

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Fabiano Edson Carlos

Um critério de resistência e de degradação para madeiras

Aplicação ao Museu Aeroespacial

Trabalho de Graduação

2011

# Civil

Fabiano Edson Carlos

**Um critério de resistência e de degradação para madeiras**  
**Aplicação ao Museu Aeroespacial**

Orientador  
Francisco Alex Correia Monteiro (ITA)

**Divisão de Engenharia Civil**

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2011

#### **Divisão de Informação e Documentação**

Carlos, Fabiano Edson

Um critério de resistência e de degradação para madeiras: aplicação ao caso do Museu Aeroespacial/Fabiano Edson Carlos  
São José dos Campos, 2011.  
39f.

Trabalho de Graduação – Divisão de Engenharia Civil –  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2011. Orientador: Prof. Francisco Alex Correia Monteiro

1. Estruturas de madeira; 2. Resistência residual; 3. degradação; 4. Estudo de casos; 5. Engenharia civil;  
I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

#### **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

CARLOS, FABIANO EDSON. **Um critério de resistência e de degradação de madeiras: aplicação ao Museu Aeroespacial**. 2011. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos

#### **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Fabiano Edson Carlos

TÍTULO DO TRABALHO: Um critério de resistência e de degradação de madeiras: aplicação ao Museu Aeroespacial

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação/2011

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

---

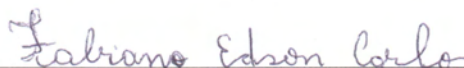
Fabiano Edson Carlos

Avenida Ulisses Bezerra, 170 – Cidade dos Funcionários  
Fortaleza – CE – Brasil. CEP: 60822-490

# UM CRITÉRIO DE RESISTÊNCIA E DE DEGRADAÇÃO PARA MADEIRAS

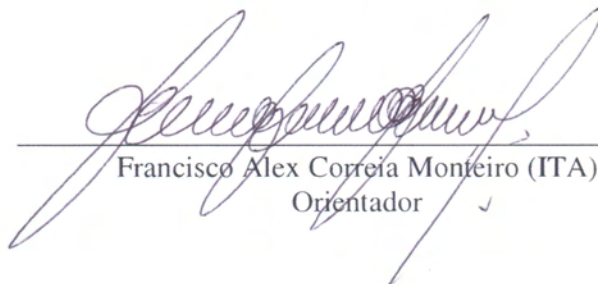
## APLICAÇÃO AO MUSEU AEROESPACIAL

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



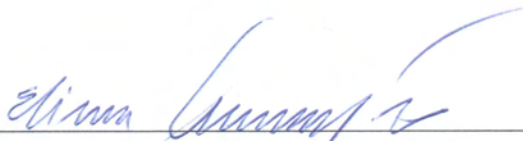
Fabiano Edson Carlos

Autor



Francisco Alex Correia Monteiro (ITA)

Orientador



Prof. Ph.D. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 21 de novembro de 2011

# Resumo

A madeira é um dos mais tradicionais materiais da indústria da construção civil e sua resistência está sujeita à degradação por diversas patologias, entre elas o cupim. Para a verificação da resistência, a norma brasileira baseia-se na teoria da máxima tensão. Entretanto, segundo a literatura, a teoria de Tsai-Wu é a que melhor se adequa à tarefa. A resistência de madeiras sob ataque de cupins é tratada de maneira simplificada na prática, devido à escassez de dados de laboratório. Nesse contexto, o trabalho traz uma comparação do critério de resistência preconizado pela norma brasileira com uma versão adaptada do critério de Tsai-Wu para uma peça íntegra de *Aspidosperma Polyneuron* (peroba-rosa), e curvas de ensaio que estimam a resistência residual da peroba-rosa sob ataque de cupins para diferentes níveis de degradação.

# Abstract

Wood is one of the most traditionally used material in civil buildings, and its resistance is affected by several pathologies, including termites. To verify the resistance of wood structures, the Brazilian design code bases on the maximum stress theory. According to recent works, the Tsai-Wu theory appear to be more appropriated to this task. The resistance of wood attacked by termites is generally modeled in a simplified manner, due to lack of appropriated experimental data. The present work compares the Brazilian design code criteria with the Tsai-Wu's ones for different degradation levels and brings some experimental data that estimate the residual resistance of *Aspidosperma Polyneuron* (peroba-rosa) under termite's pathology and compare the Brazilian design code criteria with an adapted Tsai-Wu formulation.

# Agradecimentos

Aos meus pais, que sempre proveram educação de alto nível aos seus filhos.

Aos meus amigos, pelos momentos importantes ao longo dos seis anos no ITA.

Ao orientador Francisco Alex Correia Monteiro e ao relator Flávio Mendes Neto pelo papel de guiar o desenvolvimento deste Trabalho.

À Diretoria de Engenharia da Aeronáutica, pela oportunidade de estágio na área de análise estrutural.

# Conteúdo

|          |                               |           |
|----------|-------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Considerações Iniciais</b> | <b>9</b>  |
| 1.1      | Introdução .....              | 9         |
| 1.2      | Motivação .....               | 14        |
| 1.3      | Objetivo .....                | 16        |
| 1.4      | Estrutura do Trabalho .....   | 16        |
| <b>2</b> | <b>Resistência</b>            | <b>17</b> |
| 2.1      | Norma Brasileira .....        | 19        |
| 2.2      | Tsai-Wu .....                 | 21        |
| 2.3      | Comparação .....              | 23        |
| <b>3</b> | <b>Degradação</b>             | <b>25</b> |
| 3.1      | Confecção das Amostras .....  | 25        |
| 3.2      | Curvas de Degradação .....    | 28        |
| <b>4</b> | <b>Aplicação</b>              | <b>31</b> |
| 4.1      | Metodologia Tradicional ..... | 34        |
| 4.2      | Metodologia Proposta .....    | 35        |
| <b>5</b> | <b>Conclusão</b>              | <b>37</b> |
|          | <b>Referências</b>            | <b>38</b> |

# Capítulo 1

## Considerações Iniciais

Este trabalho é fruto no estágio realizado na Diretoria de Engenharia da Aeronáutica – DIRENG, no qual um projeto de restauração e de conservação estrutural da cobertura de madeira dos hangares do Museu Aeroespacial – MUSAL foi desenvolvido.

### 1.1 Introdução

A madeira é um dos mais tradicionais materiais da indústria da construção civil. É um material de natureza biológica, proveniente do corte de troncos de árvores. Classifica-se como *dura* (folhosa) ou *macia* (resinosa) de acordo com a espécie de sua semente (RODRIGUES, 2004).

As árvores de sementes dura pertencem ao grupo das dicotiledôneas (divisão das angiospermas) e se caracterizam por ser de crescimento lento, ter folhas alargadas e achatadas. Desse grupo fazem parte: a peroba, o ipê, a aroeira, o carvalho e o castanho. As árvores de sementes macia pertencem ao grupo das coníferas (divisão das gimnospermas) e se caracterizam por ser de crescimento rápido e ter folhas verdes agulhadas. Fazem parte desse grupo o pinheiro e o eucalipto.

A norma brasileira para projeto de estruturas de madeira é a NBR 7190 (1997). Ela fixa as condições gerais que devem ser seguidas no projeto, na execução e no controle das estruturas correntes de madeira, tais como pontes, pontilhões, coberturas, pisos e cimbres. Por simplicidade, convencionou-se neste trabalho referir-se à norma brasileira para projeto de estruturas de madeira apenas por norma.

**Tabela 1.1** Classes de umidade.

| Classe | Umidade relativa<br>do ambiente ( $U_{amb}$ ) | Umidade de equilíbrio<br>da madeira ( $U_{eq}$ ) |
|--------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1      | $\leq 0,65$                                   | 0,12                                             |
| 2      | $> 0,65$ e $\leq 0,75$                        | 0,15                                             |
| 3      | $> 0,75$ e $\leq 0,85$                        | 0,18                                             |
| 4      | $> 0,85$                                      | $\geq 0,25$                                      |

As principais propriedades físicas das madeiras de construção são:

- **Teor de água:** razão entre a massa de água e a massa das fibras. É uma quantidade que está relacionada com a troca de água da madeira com o ambiente: quanto maior a umidade relativa do ambiente  $U_{amb}$ , maior o teor de água da madeira. No equilíbrio dinâmico da troca de umidades, o teor de água presente na madeira é cunhado *umidade de equilíbrio*  $U_{eq}$ . A norma quantifica quatro classes de umidade de equilíbrio conforme apresenta a Tabela 1.1. Diz-se que a madeira é verde se a umidade de equilíbrio é  $\geq 0,25$ .
- **Densidade aparente:** razão entre a massa e o volume da peça medida na umidade relativa do ambiente  $U_{amb}$ .
- **Densidade padrão:** razão entre a massa e o volume da peça medida na umidade de equilíbrio  $U_{eq} = 0,12$ .
- **Durabilidade natural:** medida da resistência natural aos agentes *xilófagos* (seres vivos que se alimentam de fibras do material). As madeiras duráveis apresentam as seguintes características: alta densidade, baixo teor de água, poros fechados, alto teor de substâncias tóxicas (taninos, resinas e gomas, por exemplo), elevada concentração de anéis se a madeira é macia, baixa concentração de anéis se a madeira é dura (anéis são as fibras produzidas anualmente em torno do eixo do tronco).
- **Retração/Inchamento:** define a variação de volume devido à diminuição/aumento do teor de água. Quanto maior o teor de água, maior o volume.



**Figura 1.1** Nó em peça de madeira.

- **Comportamento ortotrópico:** o comportamento físico é próximo à hipótese de ser um material homogêneo, ortotrópico e elástico linear desde que na ausência de *defeitos* e de *patologias*. A presença de defeitos acarreta anisotropia local e degrada a resistência do material. Por sua vez, as patologias levam à perda de homogeneidade e de resistência.

Considera-se que as propriedades físicas permaneçam inalteradas ao longo da vida útil da edificação, não havendo, portanto, fluência nem relaxação do material.

Segundo QUOIRIN (2004) e SANTOS (2007) os principais defeitos da madeira são:

- nó: porção de formato cônico da base do ramo que insere-se perpendicularmente às fibras do tronco (Figura 1.1);
- fio inclinado: porção de fibras inclinadas, com relação ao eixo do tronco, oriunda de anomalias do crescimento (Figura 1.2);
- fenda: descontinuidade no feixe de fibras (Figura 1.3).

As patologias da madeira se originam da ação de agentes externos ao longo da vida útil da estrutura, e resultam na degradação do material. Tais patologias podem ser de natureza *estrutural*, *físico-química* e *biológica* (FIGUEROA, 2010; CRUZ, 2001).



**Figura 1.2** Árvore com fio inclinado.



**Figura 1.3** Fenda da seção transversal.

A patologia de natureza estrutural deve-se a erros na escolha/extração do material, no projeto/execução da obra (RODRIGUES, 2004). Por exemplo, uma falha de extração típica é o corte em ângulos não paralelos às fibras do tronco. Durante o projeto e a execução da obra deve-se evitar:

- pilares apoiados diretamente sobre o solo;
- paredes mal niveladas;
- emprego de peças esbeltas;
- assimetrias estruturais;
- infiltrações na cobertura;
- má circulação de ar no pavimento.

As patologias típicas de natureza físico-química devem-se ao intemperismo, resultando na alteração de cor e textura da superfície do material (FIGUEROA, 2010). Trata-se, portanto, de uma degradação estética. Entretanto, a ação da umidade e da radiação solar podem favorecer ataques por agentes biológicos.

A patologia de natureza biológica deve-se à ação de organismos xilófagos (ELEOTÉRIO, 2000). No Brasil, os principais agentes xilófagos são os *fungos*, as *térmitas subterrâneas* e os *cupins de madeira seca*.

Os fungos xilófagos são constituídos por um corpo vegetativo e se propagam por meio de esporos (RODRIGUES, 2004). Sua proliferação normalmente ocorre em ambientes escuros e úmidos para temperaturas entre 25°C e 30°C (FIGUEROA, 2010). A ação dos fungos é facilmente detectada pela perda de peso e de resistência da madeira, bem como por alterações típicas de coloração e de aspecto (CRUZ, 2001). As peças mais susceptíveis à ação dos fungos são aquelas em contato com paredes úmidas, áreas molhadas e solo (FIGUEROA, 2010).

As térmitas subterrâneas são insetos que vivem em ninho subterrâneo. Sua ação lamina internamente a madeira. Há dificuldades para seu diagnóstico, pois o principal sintoma de sua atividade é a presença de canais sob as paredes da edificação que levam ao ninho (CRUZ, 2001).

Por fim, os cupins de madeira seca são insetos sociais que vivem em colônias, cujo ninho é na própria peça. Sua ação é de natureza lenta comparada com a das térmitas. Os cupins

abrem galerias internas que se conectam a pequenos orifícios externos para aeração e despejo de excrementos. É a partir desses resíduos que se dá o diagnóstico. A resistência da peça é deteriorada pela rede de galerias.

De acordo com a norma (item 4.2.2), a resistência da madeira traduz-se na aptidão do material no suporte de tensões. A resistência é determinada convencionalmente pela máxima tensão que pode ser aplicada a corpos-de-prova isentos de defeitos, até a ruptura ou deformação excessiva do corpo. Levando-se em conta o comportamento ortotrópico das madeiras de construção, trabalha-se no projeto estrutural com os seguintes parâmetros básicos de resistência (DANIEL e ISHAI, 1994):

- $F_{1t}$  – resistência à tração paralela às fibras;
- $F_{1c}$  – resistência à compressão paralela às fibras;
- $F_{2t}$  – resistência à tração normal às fibras;
- $F_{2c}$  – resistência à compressão normal às fibras;
- $F_v$  – resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

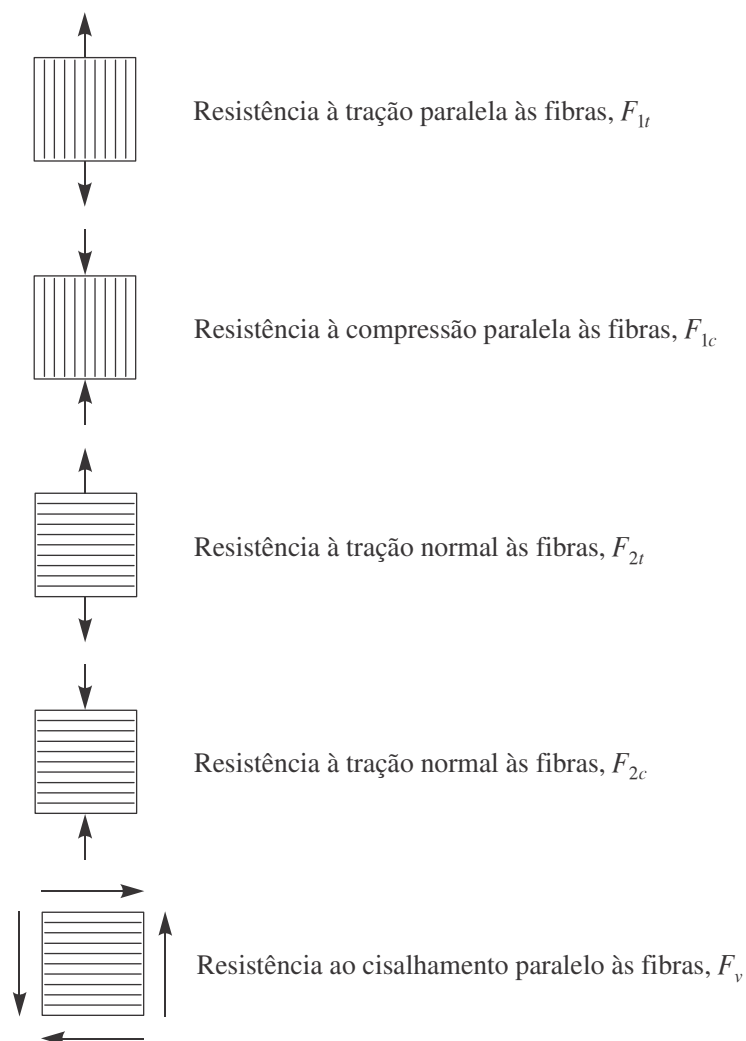
A Figura 1.4 esquematiza os parâmetros básicos de resistência.

O critério de dimensionamento da norma (item 7.3) baseia-se na *teoria da máxima tensão*, segundo a qual a falha por ruptura ocorre quando uma componente principal de tensão excede o parâmetro de resistência correspondente. Não há interação entre as componentes de tensão na avaliação da resistência. É um critério aplicável a materiais frágeis, cujo emprego é inconveniente pelo caráter ortotrópico da madeira (DANIEL e ISHAI, 1994).

Um critério de resistência compreensivo e fisicamente consistente é o que se baseia na teoria tensor-polinomial interativa, também denominada *teoria de Tsai-Wu*. Estudos têm aplicado o critério de Tsai-Wu às estruturas de madeira na busca de um melhor entendimento das propriedades elásticas e de resistência das madeiras de construção (VANALLI, 2004; NICOLAS, 2006; TODESCHINI, 2009).

## 1.2 Motivação

De acordo com o Sistema de Gerenciamento do Patrimônio Histórico da Aeronáutica (SIG-PIMA), em maio de 2011 a Força Aérea Brasileira (FAB) detém um total de 492 (quatro-



**Figura 1.4** Parâmetros de resistência.

centos e noventa e dois) hangares. Desses, 79 (setenta e nove) têm a estrutura da cobertura em madeira. A falta de manutenção e de monitoração adequados tornam os hangares da FAB presas fáceis de patologias. Para saná-las fazem-se necessárias intervenções estruturais que, na prática, costumam ocorrer apenas após a deterioração e a perda da funcionalidade de parte da estrutura, isto é, após um estado limite estrutural (definido no item 4.2.2 da norma) ter sido atingido!

Uma patologia frequente nos hangares de madeira no Brasil é a infestação por cupim (FIGUEROA, 2010). A Figura 1.5a mostra a estrutura de madeira de um dos cinco hangares do MUSAL, no qual uma de suas tesouras foi atacada por cupins (Figura 1.5b). A solução corriqueira dessa patologia é de natureza trivial: substitui-se a estrutura antiga por outra

nova (geralmente de aço). É uma solução de elevado custo material e patrimonial histórico.

Uma solução não trivial é possível desde que a resistência atual da estrutura seja mensurável. Entretanto, não há um procedimento padrão que quantifique a resistência de peças de madeira atacadas por cupim. A motivação do trabalho insere-se nesse contexto.



**Figura 1.5** Estrutura do MUSAL: (a) cobertura; (b) tesoura atacada por cupim.

## 1.3 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivos: (i) comparar o critério de resistência para madeira íntegra preconizado pela norma brasileira com o critério de Tsai-Wu; (ii) estimar o grau da redução de resistência da peroba-rosa sob ataque de cupim.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em cinco capítulos. O Capítulo 2 compara o critério de resistência da NBR 7190 (1997) com o critério de Tsai-Wu, considerando a madeira íntegra. O Capítulo 3 traz curvas, obtidas experimentalmente, que estimam a redução da resistência da madeira sob ataque de cupins. O Capítulo 4 aplica o critério de Tsai-Wu e as curvas de degradação propostas para uma viga analisada do MUSAL. Por último, o Capítulo 5 traz alguns comentários e conclusões, além de sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Resistência

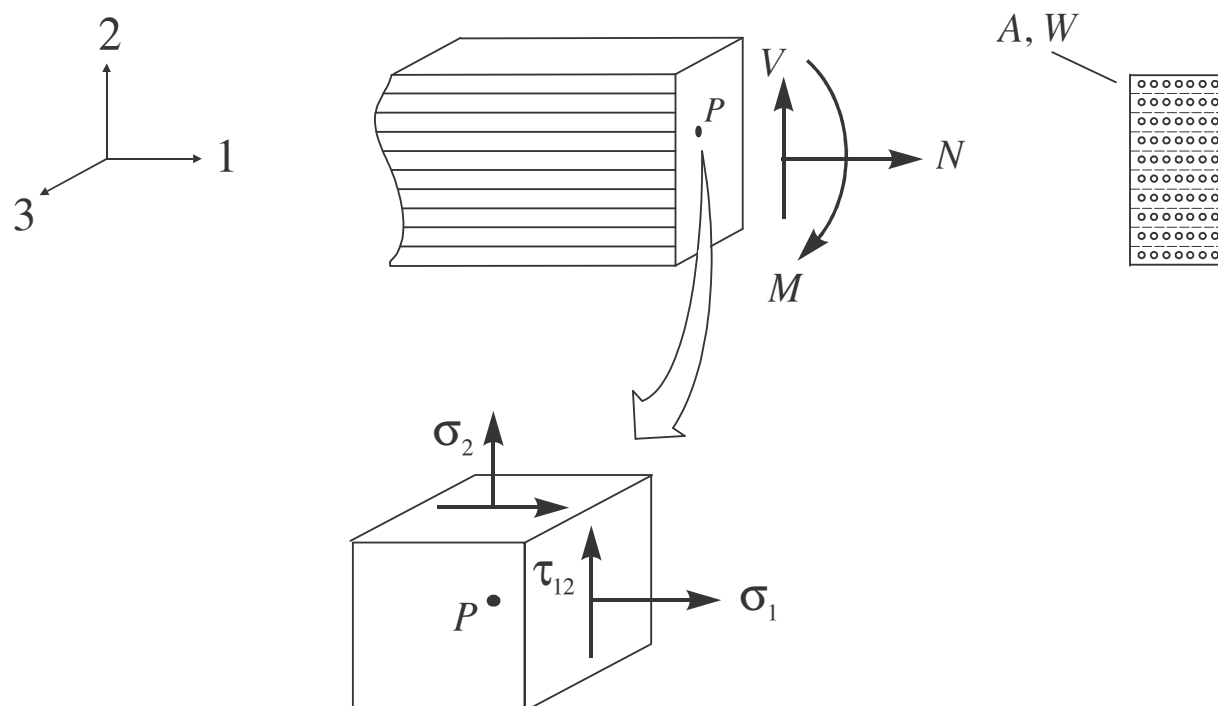
Seja a peça de madeira da Figura 2.1 sujeita às tensões generalizadas da flexão normal composta da teoria clássica de vigas (sentido positivo indicado na figura): força normal  $N$ , momento fletor  $M$  e força cortante  $V$ . A seção transversal da peça tem área de seção retangular  $A$  e módulo de resistência elástico  $W$ . Considera-se, por simplicidade, que todos os pontos da seção transversal estão sujeitos a um estado plano de tensões referido ao sistema cartesiano principal 123, conforme esquematizado na figura; e que as fibras da peça estão dispostas ao longo da direção 1 do material.

As componentes não nulas do tensor de tensões  $[\sigma]$  de um ponto genérico  $P$  da seção transversal podem ser agrupadas vetorialmente (DANIEL e ISHAI, 1994), segundo a notação de Voight, na forma

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \tau & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \tau \end{bmatrix}^T \quad (2.1)$$

onde  $\sigma_1$  é a componente normal do tensor de tensões na direção 1 do material,  $\sigma_2$  é a componente normal do tensor na direção 2 do material, e  $\tau$  é a componente de cisalhamento contida no plano principal 12.

Pode-se considerar que a seção transversal de uma peça de madeira é composta por camadas de fibras do material que se sobrepõem umas às outras, conforme esquematizado na Figura 2.1. A ruína da peça ocorre após a falha sucessiva de suas fibras. Entretanto, é usual no projeto considerar conservativamente que a falha da primeira camada dita a resistência da peça.



**Figura 2.1** Peça de madeira sujeita à flexão normal composta.

A norma toma como referência os esforços da teoria clássica de vigas, e a eles associa diferentes resistências de projeto. A influência da componente  $\sigma_2$  na determinação dos esforços e no cálculo da resistência é desconsiderada, pois  $\sigma_2 = 0$  na teoria de vigas.

O critério de dimensionamento da norma brasileira baseia-se na *teoria da máxima tensão*, segundo a qual a falha por ruptura ocorre quando uma componente principal de tensão excede o parâmetro de resistência correspondente. Não há interação entre as componentes de tensão na avaliação da resistência. É um critério inconveniente e que envolve poucos parâmetros de ensaio. Um critério de resistência de cunho geral, matematicamente consistente, fisicamente compreensível e que envolve vários parâmetros de ensaio foi proposto por TSAI e WU (1971). O critério lida com materiais de natureza anisotrópica e superfícies de resistência no espaço de tensões. O cálculo da resistência leva em conta a interação entre as diversas componentes de tensão por meio de uma única equação escalar, cuja expressão envolve componentes de quantidades tensoriais de segunda e de quarta ordem. É um critério invariante sob transformações de mudanças de coordenadas.

A adaptação da teoria de Tsai-Wu para a aplicação em materiais ortotrópicos é uma tarefa direta e depende apenas de ensaios laboratoriais para a caracterização do material

(DANIEL e ISHAI, 1994). TODESCHINI (2009) estuda uma adaptação do critério para as madeiras de construção e valida-a por meio de ensaios uniaxiais e biaxiais de compressão.

Dado que a norma emprega um critério de resistência fisicamente inconsistente para a madeira, pergunta-se: qual a diferença entre as resistências preconizadas pela norma com a teoria de Tsai-Wu? Para responder a essa pergunta, apresentam-se a seguir ambos os critérios de resistência e faz-se, por fim, uma comparação entre eles para uma peça íntegra de peroba-rosa sujeita a um estado plano de tensões.

## 2.1 Norma Brasileira

A norma toma como referência a teoria clássica de vigas para o cálculo de tensões, a teoria da máxima tensão para a avaliação da resistência e estabelece as rupturas por *flexotração*, *flexocompressão* e *cisalhamento longitudinal* como estados limites últimos associados à flexão normal composta.

No que diz respeito à teoria clássica de vigas, a distribuição de tensões na seção transversal da Figura 2.1 é tal que

- a componente normal  $\sigma_1$  é máxima nas fibras extremas:

$$\sigma_1 = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} = \sigma_{1,m} + \sigma_{1,b} \quad (2.2)$$

onde  $\sigma_{1,m}$  é a parcela de membrana e  $\sigma_{1,b}$  é a parcela de flexão ( $\sigma_{1,b} > 0$  se  $\sigma_{1,m} > 0$ ,  $\sigma_{1,b} < 0$  se  $\sigma_{1,m} < 0$ );

- a componente  $\sigma_2$  é nula:

$$\sigma_2 = 0; \quad (2.3)$$

- a componente de cisalhamento  $\tau$  é máxima nas fibras centrais:

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{V}{A}. \quad (2.4)$$

No que diz respeito a teoria da máxima tensão, a ruptura de uma camada ocorre quando o nível da componente normal e da componente de cisalhamento atingem os respectivos valores de resistência. A falha global da peça ocorre logo após a ruptura da primeira camada, ou após a ruptura sucessiva de duas ou mais camadas. Seguindo essa teoria, as condições de

segurança quanto aos estados limites últimos estabelecidas pela norma são expressas pelas desigualdades

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_{1,m}}{F_{1t}} + \frac{|\sigma_{1,b}|}{F_{1t}} &\leq 1 && \text{(flexotração, item 7.3.5)} \\ \frac{\sigma_{1,m}^2}{F_{1c}^2} + \frac{|\sigma_{1,b}|}{F_{1c}} &\leq 1 && \text{(flexocompressão, item 7.3.6)} \\ \frac{|\tau|}{F_v} &\leq 1 && \text{(cisalhamento longitudinal, item 7.4.1).}\end{aligned}\quad (2.5)$$

Lembrando da decomposição (2.2) e tomando

$$\sigma_{1,m} = \delta \sigma_1 \quad \sigma_{1,b} = (1 - \delta) \sigma_1 \quad \delta \in [0, 1] \quad (2.6)$$

tem-se

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_1}{F_{1t}} &\leq 1 && \text{(flexotração)} \\ \frac{\delta^2 |\sigma_1|^2}{F_{1c}^2} + \frac{(1 - \delta) |\sigma_1|}{F_{1c}} &\leq 1 && \text{(flexocompressão)} \\ \frac{|\tau|}{F_v} &\leq 1 && \text{(cisalhamento longitudinal).}\end{aligned}\quad (2.7)$$

A igualdade das expressões define uma superfície no espaço de tensões em que  $\sigma_1$  e  $\tau$  participam isoladamente na avaliação da resistência. Observa-se que a falha de uma única camada é que dita a resistência para os estados limites de flexotração e de cisalhamento longitudinal. A resistência da peça na flexocompressão depende do valor de  $\delta$  que expressa a relação entre as componentes de membrana  $\sigma_{1,m}$  e de flexão  $\sigma_{1,b}$  ( $\delta = 0$  na flexão pura e  $\delta = 1$  na compressão pura). Se  $\delta \neq 0$  e  $\delta \neq 1$ , a ruptura da seção ocorre após a falha sucessiva de duas ou mais camadas, isto é, a resistência da peça é maior que o parâmetro  $F_{1c}$ . De fato, a curva de resistência para flexocompressão escreve-se como

$$\frac{\delta^2 |\sigma_1|^2}{F_{1c}^2} + \frac{(1 - \delta) |\sigma_1|}{F_{1c}} = 1 \quad (2.8)$$

que define uma equação quadrática em  $|\sigma_1|$ , cuja solução é dada por

$$|\sigma_1| = F_{1c} \left[ \frac{\delta - 1}{2\delta^2} + \frac{\sqrt{(1 - \delta)^2 + 4\delta^2}}{2\delta^2} \right] \quad \delta \neq 0 \quad (2.9)$$

e limitada a

$$F_{1c} \leq |\sigma_1| \leq 1,25F_{1c}. \quad (2.10)$$

É fácil verificar que  $|\sigma_1| = F_{1c}$  se  $\delta = 0$  ou  $\delta = 1$ ,  $|\sigma_1| = 1,25F_{1c}$  se  $\delta = 0,4$ .

O grau de segurança do projeto é descrito pela grandeza adimensional  $S \geq 0$  (DANIEL e ISHAI, 1994), em que

$$\begin{aligned} S &= \frac{F_{1t}}{\sigma_{1,m} + |\sigma_{1,b}|} && \text{(flexotração)} \\ S &= \frac{F_{1c}^2}{\sigma_{1,m}^2 + |\sigma_{1,b}| F_{1c}} && \text{(flexocompressão)} \\ S &= \frac{F_v}{|\tau|} && \text{(cisalhamento longitudinal)}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Há falta de segurança quando  $S < 1$  e excesso quando  $S > 1$ . No projeto ótimo tem-se  $S = 1$ .

## 2.2 Tsai-Wu

No estado plano de tensões, a superfície de resistência proposta por TSAI e WU (1971) escreve-se como

$$f_1\sigma_1 + f_2\sigma_2 + f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 + f_{66}\tau^2 = 1 \quad (2.12)$$

ou

$$\{\sigma\}^T \{f\} + \{\sigma\}^T [f] \{\sigma\} = 1, \quad (2.13)$$

onde as matrizes  $\{f\}$  e  $[f]$

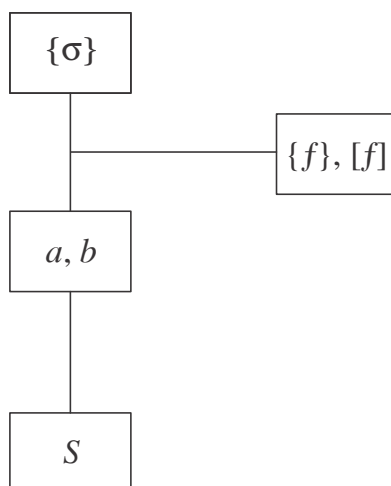
$$\{f\} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad [f] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & 0 \\ f_{12} & f_{22} & 0 \\ 0 & 0 & f_{66} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

representam quantidades tensoriais de segunda e de quarta ordem. O significado físico da relação (2.12) requer  $f_{ij} > 0$  e  $f_{11}f_{22} - f_{12}^2 > 0$ , o que torna a superfície de resistência uma superfície fechada e de formato elíptico.

Os coeficientes  $f_i$  e  $f_{ij}$  são obtidos em função das resistências  $F_{1t}$ ,  $F_{1c}$ ,  $F_{2t}$ ,  $F_{2c}$ ,  $F_v$  do material (DANIEL e ISHAI, 1994):

$$f_1 = \frac{1}{F_{1t}} - \frac{1}{F_{1c}} \quad f_2 = \frac{1}{F_{2t}} - \frac{1}{F_{2c}} \quad f_{11} = \frac{1}{F_{1t}F_{1c}} \quad f_{22} = \frac{1}{F_{2t}F_{2c}} \quad f_{66} = \frac{1}{F_v^2}. \quad (2.15)$$

O termo  $f_{12}$  leva em conta a interação entre as tensões normais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , sendo obtido geralmente por meio de ensaios biaxiais. Uma das grandes dificuldades enfrentadas no ensaio



**Figura 2.2** Fluxograma para o cálculo de  $S$ .

é que a elaboração de um maquinário adequado é uma tarefa onerosa. TODESCHINI (2009) apresenta um rol de expressões sugeridas pela literatura para o cálculo de  $f_{12}$ , e elege o coeficiente proposto por COWIN (1979)

$$f_{12} = \frac{1}{\sqrt{F_{1t}F_{1c}F_{2t}F_{2c}}} - \frac{1}{2F_v^2} \quad (2.16)$$

por melhor se adequar aos seus valores dos ensaios biaxiais.

O cálculo do fator  $S$  encontra-se esquematizado no fluxograma da Figura 2.2, e consiste nos seguintes passos:

1. entra-se com as componentes de tensão  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau$  no sistema principal 123;
2. calculam-se os coeficientes  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_{11}$ ,  $f_{22}$ ,  $f_{12}$ ,  $f_{66}$  do critério;
3. calculam-se as quantidades  $a = f_{11}\sigma_1^2 + f_{22}\sigma_2^2 + 2f_{12}\sigma_1\sigma_2 + f_{66}\tau^2$  e  $b = f_1\sigma_1 + f_2\sigma_2$ .

Na equação quadrática

$$aS^2 + bS - 1 = 0, \quad (2.17)$$

sempre encontra-se uma raiz positiva e outra negativa. O fator  $S$  é a raiz positiva da equação. Há falta de segurança quando  $S < 1$  e excesso quando  $S > 1$ . No projeto ótimo tem-se  $S = 1$ .

## 2.3 Comparação

Mostra-se aqui a diferença entre a resistência preconizada pela norma brasileira NBR 7190 (1997) com a teoria de Tsai-Wu para uma peça íntegra de peroba-rosa sujeita a um estado plano de tensões.

A espécie vegetal brasileira *Aspidosperma Polyneuron* fornece a madeira conhecida como peroba-rosa. Utilizada na cobertura do MUSAL e fornecidas por IPT (1989), as resistências de projeto da peroba-rosa íntegra são

$$\begin{aligned} F_{1t} &= 21,92 \text{ MPa} & F_{1c} &= 21,70 \text{ MPa} \\ F_{2t} &= 3,29 \text{ MPa} & F_{2c} &= 5,40 \text{ MPa} \\ F_v &= 4,83 \text{ MPa.} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Para os valores de resistência, as condições de segurança quanto aos estados limites últimos, associados à flexão normal composta, estabelecidas pelas desigualdades (2.7) são

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_1}{21,92} &\leq 1 & (\text{flexotração}) \\ \frac{\delta^2 |\sigma_1|^2}{470,89} + \frac{(1-\delta) |\sigma_1|}{21,70} &\leq 1 & (\text{flexocompressão}) \\ \frac{|\tau|}{4,83} &\leq 1 & (\text{cisalhamento longitudinal}) \end{aligned} \quad (2.19)$$

com  $\sigma_1$  e  $\tau$  em MPa.

Para as resistências de projeto da peroba-rosa íntegra, os coeficientes  $f_i$  e  $f_{ij}$  das relações (2.15) e (2.16) são calculados com

$$\begin{aligned} f_1 &= -4,61 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1} & f_2 &= 1,20 \times 10^{-1} \text{ MPa}^{-1} \\ f_{11} &= 2,10 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-2} & f_{22} &= 5,61 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-2} \\ f_{12} &= -1,06 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-2} & f_{66} &= 4,29 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-2}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

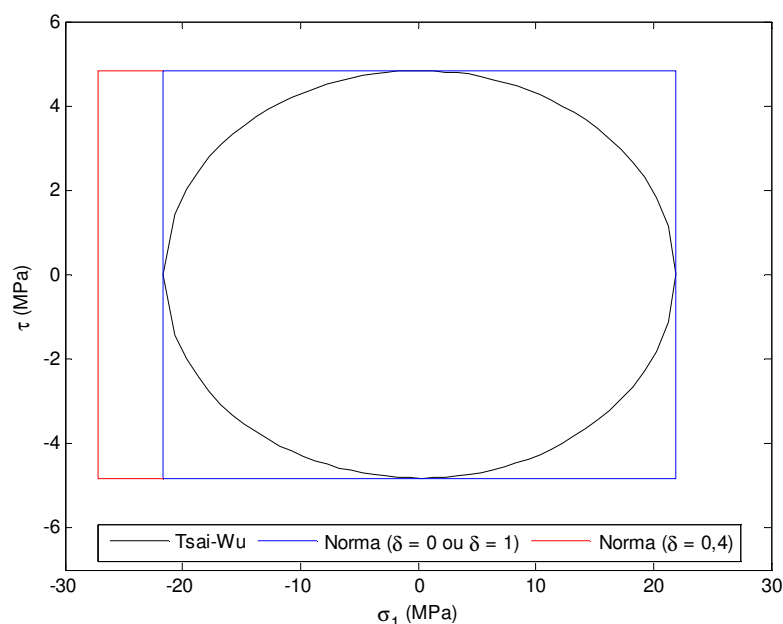
De acordo com (2.12), a condição de segurança pelo critério de Tsai-Wu é dada por

$$-\frac{4,61}{10^4} \sigma_1 + \frac{2,10}{10^3} \sigma_1^2 + \frac{5,61}{10^2} \sigma_2^2 - \frac{2,12}{10^3} \sigma_1 \sigma_2 + \frac{4,29}{10^2} \tau^2 \leq 1, \quad (2.21)$$

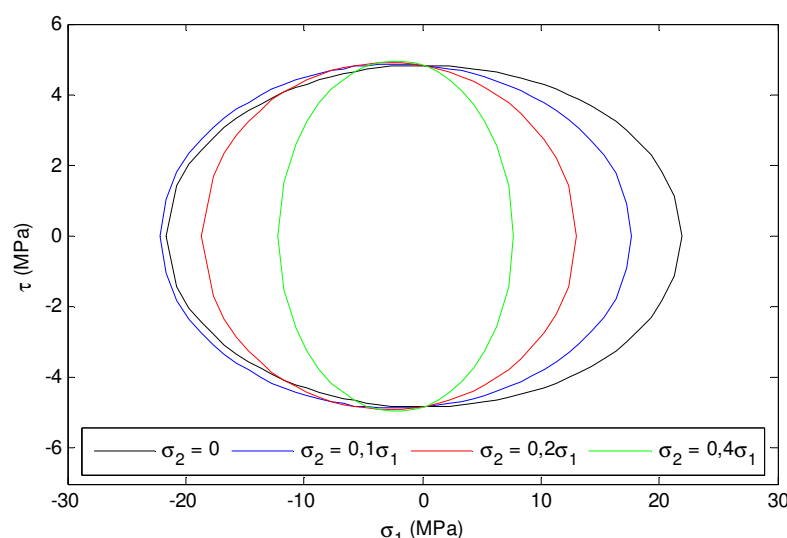
cujas adaptação para a teoria de vigas ( $\sigma_2 = 0$ ) escreve-se

$$-\frac{4,61}{10^4} \sigma_1 + \frac{2,10}{10^3} \sigma_1^2 + \frac{4,29}{10^2} \tau^2 \leq 1. \quad (2.22)$$

A Figura 2.3 compara a superfície de resistência de Tsai-Wu com a superfície de resistência da norma. Observa-se que a primeira é completamente envolvida pela segunda. Isso indica que o critério da norma não é conservativo face ao critério de Tsai-Wu. Mostram-se também na figura os valores mínimos extremos de  $\sigma_1$  em função de  $\delta$ . A Figura 2.4 traz  $\sigma_1 \times \tau$  para alguns valores de  $\sigma_2$ . Nota-se que quanto maior for o valor de  $\sigma_2$ , mais restritivo se torna o critério de Tsai-Wu. Conclui-se daí que deve-se levar em conta a componente  $\sigma_2$  na avaliação da resistência, desde que o modelo de análise a contemple.



**Figura 2.3** Gráfico  $\sigma_1 \times \tau$  para os critérios de Tsai-Wu e da norma.



**Figura 2.4** Gráfico  $\sigma_1 \times \tau$  do critério de Tsai-Wu para diferentes valores de  $\sigma_2$ .

# Capítulo 3

## Degradação

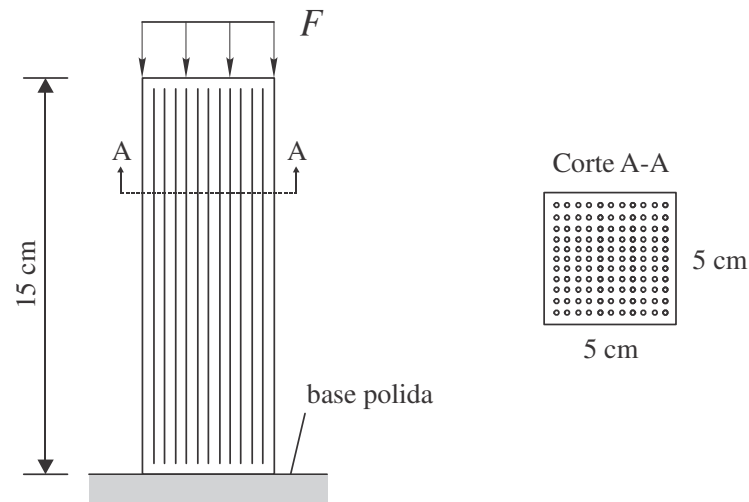
A degradação da madeira atacada por cupins é estimada pela resistência residual de corpos-de-prova devidamente confeccionados e ensaiados em laboratório. O material empregado origina-se de peças de peroba-rosa extraídas da Igreja de São Benedito do município de Cravinhos - SP, mesma espécie da madeira do MUSAL e extraída da mesma reserva. As amostras são confeccionadas de acordo com os quesitos da norma (itens B8 a B12) e ensaiadas no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. A partir dos resultados de ensaio sugerem-se curvas para a avaliação da resistência média de peças de peroba-rosa atacadas por cupins, para diferentes níveis de degradação.

### 3.1 Confeção das Amostras

A resistência da madeira é obtida por meio de ensaios de amostras padronizadas. De acordo com a norma, é necessária a confecção de pelo menos seis corpos-de-prova idênticos, homogêneos e sem defeitos (PFEIL, 2003). O carregamento é aplicado de forma crescente e contínua até o colapso: a resistência é igual à tensão média aplicada no momento do colapso.

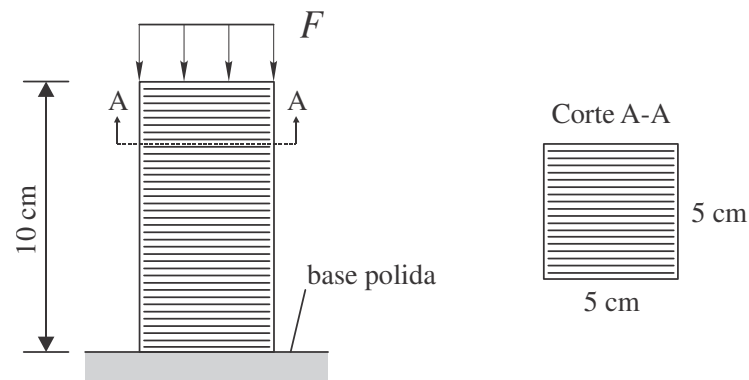
A geometria para confecção das amostras é apresentada a seguir.

- **Ensaio de compressão paralela:** para a determinação da resistência  $F_{1c}$  emprega-se um paralelepípedo com base quadrada de  $5 \times 5$  cm e com altura de 15 cm (Figura 3.1), apoiado numa base polida e sujeito a uma carga  $F$  aplicada na direção paralela às fibras.



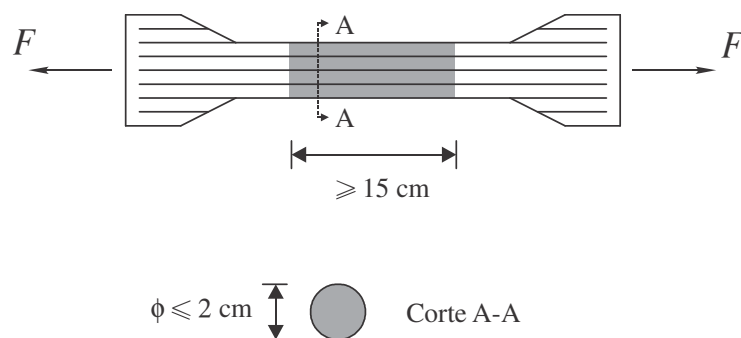
**Figura 3.1** Ensaio de compressão paralela.

- **Ensaio de compressão transversal:** para a determinação da resistência  $F_{2c}$  emprega-se um paralelepípedo com base quadrada de  $5 \times 5$  cm e com altura de 10 cm (Figura 3.2), apoiado numa base polida e sujeito a uma carga  $F$  aplicada na direção transversal às fibras.



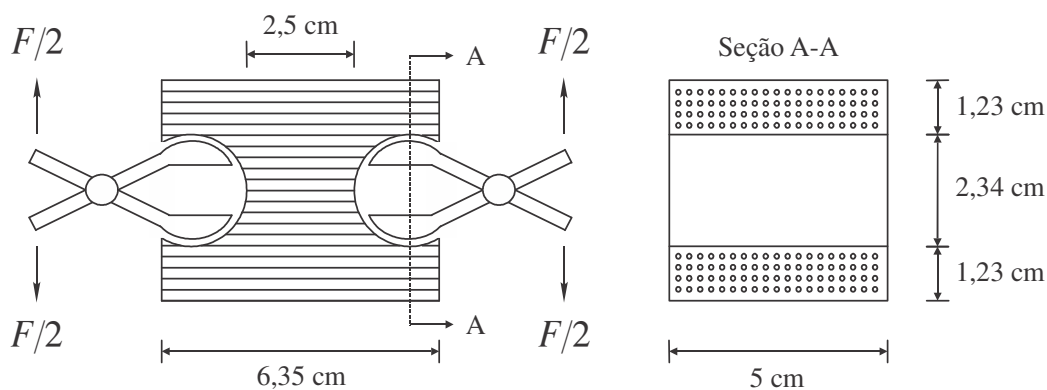
**Figura 3.2** Ensaio de compressão transversal.

- **Ensaio de tração paralela:** o corpo de prova cilíndrico da Figura 3.3 é empregado na determinação de  $F_{1t}$ . A carga de tração  $F$  é aplicada por meio de garras nas extremidades. A região em destaque deve ter pelo menos 15 cm de comprimento e diâmetro  $\phi \leq 2$  cm para garantir que as tensões estejam, de fato, alinhadas ao longo das fibras.



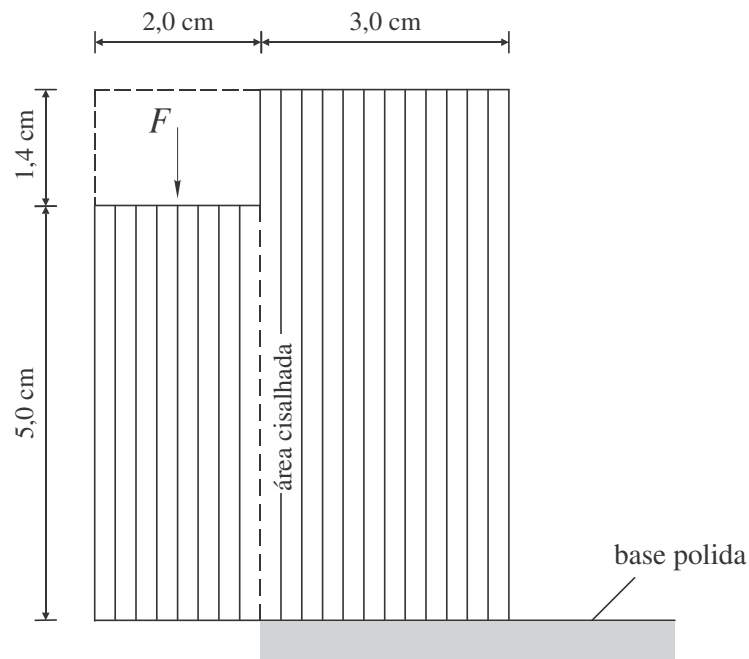
**Figura 3.3** Ensaio de tração paralela.

- **Ensaio de tração transversal:** o corpo-de-prova da Figura 3.4 é empregado na determinação de  $F_{2t}$ . A carga  $F$  é aplicada perpendicularmente às fibras por meio de um alicate.



**Figura 3.4** Ensaio de tração transversal.

- **Cisalhamento longitudinal:** na determinação da resistência  $F_v$  emprega-se o corpo-de-prova da figura a seguir, que consiste inicialmente em um paralelepípedo com base quadrada de  $5 \times 5$  cm e com altura de 6,4 cm. Efetua-se um recorte de  $2,0 \times 1,4$  cm ao longo de toda a peça (Figura 3.5), conforme tracejo, para aplicação da carga de ensaio  $F$ . A região de ruptura é paralela às fibras e ocorre ao longo da área cisalhada indicada.

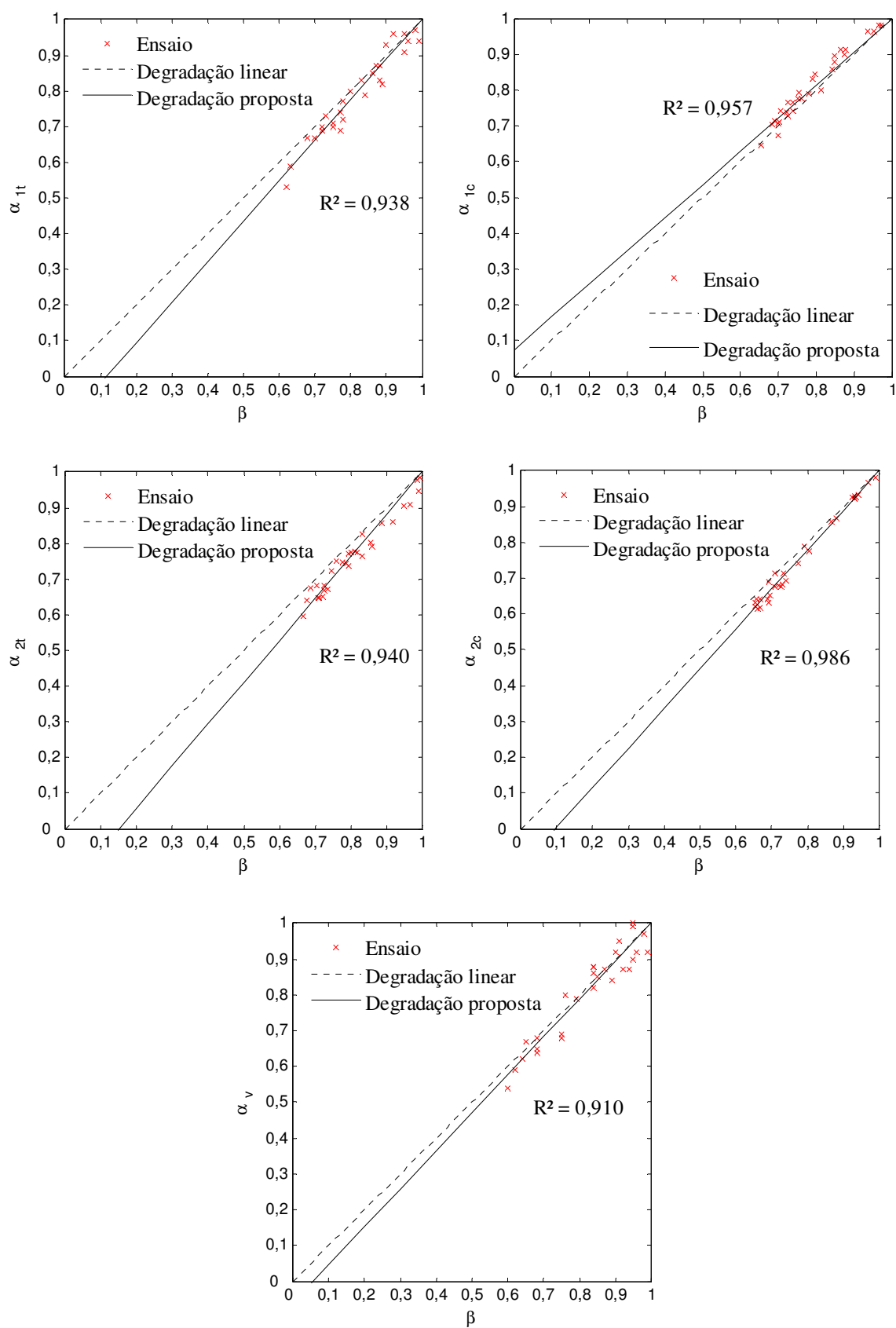


**Figura 3.5** Ensaio de cisalhamento longitudinal.

## 3.2 Curvas de Degradação

A resistência da madeira sob ataque de cupins é tratada na prática de maneira simplificada, pois a curva de degradação é assumida linear (CRUZ, 2001). Na busca de minimização do custo material e patrimonial histórico faz-se necessário uma avaliação precisa da resistência residual da peça. Nesse intuito, realizam-se ensaios de resistência média com corpos-de-prova de peroba-rosa degradada por cupins.

A relação entre a resistência do corpo-de-prova e o grau de deterioração é inversa: quanto maior é o primeiro, menor é o segundo. A resistência de cada corpo-de-prova é medida diretamente pelo equipamento de ensaio e quantificada pelo parâmetro adimensional  $\alpha = F/F_0$ , onde  $F$  é o valor de ensaio da resistência do corpo-de-prova e  $F_0$  é a resistência da peça íntegra. Supondo que o ataque por cupins ocasione perda de material sem que haja alteração significativa do restante de suas características físicas (FIGUEROA, 2010), estima-se o grau de deterioração por meio do parâmetro adimensional  $\beta = P/P_0$ , em que  $P$  é o peso do corpo-de-prova e  $P_0$  é o peso íntegro equivalente calculado pela densidade (IPT, 1989) e dimensões (NBR 7190, 1997). Os valores de ensaio para as resistências médias  $F_{1t}$ ,  $F_{1c}$ ,  $F_{2t}$ ,  $F_{2c}$ ,  $F_v$  da peroba-rosa são apresentados na Figura 3.6.



**Figura 3.6** Valores de ensaio e curvas de degradação.

De posse dos valores de ensaio e da ferramenta *CFTool* do MATLAB<sup>®</sup>, ajustam-se curvas para a avaliação da resistência média de peças de peroba-rosa atacadas por cupins:

$$F_{1t} : \quad \alpha = 1,130(\beta - 1) + 1$$

$$F_{1c} : \quad \alpha = 0,927(\beta - 1) + 1$$

$$F_{2t} : \quad \alpha = 1,177(\beta - 1) + 1$$

$$F_{2c} : \quad \alpha = 1,107(\beta - 1) + 1$$

$$F_v : \quad \alpha = 1,059(\beta - 1) + 1 \tag{3.1}$$

que apresentam boa aderência e sentido físico: (i) a curva é monótona, (ii)  $\beta = 0 \Rightarrow \alpha = 0$ , (iii)  $\beta = 1 \Rightarrow \alpha = 1$ . Devido ao intervalo dos valores de ensaio, recomenda-se utilizar as curvas de degradação propostas apenas para valores de  $\beta > 0,5$ .

# Capítulo 4

## Aplicação

Neste capítulo aplica-se o critério da norma brasileira NBR 7190 (1997) e o de Tsai-Wu para a verificação da estrutura de cobertura dos hangares do MUSAL (Figura 4.1). A estrutura é composta por peças de peroba-rosa degradada por cupim. A Figura 4.2 mostra a geometria da cobertura de um hangar. Verifica-se a estrutura considerando cobertura com telha de fibrocimento (situação atual) e cobertura com telha termoacústica (situação de reforma).

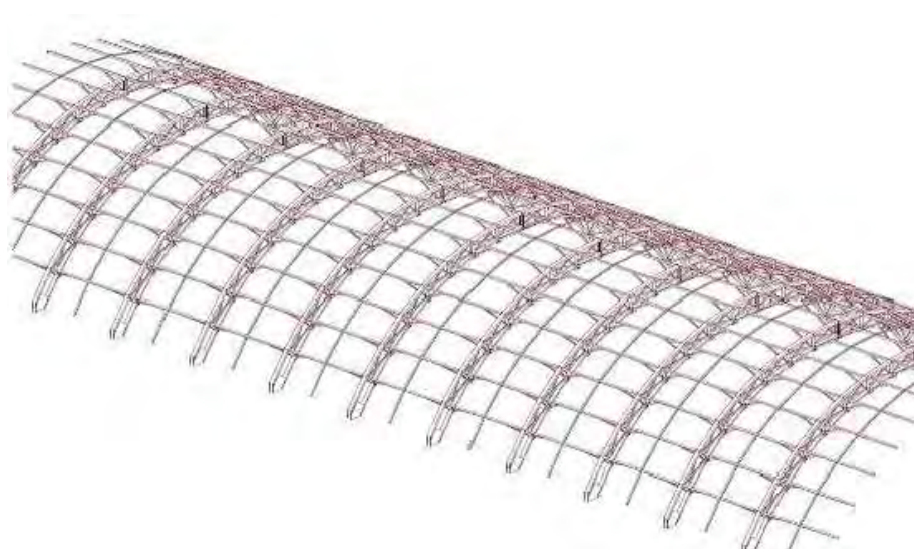
A estrutura está sujeita as seguintes ações:

- peso próprio: pelo item 6.1.5 da norma, utiliza-se teor de água de 12,0% da estrutura. Dessa forma, a densidade aparente da peroba-rosa é de  $760 \text{ kg/m}^3$  (IPT, 1989). Além disso, considera-se o telhado com  $18,6 \text{ kg/m}^2$  no caso da telha de fibrocimento e  $8,0 \text{ kg/m}^2$  para a telha termoacústica;
- vento: através do procedimento da NBR 6123 (1988), encontra-se  $6,5 \text{ kN/m}$  de esforço de sucção no pórtico resistente da estrutura e  $0,7 \text{ kN/m}$  de esforço de sobrepressão;

A análise do pórtico da cobertura é feita via método de elementos finitos (MEF) empregando-se a solução 101 do NASTRAN. A Figura 4.3 traz um detalhe do modelo de elementos finitos. Os esforços críticos oriundos das combinações de carregamento da norma (item 5.7.1) são apresentados na Figura 4.4.



**Figura 4.1** Hangar do MUSAL.



**Figura 4.2** Geometria da cobertura.



**Figura 4.3** Modelo de elementos finitos.

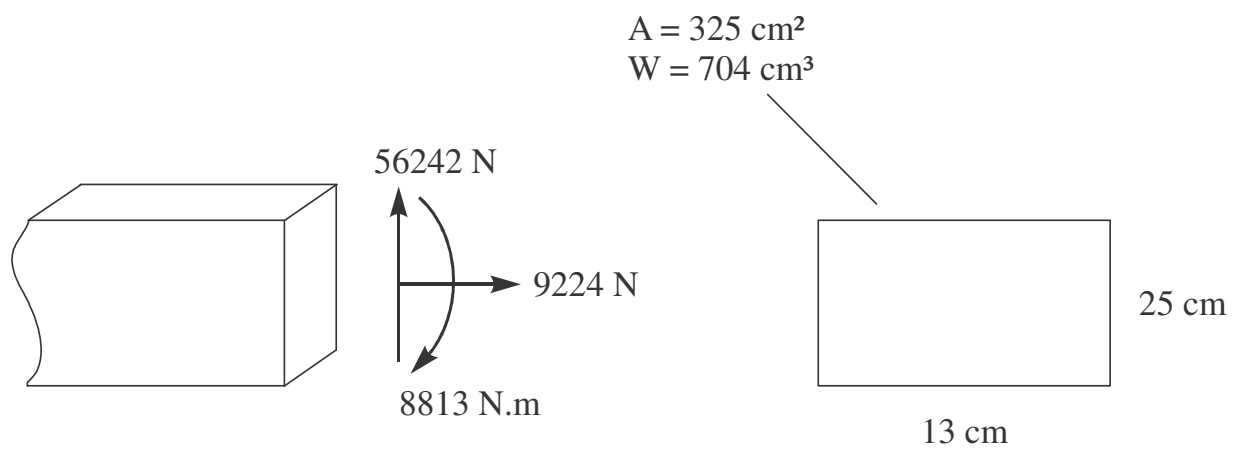
Utilizando (2.2) e (2.4) tem-se

$$\sigma_{1,m} = \frac{9224 \text{ N}}{325 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,28 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{1,b} = \frac{8813 \text{ N.m}}{704 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 12,52 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 = 0,28 \text{ MPa} + 12,52 \text{ MPa} = 12,80 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{56242 \text{ N}}{325 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 2,60 \text{ MPa.} \quad (4.1)$$



**Figura 4.4** Esforços críticos.

As resistências de projeto da peroba-rosa íntegra são dadas em (2.18) e devem ser minoradas devido à deterioração por cupim. A equipe de manutenção do MUSAL estima um índice de 15% de degradação na viga (Figura 4.5). Para a verificação tradicional via critério de norma utiliza-se a redução usual de resistência de 15% e na metodologia proposta pelo presente trabalho aplica-se  $\beta = 0,85$  em (4.1).



**Figura 4.5** Estrutura deteriorada por cupim.

## 4.1 Metodologia Tradicional

Pela minoração usual da resistência pela degradação do cupim, as resistências são

$$\begin{aligned} F_{1t} &= 18,63 \text{ MPa} & F_{1c} &= 18,44 \text{ MPa} \\ F_{2t} &= 2,80 \text{ MPa} & F_{2c} &= 4,59 \text{ MPa} \\ F_v &= 4,10 \text{ MPa.} \end{aligned} \tag{4.2}$$

Nesse caso, as condições de segurança quanto aos estados limites últimos estabelecidas pela norma são expressas pelas desigualdades (2.5) no que diz respeito à flexotração e ao cisalhamento:

$$\begin{aligned} \frac{0,28}{18,63} + \frac{12,52}{18,63} &= 0,69 \leq 1 & (\text{flexotração}) \\ \frac{2,60}{4,10} &= 0,63 \leq 1 & (\text{cisalhamento longitudinal}). \end{aligned} \tag{4.3}$$

Como pode-se observar na verificação utilizando a norma, a viga está segura quanto aos estados limites últimos de ruptura. Mede-se também o grau de segurança  $S$  do projeto em

que

$$\begin{aligned} S &= \frac{18,63}{12,80} = 1,45 && (\text{flexotração}) \\ S &= \frac{4,10}{2,60} = 1,58 && (\text{cisalhamento longitudinal}). \end{aligned} \quad (4.4)$$

Nota-se por (4.4) o excesso de segurança da peça na estrutura construída em 1941 pelo critério da norma em vigor.

## 4.2 Metodologia Proposta

Por meio das curvas de degradação sugeridas na equação (3.1), as resistências da peça escrevem-se como

$$\begin{aligned} F_{1t} &= 21,92[1,130(0,85 - 1) + 1] = 18,20 \text{ MPa} \\ F_{1c} &= 21,70[0,927(0,85 - 1) + 1] = 28,68 \text{ MPa} \\ F_{2t} &= 3,29[1,177(0,85 - 1) + 1] = 2,71 \text{ MPa} \\ F_{2c} &= 5,40[1,107(0,85 - 1) + 1] = 4,50 \text{ MPa} \\ F_v &= 4,83[1,059(0,85 - 1) + 1] = 4,06 \text{ MPa}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Emprega-se a superfície de resistência proposta por Tsai-Wu para o estado plano de tensões. A partir dos dados em (4.5) e das relações (2.15) e (2.16), os coeficientes  $f_i$  e  $f_{ij}$  são

$$\begin{aligned} f_1 &= 1,41 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1} \\ f_{11} &= 2,94 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-2} \\ f_{66} &= 6,06 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-2}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Sabe-se, nesse caso, que  $\sigma_2$  é desprezível (modelo de vigas). Assim, calculando a partir de (2.12) tem-se

$$f_1\sigma_1 + f_{11}\sigma_1^2 + f_{66}\tau^2 = 0,91 \leq 1 \quad (4.7)$$

que implica na segurança da viga pelo critério de Tsai-Wu. Para se obter o grau de segurança  $S$  da estrutura deve-se determinar  $a$  e  $b$ , conforme o fluxograma da Figura 2.2,

$$\begin{aligned} a &= f_{11}\sigma_1^2 + f_{66}\tau^2 = 0,890 \\ b &= f_1\sigma_1 = 0,018. \end{aligned} \quad (4.8)$$

O coeficiente  $S$  é a raiz positiva de

$$aS^2 + bS - 1 = 0 \quad (4.9)$$

que vale  $S = 1,05$ . Portanto, há excesso de segurança próximo ao limite de projeto ótimo.

Nota-se a diferença entre o grau de segurança fornecido pelas metodologias apresentadas. Os resultados da aplicação indicam que o excesso de segurança não é igual a 45%, como aponta o método tradicional, e sim igual a apenas 5%. Isso denota a deficiência dos critérios de resistência preconizados pela norma e do procedimento usual de degradação linear.

# Capítulo 5

## Conclusão

Identificam-se as principais diferenças entre o critério da norma brasileira e o critério de Tsai-Wu. Em paralelo, busca-se uma estimativa para a resistência de peças de peroba-rosa degradadas por cupins por meio de ensaios em laboratório.

A aplicação do estudo mostra o caráter mais restritivo do critério de Tsai-Wu, e ilustra a deficiência dos critérios de resistência da norma e do procedimento usual de degradação linear. Uma sugestão para trabalho futuro é aplicar os valores de degradação  $\beta$  obtidos em laboratório diretamente na expressão da superfície de resistência do critério de Tsai-Wu. O trabalho é base para estudos com madeiras de outras espécies.

# Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1997, *Projeto de estruturas de madeira*: NBR 7190, Rio de Janeiro.

COWIN, S. C., 1979, “On the strength anisotropic of bone and wood”, *Journal of Applied Mechanics*, vol. 46, pp. 832-838.

CRUZ, H., 2001, Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira, II Curso Livre Internacional de Património, Santarem.

DANIEL, I. M., and ISHAI, O., 1994, *Engineering mechanics of composite materials*, Oxford University Press, New York.

ELEOTÉRIO, E. R., 2000, *Levantamento e identificação de cupins (insecta: isoptera) em área urbana de Piracicaba, SP*, Dissertação de Mestrado, ESALQ, Piracicaba.

FIGUEROA, F. M. Z., 2010, *Avaliação de madeira de peroba-rosa por método não destrutivo utilizando emissão de ondas de ultrassom para peças estruturais do patrimônio histórico*, Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT, 1989, “Fichas de Características das Madeiras Brasileiras”, Publicação IPT No. 1791, IPT, São Paulo.

NICOLAS, E. A., 2006, *Estudo de critérios de resistência de materiais anisotrópicos aplicados à madeira*, Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas.

PFEIL, W., 2003, *Estruturas de Madeira*, LTC, Rio de Janeiro.

QUOIRIN, N. S. R., 2004, *Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios X*,

Dissertação de Mestrado, UFPR, Curitiba.

RODRIGUES, R. M. S., 2004, *Construções antigas de madeira: experiência de obra e reforço estrutural*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

SANTOS, J. A., 2007, *Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira*, Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Guimarães.

TODESCHINI, R., 2009, *Ensaaios uniaxiais e biaxiais para avaliação de critério de resistência de materiais anisotrópicos aplicado à madeira*, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas.

TSAI, S. W., and WU, E. M., 1971, “A General Theory of Strength for Anisotropic Materials”, *Journal of Composite Materials*, vol. 5, pp. 58-80.

VANALLI, L., 2004, *O MEC e o MEF aplicados à análise de problemas viscoplásticos em meios anisotrópicos e compostos*, Tese de Doutorado, USP, São Carlos.

## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

**CDU 624.011.1**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                       |                                            |                            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|
| 1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO<br><br>TC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 2. DATA<br><br>23 de novembro de 2011 | 3. REGISTRO Nº<br><br>DCTA/ITA/TC-122/2011 | 4. Nº DE PÁGINAS<br><br>39 |
| 5. TÍTULO E SUBTÍTULO:<br><br>Um critério de resistência e de degradação para madeiras: aplicação ao Museu Aeroespacial                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                       |                                            |                            |
| 6. AUTOR(ES):<br><br><b>Fabiano Edson Carlos</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                       |                                            |                            |
| 7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES):<br><br>Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                       |                                            |                            |
| 8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR:<br><br>Resistência; Degradação; Madeira; Museu Aeroespacial                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                       |                                            |                            |
| 9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO:<br><br>Estruturas de madeira; Resistência residual; Degradação; Estudo de casos; Engenharia civil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                       |                                            |                            |
| 10. APRESENTAÇÃO:<br><div style="text-align: right; margin-right: 50px;"><b>X Nacional</b></div> <div style="text-align: right; margin-right: 50px;"><b>Internacional</b></div><br>ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Prof. Francisco Alex Correia Monteiro. Publicado em 2011.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                       |                                            |                            |
| 11. RESUMO:<br><br>A madeira é um dos mais tradicionais materiais da indústria da construção civil e sua resistência está sujeita à degradação por cupins. Para a verificação da resistência, a norma brasileira baseia-se na teoria da máxima tensão. Entretanto, segundo a literatura, a teoria de Tsai-Wu é a que melhor se adequa à tarefa. A resistência de madeiras sob ataque de cupins é tratada de maneira simplificada na prática, devido à escassez de dados de laboratório. Nesse contexto, o trabalho traz uma comparação do critério de resistência preconizado pela norma brasileira com o critério de Tsai-Wu para uma peça íntegra de peroba-rosa, e curvas de ensaio que estimam a resistência residual da peroba-rosa sob ataque de cupins para diferentes níveis de degradação. |                                       |                                            |                            |
| 12. GRAU DE SIGILO:<br><br>(X) OSTENSIVO      ( ) RESERVADO      ( ) CONFIDENCIAL      ( ) SECRETO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                       |                                            |                            |