadeias lineares sem ramificações, com elevado grau de polimerização. Não há consenso quanto ao número de unidades presentes nas cadeias: 1.000, segundo RAWITCHER (1964); 5.000, segundo STAUM (1964); e até 10.000, segundo PANSIN, DE ZEEUW e BROW (1964).

3.3.2 Lignina

A lignina encontra-se principalmente nas regiões escuras das madeiras. Apresenta moléculas polifenólicas tridimensionais, pertencentes ao grupo dos fenilpropanos; tem estrutura complexa, amorfa e de massa molar alta (FENGEL e WEGNER, 1989). É um material muito reticulado (MAO et al., 2006), que confere resistência às espécies que sofrem esforços mecânicos. O teor de lignina nas coníferas é maior que o das folhosas, garantindo-lhes maior resistência mecânica. Na FIG. 6, é mostrada a representação de uma unidade estrutural da molécula lignina.

Fonte: FENGEL e WEGNER, 1989.

FIGURA 6 – Estrutura da lignina

3.3.3 Polioses

As polioses (hemiceluloses) são grupos de polissacarídeos de massa molar baixa (entre 25000 e 35000), dentre os quais se destacam as glucouranoxilanas, galactoglucomananas, glucomananas, arabinoglucouranoxilanas e

arabinogalactanas (KLOCK et al., 2005), que estão associadas à celulose nos tecidos das madeiras.

As madeiras folhosas, em geral, apresentam maior teor de polioses que as coníferas e composições diferenciadas. Na FIG. 7, são mostrados os principais grupos de polioses presentes nas madeiras.

É importante salientar que teores altos de polioses em madeira podem acarretar perda de resistência à tração em diversas espécies, devido à diminuição das fibras individuais e decréscimo do grau de polimerização (MORAIS, NASCIMENTO e MELO, 2005).

Fonte: MORAIS, NASCIMENTO e MELO, 2005

FIGURA 7 – Principais açúcares que compõem as unidades estruturais das polioses.

3.3.4 Extrativos

Os extrativos compõem uma enorme diversidade de substâncias de massa molar baixa, que podem ser classificadas em aromáticas (fenólicos), alifáticas, nitrogenadas, glicosídeos, esteróides, terpenos, carboidratos, e algumas substâncias inorgânicas, predominantemente cálcio, magnésio e potássio (FENGEL e WEGNER,

1989). Na FIG. 8, são mostrados os principais compostos pertencentes à classe dos extrativos.

Fonte: adaptado de FENGEL e WEGNER, 1989.

FIGURA 8 – Principais compostos presentes na classe dos extrativos

3.4 Trabalhabilidade na madeira

A arte de esculpir em madeira utiliza poucas espécies selecionadas em função da sua textura, características físico-mecânicas e tonalidade da matéria-prima. As madeiras comumente utilizadas são Cedro, Imbuia, Mogno e Cerejeira, por serem fáceis de trabalhar e mais leves.

O processo de entalhar uma madeira requer muito tempo e esforço, uma vez que o artista irá confeccionar detalhadamente uma escultura, extraindo o material desnecessário para que se obtenha a forma desejada (LEMOS, 1985).

Denomina-se trabalhabilidade o grau de facilidade em se trabalhar com a madeira. Assim, de acordo com BRAGA (2003), para se obter bons resultados na confecção de peças, é necessário realizar um pré-estudo sobre as principais características da madeira a ser trabalhada. Os principais tipos de madeira usados para confecção de esculturas são as madeiras finas e as madeiras duras ou de lei.

1. Madeiras finas permitem um bom acabamento, são muito utilizadas na confecção de móveis, esquadrias, obras de arte e outros produtos de marcenaria. Exemplos: ipê, cedro, vinhático, entre outras.

2. Madeiras duras ou de lei constituem um grupo relativamente resistente ao ataque biológico. São largamente empregadas na construção civil e em mobiliário. São chamadas de *madeiras de lei* porque, no período do Brasil colonial, seu corte era controlado pela Coroa Portuguesa. São exemplos: angico, freijó, mogno, imbuia.

Dentro deste contexto, o teor de água presente na madeira influencia diretamente suas propriedades e constitui um fator importante na indústria madeireira. Muitas vezes, processos de secagem são empregados, porém deve-se ter em mente que o fenômeno de retração ocorre ainda nesta fase, ou seja, abaixo do ponto de saturação das fibras. Acima disso, a perda das moléculas de água não acarreta aumento da resistência das madeiras.

Os dois tipos básicos de secagem são:

- a) Natural: permite secar a madeira dispondo as peças umas sobre as outras de modo a permitir um arejamento uniforme. Este processo é moroso, exige grandes espaços e imobiliza grandes quantidades de madeira. A secagem natural permite secar a madeira até umidade mínima de 12%. Abaixo dos 20% de umidade, a madeira resiste à putrefação. Abaixo do ponto de saturação das fibras, 30%, podem começar a surgir os defeitos de secagem, como rachaduras, empenamentos, encruamentos, colapsos, abaulamentos, torções e encanoamentos.
- b) Artificial: realizada por meio de estufas próprias, permite aumentar a taxa da secagem da madeira ao mesmo tempo que a protege dos fungos e insetos. Exige instalações caras, torna a madeira menos flexível e escurece o seu tom. Na secagem artificial, podem ser utilizadas diversas técnicas destinadas a acelerar o processo de secagem ou a conferir características específicas ao produto. Entre essas técnicas, encontram-se a utilização de vapor à pressão elevada, a utilização de permutadores de calor, a retirada de seiva por imersão em água, o uso de vapor de creosoto e de outros produtos para impregnar a madeira (GONZAGA, 2006).

Após os tratamentos de secagem, a madeira está pronta para ser trabalhada para diversos fins. Na TAB. 3, são apresentados os teores de umidade

de madeiras em equilíbrio com o ambiente em função da temperatura e da umidade relativa do ar. Estes dados permitem compreender a escolha das condições estabelecidas nas normas de testes que determinam a comparação de madeiras secas e com teores de umidade de 12 e 25%.

TABELA 3 - Teores de umidade de madeiras em equilíbrio com o ambiente

Temperature		Moisture content (%) at various relative humidity values																		
(°C)	(°F)	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
-1.1	(30)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.4	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
4.4	(40)	1.4	2.6	3.7	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.4	11.3	12.3	13.5	14.9	16.5	18.5	21.0	24.3
10.0	(50)	1.4	2.6	3.6	4.6	5.5	6.3	7.1	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.4	14.8	16.4	18.4	20.9	24.3
15.6	(60)	1.3	2.5	3.6	4.6	5.4	6.2	7.0	7.8	8.6	9.4	10.2	11.1	12.1	13.3	14.6	16.2	18.2	20.7	24.1
21.1	(70)	1.3	2.5	3.5	4.5	5.4	6.2	6.9	7.7	8.5	9.2	10.1	11.0	12.0	13.1	14.4	16.0	17.9	20.5	23.9
26.7	(80)	1.3	2.4	3.5	4.4	5.3	6.1	6.8	7.6	8.3	9.1	9.9	10.8	11.7	12.9	14.2	15.7	17.7	20.2	23.6
32.2	(90)	1.2	2.3	3.4	4.3	5.1	5.9	6.7	7.4	8.1	8.9	9.7	10.5	11.5	12.6	13.9	15.4	17.3	19.8	23.3
37.8	(100)	1.2	2.3	3.3	4.2	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.7	9.5	10.3	11.2	12.3	13.6	15.1	17.0	19.5	22.9
43.3	(110)	1.1	2.2	3.2	4.0	4.9	5.6	6.3	7.0	7.7	8.4	9.2	10.0	11.0	12.0	13.2	14.7	16.6	19.1	22.4
48.9	(120)	1.1	2.1	3.0	3.9	4.7	5.4	6.1	6.8	7.5	8.2	8.9	9.7	10.6	11.7	12.9	14.4	16.2	18.6	22.0
54.4	(130)	1.0	2.0	2.9	3.7	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	7.9	8.7	9.4	10.3	11.3	12.5	14.0	15.8	18.2	21.5
60.0	(140)	0.9	1.9	2.8	3.6	4.3	5.0	5.7	6.3	7.0	7.7	8.4	9.1	10.0	11.0	12.1	13.6	15.3	17.7	21.0
65.6	(150)	0.9	1.8	2.6	3.4	4.1	4.8	5.5	6.1	6.7	7.4	8.1	8.8	9.7	10.6	11.8	13.1	14.9	17.2	20.4
71.1	(160)	0.8	1.6	2.4	3.2	3.9	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.5	9.3	10.3	11.4	12.7	14.4	16.7	19.9
76.7	(170)	0.7	1.5	2.3	3.0	3.7	4.3	4.9	5.6	6.2	6.8	7.4	8.2	9.0	9.9	11.0	12.3	14.0	16.2	19.3
82.2	(180)	0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.1	4.7	5.3	5.9	6.5	7.1	7.8	8.6	9.5	10.5	11.8	13.5	15.7	18.7
87.8	(190)	0.6	1.3	1.9	2.6	3.2	3.8	4.4	5.0	5.5	6.1	6.8	7.5	8.2	9.1	10.1	11.4	13.0	15.1	18.1
93.3	(200)	0.5	1.1	1.7	2.4	3.0	3.5	4.1	4.6	5.2	5.8	6.4	7.1	7.8	8.7	9.7	10.9	12.5	14.6	17.5
98.9	(210)	0.5	1.0	1.6	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	6.0	6.7	7.4	8.3	9.2	10.4	12.0	14.0	16.9
104.4	(220)	0.4	0.9	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	3.9	4.5	5.0	5.6	6.3	7.0	7.8	8.8	9.9			
110.0	(230)	0.3	0.8	1.2	1.6	2.1	2.6	3.1	3.6	4.2	4.7	5.3	6.0	6.7						
115.6	(240)	0.3	0.6	0.9	1.3	1.7	2.1	2.6	3.1	3.5	4.1	4.6								
121.1	(250)	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9										
126.7	(260)	0.2	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.4												
132.2	(270)	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4													

Fonte: SIMPSON e TENWOLDE, 1999.

3.5 Deterioração do patrimônio artístico e cultural em madeira

As madeiras expostas ao tempo sem camadas protetoras tornam-se ásperas e escurecem. Os efeitos das intempéries limitam-se apenas à superfície das espécies. Na ausência de agentes destruidores, a erosão pela ação do tempo é muito lenta e geralmente resulta na degradação da celulose e lignina, componentes que garantem a resistência da madeira. Na maioria das vezes, a degradação que ocorre pode ser considerada como:

1. Deterioração física, que provoca mudanças de cor, aspereza superficial, rachaduras e fissuras;
2. Deterioração química, que é um fenômeno superficial que causa uma seqüência de reações de radicais livres, quebra da estrutura da lignina e alterações de cor (KLOCK et al., 2005).
3. Deterioração biológica, causada por diferentes agentes que são classificados em três grupos principais: microorganismos, bactérias e insetos (GONZAGA, 2006).

Quanto à deterioração biológica, no grupo de insetos que atacam a madeira destacam-se as brocas (*Coleoptera* ou besouros) e cupins (*Isoptera*).

As brocas constituem um grupo muito variado de espécies, dentre as quais podem se destacar a *Cerambicydae*, que ataca a madeira viva e seca, *Lyctidae* e *Anobiidae*, que atacam somente a madeira seca, as quais cavam galerias na madeira onde as larvas vivem. Outras espécies podem atacar a madeira serrada, pois necessitam de açúcares primários e amidos simples como alimentos. Estas também conseguem digerir a celulose e realizam simbiose com fungos e bactérias (GONZAGA, 2006). Nas FIG. 9a, 9b e 9c, são mostradas as principais brocas que atacam a madeira no Brasil, e a Figura 9d, ilustra a madeira atacada por brocas.

Fonte: GONZAGA, 2006.

FIGURA 9 – (a) Adulto e larva *anobiidae*; (b) Broca *Lyctidae*; (c) Broca *Cerambicydae*; (d) Madeira atacada por brocas

Somando-se às brocas, na classe dos principais tipos de insetos que atacam a madeira, destacam-se os cupins de madeira seca. A ação dos insetos em madeira é de fácil detecção, devido à sua elevada multiplicação, o que facilita o combate à infestação. Existem casos em que o desenvolvimento da colônia é mais lento, apresentando longos períodos em que os insetos se manifestam na forma de larvas. Nestes casos, quando se percebe a infestação é quase impossível a restauração completa, resultando na destruição súbita do objeto. Na FIG. 10a, é mostrado o ciclo de vida dos cupins, e nas FIG. 10b e 10c estão ilustradas madeiras infestadas por cupins.

(a)

Fonte: http://www.apcpragas.com/descupinizacao_clip_image007.jpg

(b)

(c)

Fonte: <http://static.hsw.com.br/gif/termite-1.jpg>

FIGURA 10 – (a) Ciclo de vida dos cupins; (b) e (c) Madeiras infestadas por cupins

Além do ataque de brocas e cupins, as madeiras sofrem acometimento de grupos de bactérias que produzem enzimas e atuam diretamente sobre as moléculas de celulose e hemiceluloses, rompendo as válvulas de circulação da seiva entre os tecidos da madeira, facilitando a penetração de fungos apodrecedores (GONZAGA, 2006).

Já os fungos, para se reproduzir, necessitam de condições propícias, tais como:

- temperatura preferencialmente entre 20°C e 30°C, podendo ocorrer num intervalo mais amplo;
- umidade acima de 20% na madeira;
- presença de oxigênio (aeração);
- pouca luz solar (não sobrevivem aos raios ultravioleta);
- pH levemente ácido (entre 4,5 e 5,5, pois não toleram pH acima de 7).

Para combater ou evitar a infestação por fungos, é necessário privá-los de uma ou mais das condições acima.

As principais alterações causadas pelas diferentes espécies de fungos são: manchas (FIG. 11a), embolorações (FIG. 11b) e podridões (Figura 11c e 11d).

(a)

(b)

(c)

(d)

FIGURA 11 - (a) Fungos manchadores; (b) Fungos emboloradores; (c) e (d) Presença de podridão na madeira

A biodegradação da madeira varia de acordo com as espécies, sendo que as mais resistentes aos ataques por fungos apresentam alto teor de compostos fenólicos, que são encontrados nos extrativos da madeira e são tóxicos aos fungos (GONZAGA, 2006).

3.6 Tratamentos preservantes da madeira

Para o controle de infestações por ataques biológicos em madeiras são utilizadas a impregnação de substâncias descritas na continuação:

1. Sem pressão: pode ser realizada com aspersão, pincelamento ou imersão de produtos tóxicos. São aplicados às madeiras que apresentam teor de umidade abaixo de 30%, ou seja, madeira seca. Este processo é caracterizado por não utilizar pressão externa. Como efeito, confere proteção limitada contra ataques biológicos, uma vez que esta preservação será viável às madeiras que apresentam baixo risco de deterioração.
 - a. A técnica de aspersão é indicada em casos em que a madeira apresente grandes superfícies sem quaisquer tipos de revestimento. São utilizados pulverizadores ou aspersores que promovem um fluxo contínuo de saída do preservante (BRAZOLIN, 1998);
 - b. O pincelamento é caracterizado como um processo simples. A aplicação da substância é feita com um pincel em várias direções na madeira limpa, com a retirada de pó ou materiais indesejáveis (LÉLIS e MONTEIRO, 1992);
 - c. A técnica de imersão consiste na submersão total da madeira em um preservante durante um curto período de tempo. A imersão é recomendada para tratamento de grandes quantidades de peças já com dimensões finais destinadas para uso (LEPAGE, 1986).
2. Com pressão: consiste num procedimento realizado em indústrias de preservação da madeira, com o uso de autoclaves. O método permite a impregnação do preservante, dadas as pressões empregadas para viabilizar a penetração da substância na madeira (CASSENS, 1995). Os processos sob pressão podem ser divididos em duas categorias:

- a. Célula cheia, que consiste no processo em que o preservante é transferido para a autoclave aproveitando o vácuo existente e, se necessário, a transferência é completada com o auxílio de uma bomba.
- b. Célula vazia, em que não é aplicado o vácuo inicial. O preservante é transferido para a autoclave sem retirada do ar interior.

Na TAB. 4, são mostrados os principais tipos de tratamentos e de preservantes para madeira.

TABELA 4 - Tipos de tratamentos e de preservantes para madeira

Preservação a aplicar		
Processo de tratamento preconizado	Natureza do preservante	Comportamento do preservante
Aspersão, imersão, pincelamento ou com pressão	Inseticida	Resistente a perdas por evaporação
Aspersão, imersão, pincelamento ou com pressão	Inseticida e fungicida	Pouco ou não lixiviável e resistente a perdas por evaporação
Com pressão	Inseticida e fungicida	Não lixiviável e resistente a perdas por evaporação
Com pressão	Inseticida e fungicida, molucida carcinocida	Não lixiviável e resistente a perdas por evaporação

Fonte: IPT, 2001.

Os preservativos usados em madeiras são substâncias químicas que necessitam de um solvente para penetrar na madeira, que são classificados em:

1. Hidrossolúveis: substâncias compostas por sais solúveis em água. Como exemplo, cita-se o arsenato de cobre cromatado (CCA) e o borato de cobre cromatado (CCB) usados contra o ataque de cupins e fungos, que deve ser aplicado sob pressão em madeiras secas (LÉLIS e MONTEIRO, 1992).

2. Óleos solúveis: são preservativos que utilizam o óleo como solvente. Por exemplo, o creosoto, que é um dos preservativos mais conhecidos, apresenta forte odor e não permite pintura posterior a sua aplicação (LEPAGE, 1986).

Durante o processo de impregnação, quando se usa arsenato de cobre cromatado ou borato de cobre cromatado, ocorrem reações consideradas perigosas, dada a possibilidade de ocorrência de emanções prejudiciais à saúde dos técnicos envolvidos no processo. Outra maneira de se entender a questão dos preservativos tóxicos é que eles causam a morte dos insetos que, eventualmente, venham a ingerí-los.

O sistema de desinfestação também pode ser o de imunização quando são aplicados preservativos nas peças (BRAZOLIN, 1998). Mesmo em casos em que não há a infestação por insetos, fungos e bactérias, os preservativos se fazem necessários. As técnicas usuais podem ser de aspersão, imersão, ou pincelamento. Para estes fins, as substâncias hidrossolúveis não são adequadas, pois a ação de chuvas espalhará o produto sobre o solo, destruindo a barreira química existente na madeira e podendo contaminar os lençóis freáticos.

3.6.1 Desinfestação de madeiras com substâncias tóxicas

Dentre os tratamentos tóxicos usados para eliminar micro-organismos e insetos que atacam a madeira destacam-se as substâncias que atuam em contato com as peças (sólidas ou líquidas) e os fumigantes (sólidas ou gases). Nestes grupos destacam-se: o brometo de metila, a fosfina, o naftaleno, o óxido de etileno, o paradiclorobenzeno, entre outros. Suas aplicações estão em restrição devido à sua alta toxicidade tanto para as pragas quanto para o ser humano, além de reagirem diretamente com os materiais e objetos tratados, podendo alterar suas propriedades físico-químicas (NIEVES, e GARCÍA, 1999).

Na TAB. 5, são mostradas as alterações físico-químicas que os materiais sofrem quando submetidos ao tratamento com substâncias tóxicas.

TABELA 5 - Alterações físico-químicas que os materiais sofrem, quando submetidos à tratamentos com diferentes agentes químicos

Produto	Categoria	Alterações no material
Brometo de Metila (CH ₃ Br)	Muito tóxico	Afetam os materiais que contenham enxofre, alteram a pigmentação das madeiras em geral. Seus usos estão limitados até que se comprove que outro solvente apresente a mesma ação sobre os insetos e fungos.
Fosfina (PH ₃)	Muito tóxico	Este gás não é recomendado para aplicações em museus, traças ou móveis, devido à sua alta toxicidade e alta reatividade com oxigênio.
Naftaleno (C ₁₀ H ₈)	Baixa toxicidade	Este composto pode recrystalizar sobre os objetos. Seu uso não é recomendado em ambientes de museus por apresentar riscos à saúde humana. Deve ser usado em ambientes onde se possam alcançar níveis estáveis de vapor do produto.
Óxido de etileno (C ₂ H ₄ O)	Muito tóxico	Este composto reage com proteínas, sais e celulose. Deixa resíduos por muito tempo em materiais que são tratados com esta substância. É altamente inflamável. Apresenta grande poder de desinfestação em todos os estágios de reprodução de microorganismos e insetos.
Para-dicloro-benzeno (C ₆ H ₄ Cl ₂)	Baixa toxicidade	Ataca materiais que apresentam celulose em sua composição.

Fonte: NIEVES E GARCÍA (1999).

Apesar da grande eficiência das ações de desinfestação que os processos de fumigação apresentam o uso de substâncias tóxicas, tais como óxido de etileno e brometo de metila, deve ser limitado, especialmente por questões de segurança para os operadores e de impacto ambiental. De fato, estas substâncias podem ser prejudiciais quando seu uso não seguir as devidas recomendações. Adicionalmente, a presença de substâncias persistentes também pode ser fator de risco para pessoas que freqüentam lugares onde objetos em madeira são tratados (MAGAUDDA, 2004).

3.6.2 Desinfestação de madeiras com substâncias não tóxicas

Existem alternativas para controle e eliminação de fungos e térmitas que atacam objetos de madeira, dentre os quais se destacam os métodos térmicos, as atmosferas anóxicas e o uso de radiações.

Os métodos térmicos consistem, basicamente, em submeter os objetos de madeira a temperaturas extremas para os insetos. Para tratamentos em câmaras de aquecimento, temperaturas entre 55°C e 60°C são consideradas suficientemente altas para eliminar pragas em todos os estágios em curto tempo. Esta técnica apresenta a desvantagem de desidratar a madeira, o que ocasiona contrações das peças. Por outro lado, o calor atua como catalisador acelerando as reações de degradação dos materiais. Então, surgem os processos de congelamento como alternativos. Assim, as temperaturas entre -20°C e -25°C são ideais para esta finalidade. Apesar da temperatura de 0°C provocar o estado de dormência em muitos insetos, pode ser fatal para outros. Na prática, o sistema produtivo opera entre -30°C e -40°C. Adicionalmente, o ideal para acabar com os insetos em muitos objetos é esfriá-los o mais rapidamente possível. Isso se deve à capacidade dos insetos de se adaptarem aos climas frios em seus *habitats* naturais (STRANG, 1995).

Os usos dos gases atmosféricos para o tratamento de peças históricas atacadas por insetos e fungos é um método seguro, tanto para as peças que são submetidas ao tratamento quanto para os manipuladores. Segundo VALENTIN, et al, (1998), a aplicação da técnica não provoca alterações físico-químicas nas peças em madeira e garantem 100% de mortalidade em todos os estágios dos insetos, tanto nas fases de crescimento dos ovos, larvas e adultos. O tratamento com atmosferas modificadas se dá em ambientes artificiais, onde oxigênio é substituído por um gás inerte. Dessa forma, cria-se uma atmosfera anóxia, incompatível com a vida dos insetos, em que a concentração de oxigênio encontra-se abaixo de 0,1%. Entretanto, estes processos não são eficientes na eliminação de fungos anaeróbicos.

Com base nesse cenário, vêm-se estudando métodos alternativos e eficazes para desinfestação e descontaminação de bens culturais móveis em madeira que não utilizem substâncias químicas tóxicas, dentre eles a irradiação destes objetos com raios gama.

3.7 Interações da radiação com a matéria

Em sistemas nos quais existe a interação radiação/matéria, deve-se considerar, para efeitos de estudo, a natureza da radiação incidente e o mecanismo pelo qual estas interações causam mudanças das propriedades físicas, mecânicas e/ou químicas da matéria. Estes fenômenos ocorrem quando um núcleo atômico instável emite *quanta* de energia de maneira corpuscular (partículas alfa e beta, e nêutrons) ou eletromagnética (raios X e raios gama) (DORE, 2008; KIRCHER e BOWMAN, 1964; SPINKS, 1999).

As radiações, quando possuem energia suficiente, atravessam a matéria, ionizando átomos e moléculas, modificando o seu comportamento. Assim, ao interagirem com a matéria, promovem sucessivas ionizações, transferindo energia para elétrons que são removidos do átomo ou molécula, os quais, por sua vez, também ionizam outros átomos ou moléculas nas proximidades. Este fenômeno é característico das radiações ionizantes.

Outros fatores são importantes quando se trata da interação da radiação de alta energia com a matéria. Por exemplo, sólidos orgânicos sofrem reações químicas complexas que são refletidas em suas propriedades físicas, elétricas, mecânicas e ópticas. Neste caso, a interação pode resultar na formação de moléculas excitadas que posteriormente se recombinaem ou dissociam para produzir radicais livres ou íons (SISMAN e BOPP, 1956).

Durante o processo de irradiação, a energia é distribuída por toda a extensão do material. O local onde ocorrem as modificações é determinado pela estereoquímica, pelo grau de cristalinidade e pela energia de dissociação das ligações dos grupos contidos no material.

De acordo com BETTINI (1992), as radiações gama são geradas por núcleos de isótopos radioativos naturais ou artificiais. Suas fontes mais usadas são o ⁶⁰-Co e ¹³⁷-Cs. Assim como os raios X, os raios gama são muito penetrantes e detidos somente por uma parede de concreto ou metal. Apresentam alta velocidade que pode ser comparada à da luz. As FIG. 12a, 12b e 12c mostram o modelo de construção do irradiador com fonte de ⁶⁰-Co, do Centro de

Tecnologia das Radiações, CTR, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP.

(a)

(b)

(c)

FIGURA 12 – (a) Ilustração do projeto do irradiador com fonte de ^{60}Co ; (b) Fontes de ^{60}Co submersas em piscina; (c) Instalações do Irradiador de ^{60}Co do CTR-IPEN.

3.7.1 Mecanismos de reações promovidas por radiação ionizante em materiais poliméricos

Nos materiais poliméricos naturais ou artificiais, tais como borracha, plásticos e madeira, os principais efeitos causados pela radiação ionizante são a cisão das ligações da cadeia principal e a reticulação por meio da formação de ligações cruzadas entre as cadeias (O'DONNEL e SANGSTER, 1970).

A cisão da cadeia principal é um evento aleatório. A predominância deste tipo de evento depende da dose aplicada, da taxa de dose e da estrutura química do polímero. A redução de massa molar, viscosidade, resistência mecânica do material e o rearranjo de grupos próximos ao ponto de cisão são fatores que mudam de acordo com o grau de cisão (BOLT e CARROL, 1991).

De acordo com FERRO (2003), o processo de reticulação induzida por radiação ionizante ocorre, principalmente, por meio da recombinação entre radicais gerados, formando redes tridimensionais no polímero irradiado. Os efeitos da reticulação são manifestados por meio do aumento da massa molar, da viscosidade e da diminuição da solubilidade do polímero irradiado. Os fatores que influenciam para que estes fatos aconteçam são: dose, taxa de dose e concentração de espécies reativas.

3.7.2 Efeitos da radiação gama na madeira

Os estudos sobre o efeito da radiação ionizante, especificamente da radiação gama em madeira, passaram a ser experimentados na década de 70. Foram observados resultados perceptíveis nos processos de tratamentos dados às fibras de celulose e lignina, permitindo a observação de consideráveis mudanças nas propriedades dos materiais e extensas oportunidades para a realização de futuras pesquisas neste segmento.

A aplicação da radiação gama tem fundamental importância nas alterações das propriedades físicas, mecânicas e químicas de espécies de madeira. A energia pode penetrar na madeira e iniciar uma série de reações de polimerização, reticulação e oxidação, alterando as características dos compostos

químicos presentes nas mesmas, como por exemplo, da celulose e lignina. Estas variações dependem principalmente da dose aplicada e das espécies irradiadas (FENGEL, JAKOB e STROBEL, 1995; FREITAG e MORRELL, 1998).

Mudanças na estrutura química da madeira podem ser apresentadas como a soma de irradiações dos componentes individuais, ou seja, celulose, hemicelulose e lignina. No entanto, a celulose é mais sensível à radiação gama que a lignina (FENGEL e WEGNER, 1989).

A cadeia polimérica de celulose se assemelha a uma fita plana, com grupos hidroxila prolongando-se lateralmente a partir das bordas, e átomos de hidrogênio orientados acima e abaixo do plano. Além disso, por apresentar grupos similares, ligam-se formando pontes de hidrogênio, com alternância entre domínios cristalinos e amorfos (BHUIYAN, HIRAI e SOBUE, 2001; KLIMENTOV e MJAGKOSTUPOVA, 1991).

A irradiação da madeira com raios gama contribui para a cisão de seus componentes e mudanças na cristalinidade da molécula de celulose nas diversas espécies. Há evidências de que a mudança na cristalinidade influencia a elasticidade, a capacidade de absorção de água, e outras propriedades físicas das fibras das madeiras (FENGEL, JAKOB e STROBEL, 1995).

Para as espécies *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica* e *Populus Alba*, que foram irradiadas até 1.000 kGy, observou-se que não há alterações significativas em sua cristalinidade (FENGEL e WEGNER, 1989; SOKIRA e BELASHEVA, 1992).

FENGEL (apud HENRYK, KINGA, SLAWOMIR, 2006), investigou as mudanças na estrutura macromolecular da celulose no Pinho (*Pinus sylvestris* L), quando submetido às doses de radiação gama de 20 kGy a 9.000 kGy, verificando as alterações no grau de cristalinidade da madeira por meio da técnica de difração por raio-X. Os autores constataram que a partir da dose de 120 kGy o grau de cristalinidade da celulose na madeira diminuiu. Quando submetida ao tratamento no intervalo de dose de 500 a 4.500 kGy, os mesmos observaram que há uma queda brusca na cristalinidade da espécie, e com 9.000 kGy houve a degradação total da molécula de celulose, tanto nas regiões cristalinas quanto nas regiões

amorfos. Os autores ainda observaram que o tamanho dos cristalitos presentes nas amostras diminuiu com o aumento da dose de radiação.

ANTOINE e VAN EYSEREN (1971) observaram a destruição total de celulose na espécie *Picea abies* por radiação gama na dose de 6.550 kGy, enquanto que a radiação gama em madeira de Carvalho com a dose de 19.000 kGy promove a quebra das regiões cristalinas da celulose (SEGAL et al., 1959).

KHAN (2005) investigou o efeito da radiação gama sobre as propriedades de componentes da madeira (celulose, lignina e hemicelulose), e relatou, também, que os efeitos dependem da dose de radiação e das espécies em estudo. O autor atribuiu os eventos de degradação da molécula de celulose à cisão da cadeia, que é proporcional à dose de radiação. Os mecanismos de reações sofridos pela molécula de celulose ocorrem inicialmente nos carbonos 1 e 6 (C1 – C6) por substituição do hidrogênio e hidroxila na molécula, ou pela quebra das ligações carbono-carbono (C-C) e carbono-oxigênio (C-O). A Figura 13 ilustra os pontos críticos da molécula em que ocorrem as reações. Tais reações também podem alterar as propriedades mecânicas das madeiras. A radiação gama, quando em presença de oxigênio, pode promover uma série de reações nos compostos que apresentam celulose, lignina e hemicelulose. Nestes casos há a formação de radicais peróxidos, diperoxídeos celulósicos (OO-Celulose) e hidroperóxidos (Celulose-OOH) que degradam as moléculas de celulose presentes nas madeiras.

Fonte: KHAN, AHMAD e KRONFLI (2005).

FIGURA 13 – Mecanismos de reações nas unidades estruturais da celulose após a irradiação com raios gama.

3.7.3 Efeitos radiação gama em insetos e microorganismos

O controle de infestação por ataques de insetos e microorganismos em madeiras é objeto de estudos tanto na área alimentícia, quanto nas áreas de restauração de madeiras e papéis que sofreram este tipo de infestação.

Pesquisadores devem levar em conta não apenas a eficiência dos processos, mas também os efeitos nocivos sobre a saúde humana. Conforme discutido anteriormente (item 3.6.2), os tratamentos baseados em fumigantes tóxicos, por exemplo, resultam na impregnação dos gases no material, colocando em risco os manipuladores, mesmo se um gás de purga for utilizado. Assim, longos períodos de quarentena são requeridos. Outros tratamentos aceitos tais como congelamento ou a exposição do material em um ambiente com baixa concentração de oxigênio podem limitar o crescimento dos fungos, mas são ineficientes para eliminar determinadas espécies.

Assim, a exposição à radiação ionizante gama pode ser considerada como uma alternativa para a descontaminação ou desinfestação de objetos em casos em que os outros métodos de preservação apresentem restrições.

Quando a radiação é absorvida por um material biológico, existe a possibilidade de esta agir diretamente em alvos críticos nas células. As moléculas ionizadas ou excitadas de ácido nucléico são capazes de iniciar uma série de eventos na cadeia que culminam com a morte celular (AQUINO, 2003). Este é o efeito direto da radiação, processo dominante que ocorre quando os esporos secos de microorganismos são irradiados. Alternativamente, no processo indireto, a radiação pode interagir com outros átomos ou moléculas na célula, particularmente água, para produzir radicais livres e assim alcançar e danificar o DNA. Este efeito indireto da radiação é importante em células vegetativas, onde o citoplasma contém cerca de 80% de água. Não é o caso da madeira já desbastada, previamente tratada e pronta para utilização, objeto de estudo deste trabalho.

O controle de infestação por insetos em livros impressos em papel derivado de celulose pode ser realizado, aplicando-se doses baixas de radiação, da ordem de 0,2 kGy a 0,5 kGy, enquanto a infestação por fungos requer doses da ordem

de 3 kGy a 8 kGy. Em casos de reinfestação recomenda-se aplicar as mesmas doses (MAGAUDDA, 2004).

Pela absorção da energia das radiações (em forma de calor) células ou pequenos organismos podem ser destruídos. Essa propriedade, que normalmente é inconveniente para os seres vivos, pode ser usada em seu benefício, quando empregada para destruir células ou micro-organismos nocivos. Entretanto, a radiação pode causar danos à estrutura dos materiais, fazendo-se necessário um estudo do efeito de diferentes doses sobre suas características.

No levantamento bibliográfico realizado, foi possível detectar apenas dados referentes ao efeito da radiação gama em algumas espécies de madeiras. Este trabalho representa uma contribuição inédita ao estudo da recuperação e preservação de artefatos culturais e artísticos feitos em madeiras brasileiras, tais como esculturas, móveis, altares em igrejas, utilizando a radiação gama emitida por fonte de ^{60}Co para combater contaminações causadas por micro-organismos e insetos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Espécies de madeiras:

- Cedro Rosa (*Cedrella fissilis*)
- Imbuia (*Ocotea porosa*)

4.2 Métodos

4.2.1 Preparação das amostras

Os lotes de madeira estudados constituíram-se de 12 tábuas de diferentes árvores das espécies Cedro Rosa e Imbuia. As tábuas foram aparelhadas até as dimensões de 10 cm x 10 cm x 250 cm e os corpos-de-prova foram extraídos aleatoriamente os quais foram denominados A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, para ambas as espécies, representando a totalidade dos lotes.

Seguindo a determinação da NBR 7190/1997, anexo B, os corpos-de-prova apresentaram-se homogêneos respeitando-se a heterogeneidade natural da madeira, isentos de defeitos, e foram retirados de regiões afastadas das extremidades das tábuas, em condições de pressão de 1 atm e de temperatura de 25°C. A homogeneidade dos corpos-de-prova faz-se necessária para evitar ao máximo a interferência das variações inerentes à própria espécie de madeira sobre as características a serem estudadas.

4.2.2 Irradiação das amostras

Os corpos de prova foram expostos no irradiador de fonte cobalto 60 com atividade de 9000 Ci, localizado no Centro de Tecnologia das Radiações (CTR / IPEN /CNEN-SP), e submetidos ao tratamento com as doses de 25 kGy, 50 kGy e 100 kGy, controladas com o uso de dosímetros. O objetivo da dosimetria é assegurar que as doses absorvidas pelo material durante o tratamento com radiação gama sejam uniforme em toda a extensão da amostra. A dose absorvida

é a quantidade de energia absorvida por unidade de massa de matéria irradiada. Sua unidade é o Gray (Gy), que substitui a unidade anteriormente empregada de dose absorvida que é o rad ($\text{Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$). A taxa de dose absorvida é definida como a variação da dose com o tempo (D/t); sua unidade é Gray por segundo (Gy/s).

4.2.3 Caracterização dos corpos- de- prova

De acordo com a norma técnica NBR 7190/1997, para a caracterização mínima das espécies Cedro Rosa e Imbuia foram ensaiados 12 corpos-de-prova para cada propriedade.

Foram determinados: estabilidade térmica, umidade, massa específica aparente, porcentagem de retração radial e tangencial, resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade na flexão estática, resistência ao cisalhamento e dureza perpendicular às fibras.

4.2.3.1 Termogravimetria (TG)

Os ensaios de análise térmica para as amostras de madeiras foram realizados utilizando-se uma termobalança, modelo TG50, da Shimadzu Co. As curvas TG, de perda de massa em função do tempo ou da temperatura, foram obtidas com cerca de 5 mg de amostra, taxa de aquecimento de 10°C/min , de temperatura ambiente até 700°C , em atmosfera dinâmica de ar comprimido seco com vazão de 50 mL/min. Os ensaios permitiram avaliar comparativamente a estabilidade térmica das madeiras tal como extraídas e após o tratamento com radiação gama (MACHADO e MATOS, 2004).

4.2.3.2 Umidade

Tanto a celulose como a lignina presentes na madeira apresentam numerosos grupos de hidroxila, que se atraem mutuamente, e também moléculas de água. Quando vivo, o tecido lenhoso se encontra saturado de água. Após o corte da árvore,

a madeira perde lentamente a água até atingir um conteúdo de umidade de equilíbrio com as condições do ambiente (IPT, 1986).

A maioria das propriedades mecânicas das madeiras, como por exemplo, resistência à tração, à compressão, ao cisalhamento, dureza sofre influência do teor de umidade. Assim, é imprescindível a sua determinação para melhor estabelecer os procedimentos para a correta aplicação do material (DIAS e LAHR, 2004).

Para a realização do ensaio, os corpos-de-prova foram cortados em seção transversal retangular, com dimensões nominais de 2 cm x 2 cm e comprimento ao longo das fibras de 5 cm.

Para determinar a umidade nas espécies de madeiras, pesa-se a massa inicial do corpo-de-prova em uma balança analítica com sensibilidade 0,01 g. O corpo-de-prova é colocado numa estufa de secagem com temperatura de $103 \pm 2^\circ\text{C}$. Durante a secagem, a variação de massa sofrida pelo corpo-de-prova é medida a cada 6 horas, até notar-se uma variação entre as medidas menor ou igual a 0,5 %, determinando-se assim a massa seca. Uma vez conhecendo-se a massa da madeira seca, determina-se a umidade pela equação 1:

$$U (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

em que:

m_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

m_s é a massa da madeira seca, em gramas.

4.2.3.3 Massa específica aparente

A massa específica da madeira que compõe a parede celular é da ordem de $1,5 \text{ g/cm}^3$, independentemente da espécie considerada. Dentre as espécies mais estudadas, a massa específica pode variar desde $0,50 \text{ g/cm}^3$ até $1,10 \text{ g/cm}^3$. Assim, percebe-se que as madeiras mais leves contêm mais espaços vazios que as madeiras mais pesadas. Como no caso da umidade, as características mecânicas da madeira variam com a massa específica da espécie, o que torna importante a sua determinação (IPT, 1986).

Para a realização do ensaio os corpos-de-prova foram cortados em forma prismática com seção transversal retangular, com dimensões nominais de 2 cm x 2 cm, e comprimento ao longo das fibras de 5 cm.

Inicialmente determina-se a massa seca dos corpos de prova das espécies de madeira. As massas são determinadas em uma balança analítica com sensibilidade de 0,01 g, e as dimensões são medidas com paquímetro digital com sensibilidade de 0,01 mm. A densidade aparente, ρ_{ap} é a massa específica convencional, definida pela razão entre a massa e o volume dos corpos-de-prova com teor de umidade de 12%, sendo dada pela equação 2:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{v_{12}} \quad (2)$$

em que:

m_{12} é a massa da madeira com 12% de umidade (g);

v_{12} é o volume da madeira com 12% de umidade (cm³).

4.2.3.4 Retratabilidade

A retratabilidade é o fenômeno de variação dimensional que ocorre com a madeira quando há uma alteração no seu teor de umidade, para porcentagens inferiores ao ponto de saturação. As variações das dimensões nas peças de madeira começam a ocorrer quando se perde ou se ganha umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, que, de modo geral, situa-se ao redor de 28 a 30% de umidade (CALIL JR, LAHR e DIAS, 2003). A estabilidade dimensional da madeira é caracterizada pelas propriedades de retração e de inchamento. As características de retração da madeira são bastante diferentes entre as espécies, dependendo do modo de secagem e do próprio comportamento da madeira, o que leva ocasionalmente à alterações de forma e à formação de fendas e empenos. Existem várias explicações sobre a causa do aumento da contração com a temperatura. Uma das razões poderia ser a diminuição do teor de umidade de equilíbrio, mas tal fator causaria um aumento de contração menor que 1% e, na realidade, o aumento de contração é muito maior que esse valor. Outros fatores podem contribuir para explicar a contração da madeira: presença do colapso da parede celular, devido às forças capilares que excedem a resistência à compressão da madeira no sentido perpendicular às fibras; uma parte da

contração seria, na realidade, uma compressão residual resultante das tensões desenvolvidas durante a secagem; uma degradação térmica parcial do material.

Para a realização dos ensaios, os corpos-de-prova foram cortados em forma retangular, com dimensões nominais de 2 cm (na direção tangencial) × 3 cm (na direção radial) e ao longo do comprimento das fibras (direção axial ou longitudinal) de 5 cm, como é mostrado na FIG.14.

(Fonte: CALIL JR, LAHR e DIAS, 2003).

FIGURA 14 – Ilustração das principais direções na madeira

Cada ensaio foi realizado em quatro fases distintas: secagem dos corpos-de-prova, intumescimento, condicionamento e secagem em estufa.

1. A fase de secagem prévia foi realizada em sala climatizada (temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $65\% \pm 5\%$). Aqui, o objetivo foi diminuir a umidade inicial, até que a variação dimensional dos corpos-de-prova se estabilizasse em torno de 0,02 mm ($U = U_{\text{início}}$).
2. Na fase de intumescimento, também realizada em sala climatizada com as mesmas temperaturas da fase de secagem prévia, os corpos-de-prova foram imersos em água destilada até a completa saturação da madeira, com precisão de 0,01 mm ($U = U_{\text{sat}}$).
3. A fase de condicionamento, também realizada em sala climatizada, além de amenizar o processo de secagem, condiciona cada corpo-de-prova a um teor de umidade em torno de 12% ($U = U_{\text{cond. 12\%}}$).

4. Na fase de secagem final, a estufa foi regulada a manter a temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, e os corpos-de-prova foram completamente secos ($U = 0\%$).

Para os corpos-de-prova, o controle de massas e dimensões das amostras foi realizado em diversos momentos do ensaio.

Obtidas as dimensões ao final da fase de intumescimento, fase em que a madeira está saturada em água, e ao final da fase de secagem em estufa, quando a madeira está completamente seca, foram calculadas as retrações sofridas pelas espécies, que podem ser dadas pelas equações 3 a 6:

$$\epsilon_{r, 2} = \left(\frac{L_{2,sat} - L_{2,seco}}{L_{2,sat}} \right) \times 100 \% \quad (3)$$

$$\epsilon_{r, 3} = \left(\frac{L_{3,sat} - L_{3,seco}}{L_{3,sat}} \right) \times 100 \% \quad (4)$$

$$\epsilon_{i, 2} = \left(\frac{L_{2,sat} - L_{2,seco}}{L_{2,sat}} \right) \times 100 \% \quad (5)$$

$$\epsilon_{i, 3} = \left(\frac{L_{3,sat} - L_{3,seco}}{L_{3,sat}} \right) \times 100 \% \quad (6)$$

As deformações de retração, ϵ_r , e de inchamento ϵ_i , são consideradas como índices de estabilidade dimensional e foram determinadas para cada uma das direções preferenciais (radial e tangencial) das espécies Cedro Rosa e Imbuia:

$\epsilon_{r,2}$ e $\epsilon_{r,3}$ são respectivamente deformações por retrações, para variação do teor de umidade das espécies de madeira saturada em água até completamente seca, nas direções radial (inchamento radial total) e tangencial (inchamento tangencial total);

$\epsilon_{i,2}$ e $\epsilon_{i,3}$ são deformações específicas, por inchamento, para variação do teor de umidade das espécies de madeira completamente seca até saturada em água, respectivamente, nas direções radial e tangencial;

$L_{2,Sat}$ e $L_{2,seca}$ são dimensões na direção radial, medidas nas quatro arestas, respectivamente para as espécies de madeiras saturadas em água e completamente secas;

$L_{3,Sat}$ e $L_{3,seca}$ são as dimensões nas direções tangenciais, medidas nas quatro arestas, para as espécies de madeiras saturadas em água e completamente secas.

A variação de contração volumétrica total pode ser determinada pela equação 7:

$$\Delta v = \frac{V_{sat} - V_{seca}}{V_{seca}} \times 100\% \quad (7)$$

em que:

$$V_{sat} = L_{1,Sat} \times L_{2,Sat} \times L_{3,Sat};$$

$$V_{seca} = L_{1,seca} \times L_{2,seca} \times L_{3,seca}$$

4.2.3.5 Ensaios mecânicos

As amostras foram submetidas aos ensaios para determinação da resistência à compressão paralela às fibras, do módulo de elasticidade na flexão estática, da resistência ao cisalhamento e da dureza perpendicular às fibras. Os ensaios foram realizados na USP - São Carlos, no LaMEM - Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras. Nas FIG.15a e 15b é mostrado o equipamento utilizado para a realização dos ensaios mecânicos.

FIGURA 15 - Equipamento Universal AMSLER para realização de ensaios mecânicos em madeira

A FIG.16 ilustra o comportamento da madeira em ensaios mecânicos de tração, compressão e cisalhamento.

Fonte: CALIL JR, LAHR e DIAS, 2003

FIGURA 16 – Ilustração do comportamento da madeira nos ensaios de tração compressão e cisalhamento

4.2.3.5.1 Resistência à compressão paralela às fibras

A resistência à compressão paralela às fibras (F_{c0}) é dada pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo-de-prova, sendo dada pela equação 8:

$$F_{c0} = \frac{f_{c0,m\acute{a}x}}{A} \quad (8)$$

em que:

$F_{c0, m\acute{a}x}$ é a máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova (N);

A é a área inicial da seção transversal comprimida (m²);

f_{c0} é a resistência à compressão paralela às fibras (MPa).

Para a realização do ensaio, o corpo-de-prova foi cortado com seção transversal quadrada de 2 cm (na direção tangencial) e 2 cm (na direção radial) e de 6 cm de comprimento (direção axial ou longitudinal), de acordo com a norma NBR 7190/1997.

As deformações específicas foram medidas com o uso de extensômetro com exatidão mínima de 50 µm/m. Para o ajuste do corpo-de-prova na máquina de ensaio deve-se utilizar uma rótula entre o atuador e o corpo-de-prova. A resistência deve ser determinada com carregamento monotônico crescente, com uma taxa de 10 MPa/min, aproximadamente. A FIG.17 ilustra os extensômetros

comparadores da carga aplicada ao corpo-de-prova com precisão de 0,001 mm para a realização dos ensaios de compressão paralela às fibras.

FIGURA 17 - Extensômetros comparadores usados para realização dos ensaios de compressão paralela às fibras.

4.2.3.5.2 Módulo de elasticidade na flexão estática

Os ensaios foram realizados medindo-se a flexão no módulo de elasticidade. Este método é caracterizado pela capacidade de recuperar a forma original do corpo tensionado depois de removida a carga/força.

Para a realização do ensaio, os corpos-de-prova apresentaram secção transversal nominal de 2 cm × 2 cm nas laterais e comprimento na direção paralela às fibras de 45 cm. O ensaio foi realizado com vão livre de 42 cm (equivalente à recomendação da norma, que prescreve relação vão-livre/altura igual a 21), como ilustrado na FIG. 18.

FIGURA 18 – Corpo-de-prova da espécie Cedro Rosa para ensaio de flexão para determinação do módulo de elasticidade.

Para a caracterização mínima das espécies, os corpos-de-prova foram vinculados a dois apoios articulados móveis, com vão livre de 42 cm entre os apoios. O equilíbrio do sistema é formado pelo atrito. O ensaio realiza-se

aplicando uma carga com taxa de 10 MPa/min. Assim, a rigidez das espécies é determinada pelo ensaio destrutivo das amostras.

As medidas dos deslocamentos transversais fixados nos corpos-de-prova foram registradas para cada ponto onde há deformação da amostra até 70% da força estimada para a ruptura do corpo-de-prova.

A resistência da madeira à flexão (f_M) é um valor convencional, dado pela máxima tensão que pode atuar em um corpo-de-prova no ensaio de flexão simples, calculado com a hipótese de a madeira ser um material elástico, sendo dada pela equação 9:

$$f_M = \frac{P \times \frac{L}{4}}{\frac{b \times h^2}{6}} = \frac{3 PL}{2 b \times h^2} \quad (9)$$

em que:

M_{max} é o máximo momento aplicado ao corpo-de-prova, dado por $P \times L/4$, em Nm;

W_e é o modulo de resistência elástico da seção transversal do corpo-de-prova, dado por $[b \times h^2/6]$, em m³.

A FIG.19 ilustra o ensaio de flexão da amostra de madeira Cedro Rosa.

Fonte: NBR 7190 apud MORALES,1997

FIGURA 19 – Equipamento para ensaio de flexão da amostra de Cedro Rosa

A rigidez da madeira à flexão foi estabelecida determinando-se o módulo de

elasticidade, a partir do trecho linear do diagrama de carga vs deslocamento, como está indicado na FIG.20.

Fonte: ABNT, NBR 7190/1997.

FIGURA 20 - Diagrama carga vs deslocamento para a determinação da rigidez à flexão

O módulo de elasticidade foi terminado pela inclinação da reta correspondente à força aplicada vs deslocamento, definida pelos pontos ($F_{10\%}$; $v_{10\%}$) e ($F_{50\%}$; $v_{50\%}$), referentes respectivamente a 10% e 50% da força máxima aplicada no ensaio, previamente estimada por meio de um corpo-de-prova homogêneo. Tal parâmetro de elasticidade, MOE ou E_{M0} , é dado pela equação 10:

$$E_{M0} = \frac{(F_{M50\%} - F_{M10\%}) \times L^3}{(v_{50\%} - v_{10\%}) \times 4bh^3} \times 100 \quad (10)$$

em que:

$F_{M10\%}$ e $F_{M50\%}$ são as forças correspondentes a 10% e 50% da força máxima estimada, aplicada ao corpo-de-prova, em Newtons;

$v_{10\%}$ e $v_{50\%}$ são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da força máxima estimada F_{Mest} , em metros;

b e h correspondem, respectivamente, à largura e à altura da seção transversal do corpo-de-prova, em metros.

A FIG.21 ilustra os diagramas de carregamento para o ensaio de flexão.

Fonte: ABNT, NBR 7190/1997.

FIGURA 21 - Diagrama de carregamento para o ensaio de flexão

4.2.3.5.3 Dureza (Método Janka)

A dureza da madeira (F_H) proposta por Janka é determinada convencionalmente pela tensão que atua em uma das faces de um corpo-de-prova prismático, induzindo a penetração de uma semi-esfera de aço com área diametral de um centímetro quadrado, dada pela equação 11:

$$F_H = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_{se\c{c}\tilde{a}o\ diametral}} \quad (11)$$

em que:

$F_{m\acute{a}x}$ é a máxima força aplicada ao corpo-de-prova necessária à penetração de uma semi-esfera de seção diametral com 1 cm^2 na profundidade igual ao seu raio (N);

$A_{se\c{c}\tilde{a}o\ diametral}$ é a área do corte diametral da esfera, igual a 1 cm^2 .

Os corpos-de-prova foram cortados com seção transversal nominal de $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ nas laterais e comprimento de 15 cm na direção paralela às fibras, conforme ilustrado na FIG.22. O ensaio foi realizado com vão livre de 42 cm (equivalente à recomendação da norma, que prescreve relação vão-livre/altura de vinte e uma vezes a altura),.

Fonte: ABNT, NBR 7190/1997

FIGURA 22 – Dimensões do corpo-de-prova para o ensaio de dureza

Na FIG. 23, é mostrado o equipamento usado para a realização do ensaio de dureza.

Fonte: NBR 7190 apud MORALES 1997.

FIGURA 23 – Equipamento para ensaio de dureza Janka

4.2.3.5.4 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira (f_{v0}) é dada pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo-de-prova prismático, sendo dada por:

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,max}}{A_{v0}} \quad (13)$$

em que:

$F_{v0, max}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo-de-prova, em Newton (N);

A_{v0} é a área inicial da seção crítica do corpo-de-prova, num plano paralelo às fibras, em metro quadrado (m²).

Para a realização do ensaio de cisalhamento, os corpos de prova foram cortados de com as dimensões especificadas na FIG.24.

Fonte: NBR 7190 apud MORALES, 1997.

FIGURA 24 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento

Na FIG.25, é mostrado o esquema para o ensaio de cisalhamento na madeira.

Fonte: CALIL JR, LAHR e DIAS, 2003

FIGURA 25 - Comportamento da madeira no cisalhamento

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaios de densidade aparente

Na TAB.6 e nas FIG. 26 e 27, é apresentado o comportamento das espécies de madeira Cedro Rosa e Imbuia no tocante à densidade aparente para diferentes teores de umidade em diferentes doses de irradiação e não irradiadas.

TABELA 6 – Valores médios experimentais da densidade aparente para diferentes teores de umidade das espécies de madeiras de Cedro Rosa e Imbuia não irradiadas e submetidas a diferentes doses de radiação.

<i>Doses de radiação (kGy)</i>	<i>Densidade aparente (g/cm³)</i>					
	<i>Imbuia</i>			<i>Cedro Rosa</i>		
	<i>Verde (%)</i>	<i>Seco (12%)</i>	<i>Seco (0%)</i>	<i>Verde (%)</i>	<i>Seco (12%)</i>	<i>Seco (0%)</i>
Não Irradiada	0,95 ± 0,03	0,71 ± 0,05	0,66 ± 0,05	0,73 ± 0,01	0,45 ± 0,01	0,39 ± 0,01
25	1,04 ± 0,03	0,76 ± 0,04	0,71 ± 0,04	0,74 ± 0,01	0,42 ± 0,01	0,40 ± 0,01
50	1,04 ± 0,02	0,75 ± 0,03	0,71 ± 0,01	0,75 ± 0,01	0,42 ± 0,01	0,39 ± 0,01
100	1,01 ± 0,02	0,74 ± 0,03	0,69 ± 0,01	0,74 ± 0,01	0,43 ± 0,01	0,39 ± 0,01

FIGURA 26 - Valores médios da densidade aparente de diferentes teores de umidade da espécie das amostras de Cedro Rosa irradiadas e não irradiada

FIGURA 27 - Valores médios da densidade aparente de diferentes teores de umidade da espécie das amostras de Imbuia irradiadas e não irradiada

A espécie Imbuia no estado verde quando irradiadas a 25 kGy e 50 kGy apresentam aumento de 9% na densidade em relação às amostras não irradiadas. Quando o teor de umidade é 12% na espécie Imbuia, é possível observar uma variação superior em relação à amostra não irradiada.

A espécie Cedro Rosa no estado verde quando submetidas às doses de irradiação de 25 kGy e 50 kGy apresentam valores médios de densidade 3% superiores aos da amostra não irradiada. Já com teor de umidade de 12% é possível observar que não há variações significativas na densidade em relação à amostra não irradiada.

Os valores médios da densidade aparente obtidos nas amostras das duas espécies de madeira são muito próximos, fato que comprova que a radiação não induz mudanças significativas nesta propriedade, pois o processo é lento e não chega a promover o aquecimento da amostra, por mais que haja absorção de energia.

5.2 Ensaios de retratibilidade

A TAB.7 e as FIG. 28 e 29 apresentam dados experimentais sobre o comportamento das espécies de madeira Cedro Rosa e Imbuia no ensaio de determinação das porcentagens de retração parcial e total em diferentes doses de radiação e não irradiadas.

TABELA 7 – Porcentagens médias de retração tangencial e retração radial das espécies Imbuia e Cedro Rosa, irradiadas e não irradiadas

<i>Dose de radiação (kGy)</i>	<i>Imbuia</i>		<i>Cedro rosa</i>	
	<i>Retração Tangencial</i>	<i>Retração Radial</i>	<i>Retração Tangencial</i>	<i>Retração Radial</i>
Não Irradiada	1,26 ± 0,05	2,40 ± 0,12	0,20 ± 0,03	0,39 ± 0,06
25	1,30 ± 0,02	2,50 ± 0,04	0,23 ± 0,01	0,45 ± 0,01
50	1,23 ± 0,07	2,50 ± 0,04	0,17 ± 0,02	0,32 ± 0,04
100	1,27 ± 0,07	2,60 ± 0,04	0,21 ± 0,02	0,40 ± 0,04

FIGURA 28 - Porcentagens médias de retração tangencial e retração radial da espécie Cedro Rosa, irradiadas e não irradiadas

FIGURA 29 - Porcentagens médias de retração tangencial e retração radial da espécie Imbuia, irradiadas e não irradiadas

Nos dados obtidos nos ensaios de reatibilidade com retração tangencial e radial é possível observar que as espécies Imbuia e Cedro Rosa, quando submetidas ao tratamento de irradiação com doses de 25, 50 e 100 kGy, não apresentam variações significativas.

5.3 Ensaios de compressão paralela às fibras

Na TAB. 8 e nas FIG. 30 e 31 são apresentados os valores médios e os desvios-padrão de resistência à compressão paralela às fibras das espécies de madeira Cedro Rosa e Imbuia, ambas não irradiadas e irradiadas às doses de 25 kGy, 50 kGy e 100 kGy.

TABELA 8 – Valores médios dos ensaios de resistência à compressão paralela às fibras nas espécies de madeiras de Cedro Rosa e Imbuia não irradiadas e irradiadas

Doses de radiação (kGy)	f_{co} (MPa)	
	Imbuia	Cedro Rosa
Não irradiada	51,5 ± 1,0	31,2 ± 0,4
25	52,4 ± 1,6	32,6 ± 0,3
50	50,6 ± 1,2	31,9 ± 0,6
100	50,7 ± 1,1	31,2 ± 0,9

FIGURA 30 – Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras da amostra de Cedro Rosa irradiadas e não irradiadas

A partir dos resultados apresentados na Tab. 8 e FIG. 30 e 31, é possível verificar que as amostras irradiadas de Cedro Rosa e Imbuia apresentam variações não significativas em relação às amostras não irradiadas. Nota-se, inclusive, que a faixa de erro é sobreposta pelos valores médios encontrados, indicando baixa variabilidade nos resultados calculados. Também não foi

observada tendência de aumento do desvio padrão com o aumento da radiação absorvida.

FIGURA 31 - Ensaio de resistência à compressão paralela às fibras da amostra de Imbuia irradiadas e não irradiadas

FENGEL (1989) afirma que a radiação pode provocar uma série de reações químicas nas cadeias poliméricas da celulose e lignina, promovendo reações simultâneas e aleatórias que são ocasionadas pela interação do oxigênio com os radicais presentes nas mesmas. O autor ainda relata que, em análises químicas realizadas em amostras de celulose e lignina, observa-se que mesmo em doses de radiação muito baixas é possível notar o aumento das cadeias poliméricas dos componentes das espécies, fato que pode ser explicado pela reticulação das mesmas. Os grupos hidroxilas são responsáveis pelo comportamento físico e químico da madeira, conferindo rigidez às cadeias unitárias devido às forças intermoleculares presentes nas amostras das diferentes espécies de madeira. Os resultados obtidos permitem afirmar que as doses de radiação aplicadas nas amostras de Cedro Rosa e Imbuia não promoveram alterações nesta propriedade.

5.4 Módulo de elasticidade na flexão estática

Nas TAB.9 e nas FIG. 32 e 33 é mostrado o comportamento do módulo de elasticidade na flexão estática das espécies de madeira Cedro Rosa e Imbuia.

TABELA 9 – Módulo de Elasticidade, MOE, das espécies Cedro Rosa e Imbuia não irradiadas e submetidas a diferentes doses de radiação gama

Doses de radiação (kGy)	Módulo de elasticidade (MPa)	
	Cedro Rosa	Imbuia
Não irradiada	5.340 ± 100	10.150 ± 150
25	5.450 ± 070	10.100 ± 070
50	5.900 ± 100	10.260 ± 350
100	5.350 ± 200	10.040 ± 840

FIGURA 32 - Módulo de elasticidade na flexão estática das amostras de Cedro Rosa, não irradiadas e irradiadas.

FIGURA 33 - Módulo de elasticidade na flexão estática das amostras de Imbuia, não irradiadas e irradiadas.

De acordo com CURLING et al. (2008), a diminuição do MOE após a irradiação depende do MOE inicial das espécies. Quando a radiação gama interage com as espécies é possível afirmar que a interação será maior na espécie em que o MOE também for maior. Neste estudo, entretanto, não foi possível observar variações significativas considerando-se a margem de erro das medidas, conforme ilustrado na TAB.9 e nas FIG. 31 e 32, especialmente por se tratar de amostras de materiais poliméricos de origem natural.

BEJO e DIVOS (2006) sugerem que o MOE de espécies de densidade menor diminui mais acentuadamente do que as de densidade maior. Em experiências realizadas por ambos, os dados experimentais mostraram que a dose necessária para a desinfestação por fungos não reduz significativamente o MOE.

A amostra de Cedro Rosa irradiada a 25 kGy apresenta 2% de aumento no MOE em relação à amostra não irradiada. Com 50 kGy é possível observar o aumento de 10% no módulo de elasticidade da amostra e, em 100 kGy, a amostra

não apresenta aumento significativo.

5.5 Ensaios de dureza

Na TAB.10 e nas FIG. 34 e 35, é apresentado o comportamento das espécies de madeira Cedro Rosa e Imbuia, no ensaio de dureza Janka.

TABELA 10 – Valores médios da dureza perpendicular às fibras das espécies de Cedro Rosa e Imbuia, irradiadas e não irradiadas

Doses de radiação (kGy)	Dureza (MPa)	
	Imbuia	Cedro Rosa
Não Irradiada	50,5 ± 1,7	32,2 ± 1,1
25	51,2 ± 2,2	34,5 ± 1,2
50	49,7 ± 0,9	37,0 ± 2,4
100	49,3 ± 0,8	35,2 ± 0,8

FIGURA 34 - Valores médios da dureza perpendicular às fibras da espécie Cedro Rosa irradiadas e não irradiadas

FIGURA 35 - Valores médios da dureza perpendicular às fibras da espécie Imbuia irradiadas e não irradiadas

As amostras de Cedro Rosa irradiada com 25 kGy, 50 kGy e 100 kGy apresentam o aumento médio de dureza de 7%, 15% e 9%, respectivamente, em relação a amostra não irradiada. Não existem dados na literatura que permitam a comparação com os obtidos neste trabalho (em relação a madeiras crescidas no Brasil).

5.6 Ensaio de cisalhamento

Na Tabela 11 e nas FIG. 36 e 37, são apresentados os dados experimentais de resistência ao cisalhamento das espécies de madeira Cedro Rosa e Imbuia, não irradiadas e submetidas à diferentes doses de irradiação.

TABELA 11 – Valores médios dos ensaios de resistência ao cisalhamento nas espécies de Cedro Rosa e Imbuia, irradiadas e não irradiadas

Doses de radiação (kGy)	Cisalhamento (MPa)	
	Imbuia	Cedro rosa
Não Irradiada	11,1 ± 0,5	8,1 ± 0,2
25	11,5 ± 0,4	7,9 ± 0,1
50	11,3 ± 0,3	8,1 ± 0,2
100	11,4 ± 0,4	7,9 ± 0,2

FIGURA 36 - Valores médios de resistência ao cisalhamento da espécie Cedro Rosa irradiadas e não irradiadas

FIGURA 37- Valores médios de resistência ao cisalhamento da espécie Imbuia irradiada e não irradiada

De acordo com os dados da TAB.11 e FIG. 36 e 37, é possível observar que a amostra de Imbuia quando irradiada a 25 kGy apresenta 3,4% de aumento na resistência ao cisalhamento em relação a amostra não irradiada. Já a espécie cedro-rosa, apresenta decréscimo de 2,5% na resistência ao cisalhamento.

Quando irradiadas com 50 kGy, a espécie Imbuia apresenta aumento de 2% de resistência ao cisalhamento. E, na amostra de Cedro Rosa não houve alterações significativas nesta dose de irradiação.

As amostras de Imbuia irradiadas a 100 kGy, apresentam 2,3 % de resistência ao cisalhamento superior. Já as amostras de Cedro Rosa apresentam o decréscimo de 2,5% de resistência ao cisalhamento.

5.7 Termogravimetria (TG)

Nas FIG. 38 a 48 são apresentados, as curvas de TG/DTG das duas espécies de madeiras Cedro Rosa e Imbuia não irradiadas e quando submetidas a diferentes doses de radiação (25 kGy, 50 kGy e 100 kGy). As curvas de variação

de massa em função da temperatura permitem a determinação quantitativa dos principais componentes presentes nas amostras. As curvas apresentadas referem-se a um único ensaio. Os dados das TAB.12 e 13 representam a média de variação de massa dos resultados obtidos com diferentes corpos-de-prova de cada amostra.

FIGURA 38 - Curvas TG/DTG da amostra de Imbuia não irradiada

FIGURA 26 - Curvas TG/DTG da amostra de Imbuia irradiada a 25 kGy

FIGURA 40 - Curvas TG/DTG da amostra de Imbuia irradiada a 50kGy

FIGURA 41 - Curvas TG/DTG da amostra de Imbuia irradiada a 100 kGy

FIGURA 42 - Curvas TG da espécie Imbuia não irradiada e irradiadas a 25 kGy, 50 kGy e 100 kGy

FIGURA 43 - Curvas TG/DTG da amostra de Cedro Rosa não irradiada

FIGURA 44 - Curvas TG/DTG da amostra de Cedro Rosa irradiada a 25 kGy

FIGURA 45 - Curvas TG/DTG da amostra de Cedro Rosa irradiada a 50 kGy

FIGURA 46 - Curvas TG/DTG da amostra de Cedro Rosa irradiada a 100 kGy

FIGURA 27 - Curvas TG da amostra de Cedro Rosa não irradiada e irradiadas a 25 kGy, 50 kGy e 100 kGy

FIGURA 48 – Curvas de TG das amostras de Cedro Rosa e Imbuia não irradiadas e irradiadas a 100 kGy

TABELA 12 - Perdas de massa da espécie Imbuia não irradiadas e irradiadas à 25 kGy, 50 kGy e 100 kGy

<i>Dose (kGy)</i>	<i>Compostos Voláteis (%)</i>	<i>Celulose + lignina (%)</i>
Não Irradiada	11 ± 1,0	89 ± 1,0
25	10 ± 0,5	87 ± 0,5
50	9 ± 1,2	86 ± 1,2
100	8 ± 0,8	86 ± 0,8

TABELA 13 - Perdas de massa da espécie Cedro Rosa irradiada à 25 kGy, 50 kGy, 100 kGy e não irradiadas

<i>Doses (kGy)</i>	<i>Compostos Voláteis (%)</i>	<i>Celulose + lignina (%)</i>
0	9 ± 1,5	85 ± 1,5
25	10 ± 1,0	87 ± 1,0
50	11 ± 0,8	87 ± 2,0
100	11 ± 0,9	86 ± 0,9

De acordo com COSTA, MARTINELLI e MATOS (2004), os fenômenos observados durante a decomposição térmica das espécies de madeiras são atribuídos à:

1. Evaporação da água: até 140 °C;
2. Formação de gases: ocorre entre 200 e 450 °C, com liberação máxima entre 350 e 400°C;
3. Formação de pirolenhoso: até cerca de 350°C, passando por um máximo entre 280 e 300°C;
4. Formação de alcatrão: ocorre entre 300 e 450°C;
5. Liberação de outros gases: acima de 400°C, principalmente gás carbônico

Ainda de acordo com os autores, esse comportamento é atribuído a mecanismos cinéticos de carbonização, onde os fatores tempo e temperatura influem diretamente na transferência de calor através da camada de carvão já formada, partindo-se da propagação do calor exterior pela superfície da serragem por condução, iniciando o processo de pirólise, seguido do movimento dos gases, por convecção, na direção oposta à transferência de calor, iniciando-se a formação do carvão, sem os componentes voláteis na estrutura.

Ratificando a afirmação citada por CAMPANELLA, TOMASSETI e TOMELLINI, (1991), o primeiro estágio de perda massa (da ordem de 9 a 12%) ocorre até cerca de 150°C e corresponde à eliminação de toda a umidade da

amostra. O segundo e terceiro estágios correspondem à degradação térmica oxidativa da celulose e da lignina da amostra de madeira e ocorrem entre 160°C e 400°C. A hemicelulose sofre degradação térmica em temperaturas de 200°C até cerca de 260°C. A degradação térmica da lignina inicia-se em torno de 200°C com as reações de desidratação. Até 300°C ocorre quebra das ligações α - β -aryl-alkyl-éter. Por volta desta temperatura, as cadeias laterais alifáticas começam a se separar dos anéis aromáticos. Finalmente, entre 370°C e 400°C, aproximadamente, ocorre quebra da ligação carbono-carbono entre as unidades estruturais da lignina.

A massa residual, medida em temperaturas mais altas que as discutidas acima, corresponde ao resíduo constituído por cinzas.

As faixas de temperatura em que ocorrem estes eventos dependem da atmosfera que envolve a amostra durante o processo de pirólise (oxidante, inerte ou redutora), da massa de amostra e da razão de aquecimento.

Conforme pode ser observado nas FIG. 42 e 47, a irradiação não promove alterações na estabilidade térmica das amostras estudadas.

6 CONCLUSÕES

A observação dos resultados dos ensaios realizados permite concluir que, na faixa de dose estudada entre 25 e 100 kGy, não há alterações significativas nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas das espécies de madeiras investigadas.

A técnica de irradiação com raios gama provenientes de fonte de cobalto-60 mostrou-se eficiente como uma alternativa para repetidos tratamentos de desinfestação e descontaminação de bens culturais móveis à base de madeiras, especificamente Cedro Rosa (*Cedrella fisillis*) e Imbuia (*Ocotea porosa*), por não causar danos aos materiais na faixa de dose estudada. O processo de preservação e conservação não impede a reinfestação do material. Mesmo considerando-se que a dose absorvida é cumulativa, os resultados obtidos permitem afirmar que as madeiras investigadas terão suas características iniciais preservadas ainda que os objetos infestados sejam submetidos a repetidos processos de irradiação.

7 SUGESTÕES DE TRABALHOS COMPLEMENTARES

Estudo do efeito da radiação gama sobre:

- peças de madeira revestidas em policromia;
- cola de cartilagem de coelho e de osso de boi usadas na aderência da folha de ouro à madeira;
- a variação de cor das tintas usadas no acabamento de obras de arte em madeira;
- a resistência ou degradação de vernizes usados na proteção ou embelezamento de peças de madeiras;
- a cura de resinas impregnadas para manutenção da forma de peças atacadas por pragas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTOINE, R. C.; VAN EYSEREN, J. C. Intérêt des rayons γ dans le pritratment des bois en vue de leur analyse au microscope à balayage [Microscopic studies of wood after gamma radiation]. C.R. **Acad. Sc. Sér. B**, v. 272, p.308-309, 1971 [in French].

AQUINO, S. **Efeitos da radiação gama no crescimento de aspergillus flavus produtor de aflatoxinas e no emprego da técnica. da reação em cadeia da polimerase (PCR) em amostra de milho inoculados artificialmente.** 2003. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projetos de estruturas e madeira.** Rio de Janeiro: ABNT, 1997. (NBR 7190).

BEJO, L.; DIVOS, F. The effect of gamma irradiation on the MOE of various species. **Wood Sci Technol**, v. 40, p. 87–93, 2006.

BETTINI, S.H.P. **Estudo do efeito da radiação gama sobre as propriedades de blendas baseadas em polipropileno isotático.** 1992. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BHUIYAN, M.T.R.; HIRAI, N.; SOBUE, N. Effect of intermittent heat treatment on crystallinity in wood cellulose. **J. Wood Sci.**, v. 47, p. 336-341, 2001.

BOLT, R.O.; CARROL, J.G. **Radiation effects on polymers.** London: Elsevier Applied Science, 1991.

BRAGA, M. **Conservação e Restauro.** Rio de Janeiro, R.J.: Editora Rio, 2003.

BRAZOLIN, S. **Podridão em madeira mole de Tebebuia SP (ipê) em torres de resfriamento de água: identificação e avaliação da capacidade de degradação dos fungos e alterações na estrutura anatômica na madeira.** 1998. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba.

CALIL JR, C.; LAHR, F.A.R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira.** Barueri: Manole, 2003.

CAMPANELLA, L.; TOMASSETTI, M.; TOMELLINI, R. **J. Therm. Anal.**, v. 37, p. 1923-1932, 1991.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira.** Colombo, P.R.: EMBRAPA-CNPQ/SPI, 1994.

CASSENS, D.L. ***Selection and use of preservative: treated wood***. Madison: Forest Product Society, 1995.

COSTA, T. M. S.; MARTINELLI, J. R.; MATOS, J. R. Análise térmica aplicada a estudos de ecoeficiência do bambu para processos de carbonização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. 2004.

CURLING, S.; CLAUSEN, C.; WINANDY, J.; JERROLD, E. Comparison of the effects of gamma irradiation and steam sterilization on southern pine sapwood. ***For. Prod. J.***, v. 58, p. 87-90, 2008.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedade de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. ***Sci. florest.***, n.65, p. 102-113, 2004.

DORE, S. ***A Radiação ionizante: palestra introdutória: curso de física***. Disponível em: <<http://omnis.if.ufrj.br/dore.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2008.

FENGEL, D.; JAKOB, H.; STROBEL, C. Influence of the alkali concentration on the formation of cellulose II: study by X-ray diffraction and FTIR spectroscopy. ***Holzforsch.***, v. 49, p. 505-511, 1995.

FENGEL, D.; WEGNER, G. ***Wood: chemistry, ultrastructure, reactions***. New York, N.Y.: Walter de Gruyter, 1989.

FREITAG, C.M.; MORRELL, J.J. Use of gamma radiation to eliminate fungi from wood. ***For. Prod. J.***, v. 48, 1998.

FERRO, W. P. ***Estudo do efeito da radiação ionizante nas propriedades da poliamida 6,6 com e sem reforço de fibra de vidro***. 2003. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

GONZAGA, A. L. ***Madeira: uso e conservação***. Brasília, DF: IPHAN/MONUMENTA, 2006. Cadernos técnicos.

HELLMEISTER, J. C. ***Sobre a determinação das características físicas das madeiras***. 1973. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

<http://www.arc-nucleart.fr> - Acesso em 17/08/2007.

<http://www.unb.br/cedoc/conservação.htm> - Acesso em 15/07/2009

http://www.apcpragas.com/descupinizacao_clip_image007.jpg - Acesso em 08/03/2010.

<http://www.static.hsw.com.br/gif/termite-1.jpg> - Acesso em 10/03/2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - DIVISÃO DE MADEIRAS. ***Madeira: O que é e como pode ser processada e utilizada***. São Paulo, Boletim da Associação Brasileira de Preservadores de Madeira, 189p. 1985.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – ***Biodeterioração de madeiras em edificações***. São Paulo, Manual, 49p. 2001.

KHAN, F. ***Macromol. Biosci.*** v.5,p.78-89, 2005,.

KIRCHER, J.F.; BOWMAN, R.E. ***Effects of radiation on materials and components***. New York, N.Y.: Reinhold Publishing Corporation, 1964.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B.; HERNANDEZ, J.A.; ANDRADE, A.S. ***Química da madeira***. 3ª ed. Curitiba, 2005. Apostila.

KLIMENTOV, A.S.; MJAGKOSTUPOVA, V. P. Studies of wood irradiative destroyed. Research of chemical content of larch wood exposed on gamma radiation. ***Khimia Drev.***, v.4, p. 95-97, 1991.

LARA, F. M. ***Princípios de Entomologia***. 3. ed. São Paulo, S.P.: Ícone, 1992.

LELIS, A. T.; MONTEIRO, M. B. B. ***Atuação do IPT no diagnóstico e controle da biodeterioração de bens culturais***. In: LATIN AMERICAN BIODETERIORATION SYMPOSIUM, 1992, Campos do Jordão, SP.

LELIS, A. T. ***Biodeterioração de madeiras em edificações***. São Paulo, S.P.: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2001.

LEMOS, C. A. C. ***Alvenaria burguesa***. São Paulo, S.P.: Nobel, 1985.

LEPAGE, E. S. ***Manual de preservação de madeiras***, vol. 2. São Paulo: IPT, 1986.

MAGUDDA, G. The recovery of biodeteriorated books and archive documents trough gamma radiation: some considerations on the results achieved. ***J. Cult. Herit.***, v. 5, p. 113-118, 2004.

MAINIERI, C.; CHMELO, J. P. ***Fichas de características das madeiras brasileiras***. São Paulo: IPT, 1989. 41p. (IPT - Publicação, 1791).

MACHADO, L. D. B.; MATOS, J. R. ***Análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial***. In: Canevarolo Junior Sebastião V. (Org.). Técnicas de Caracterização de Polímeros. São Paulo: Artliber Editora Ltda. / convênio ABPol, , v. 1, p. 229-261, 2004.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. 3. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2003.

MAO J.; K. HOLTMAN, M.; SCOTT, J.T.; KADLA, J.F.; SCHMIDT-ROHR K. Differences between lignin in unprocessed wood, milled wood, mutant wood, and extracted lignin detected by ^{13}C solid-state NMR. **J. Agric. Food Chem.**, v. 54, pp. 9677-9686, 2006.

MORAIS, S.A.L; NASCIMENTO, E.A.; MELO, D.C. Análise da madeira de Pinus oocarpa: parte I: estudo dos principais constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Rev. Árvore**, v. 29, n.3, 2005.

MORALES, E. A. M. **Propriedade mecânicas da madeira**. Universidade Estadual Paulista, UNESP, 2007. Apostila.

NIEVES, V; GARCIA,R. **Arbor CLXIV**, 645 (Septiembre 1999), 85-107 pp.

O'DONNELL, J.H.; SANGSTER, D.F. **Principles of radiation chemistry**. New York, N.Y.: Arnold E., 1970.

PANSHIN, A.J; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York, N.Y.: McGraw-Hill, 1980.

PANSHIN, A.J; DE ZEEUW, C.; BROW, H.P. **Textbook of technology**, v. 1. 2 ed. New York, N.Y.: McGraw Hill Book Company, 1964.

QUENSANGA, A., PICARDS, C. Thermal degradation of sugar cane bagasse. **Thermochim. Acta**, v.125, p.89-97, 1988.

RAWISTSCHER, F. **Elementos Básicos de Botânica**. 4ª. ed. São Paulo: Editora Centro Universitário, 1964.

REGO, S.S.; SANTOS, A.F.; MEDEIROS, A.C.S.; JACCOUD FILHO, D.S. Fungos associados a frutos e sementes de Imbuia (Ocotea porosa Ness. L. Barroso). **Summa Phytopathol.**, n. 34, pp. 378, 2008.

REITZ, R.; KLEIN, R.M.; REIS, A. **Projeto Madeira do Rio Grande do Sul**. Itajaí, S.C.: Sellowia, v. 34/35, n. 34/35, 1983. Anais Botânicos do Herbário Barbosa Rodrigues.

RICHARDSON, A.B. **Wood preservation**. New York: Logman. 1978.

RIZZO, M. M., MACHADO, L. D. B., BORRELY, L. I., SAMPA, M. H., RELA, P. R., FARAH, J. S., SCHUMACHER, R. I. Effects of gamma rays on a restored painting from the XVII century, **Radiat. Phys. Chem.** v.3 p. 259-262, 2002.

RIZZINI, C.T. **Árvores e madeiras úteis do Brasil**: manual de dendrologia brasileira. São Paulo, S.P.: Edgard Blücher, 1981.

SEGAL, L.; CREELY, J.J.; MARTIN, J.R.; CONRAD, C. M. An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer. **Tex. Res. J.**, v. 29, p. 786-794, 1959.

LEVAN, S.L., In: SCHNIEWIND, P. Arno, Ed. **Concise Encyclopedia of Wood & Wood-based materials**. NY: Pergamon Press: 271-273, 1989.

SERPA, F.G., **Cupim uma ameaça a Olinda, patrimônio da humanidade**. São Paulo. Boletim da Associação Brasileira de Preservadores de Madeira, nº40: 8p. 1986.

SCHNIEWIND, A. P. **Concise encyclopedia of wood & wood-based material**, Pergamon Press, Elmsford & USA, 1995.

SIMPSON, W.; TENWOLDE, A. **Physical properties and moisture relations of wood**. In: Forest Products Laboratory, USDA Forest Service. Wood handbook: wood as engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, 1999. pp. 3-7.

SILVA, M., A. M. L. MORAES, M. M. NISHIKAWA, M. J. A. GATTI, M. A. V. ALENCAR, L. E. BRANDÃO, A. NÓBREGA, Inactivation of fungi from deteriorated paper materials by radiation, **Int. Biodeterioration & Biodegradation**, 57, p. 163-167, 2006.

SISMAN, O.; BOPP, C.D. A summary of the effect of radiation on some plastics and elastomers. In: PACIFIC AREA NATIONAL MEETING, vol. 1, September 20, 1956, Philadelphia. Symposium on radiation effects on materials. Baltimore: ASTM, 1957. p. 119-129.

SOKIRA, A.N.; BELASHEVA, T.P. Effect of gamma-radiation on the physicochemical and technological properties of viscose celluloses. **Fibre Chem.**, v. 24, p. 63-66, 1992.

SPINKS, J.W.T. **Introduction to radiation chemistry**. 3 ed. New York, N.Y.: John Wiley Sons, 1999.

STAUM, A.J. **Wood and Cellulose Science**. New York, N.Y.: The Ronald Press Company, 1964.

STRANG, T. The effect of thermal methods of pest control on museum collections. Preprints, International conference on biodeterioration of cultural property. The organising committee of ICBCP-3. Bangkok. (1995): 199-218.

TOMAZELLO, M. G. C. F. M. WIENDL, The applicability of gamma radiation to the control of fungi in naturally contaminated paper, **Restaurator**, 16, p. 83–99 (1995).

TONIN, G.A.; PEREZ, S.C.J.G.A. Qualidade fisiológica de sementes de *Ocotea porosa* (Nees et Martius ex. Nees) após diferentes condições de armazenamento e semeadura. **Rev. Bras. Sementes**, n. 28, pp. 26-33, 2006.

VAN BEEK, T.A.; KUSTER, B.; CLAASSEN, F.W. TIENVIERI, T.; BERTAUD, F.; LENON, G.; PETIT-CONIL, M.; SIERRA-ALVAREZ, R. Fungal bio-treatment of spruce wood with treatments versicolor for pitch control: Influence on extractive contents, pulping process parameters, paper quality and effluent toxicity. **Bioresour. Technol.**, v. 98, p. 302- 311, 2007.

XU, P., L. DONALDSON, L.A., GERGELY Z. R., STAEHELIN, L. A. “Dual-axis electron tomography: a new approach for investigating the spatial organization of wood cellulose microfibrils”, **Wood Sci. Technology**, 41, p. 101-116 (2006).