

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DE REFORÇOS DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADERIA COM
ESTRUTURA METÁLICA, EM EDIFICAÇÕES ANTIGAS

Ouro Preto, setembro de 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DE REFORÇOS DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MADEIRA COM
ESTRUTURA METÁLICA, EM EDIFICAÇÕES ANTIGAS

AUTOR: KLAYDSON D. LOPES FRANÇA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Henor Artur de Souza.
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Ernani Carlos de Araújo.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Estruturas Metálicas.

Ouro Preto, setembro de 2007.

F814e

França, Klaydson D. Lopes.

Estudo de reforços de elementos estruturais de madeira com estrutura estrutura metálica [manuscrito] / Klaydson D. Lopes França. - 2007.

xiii, 100f.: il. color., graf., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Henor Artur de Souza.

Co-orientador: Prof. Dr. Ernani Carlos de Araújo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção metálica.

1. Estruturas metálicas - Teses. 2. Edificações - Teses. 3. Madeira – Estrutura - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 624.014

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente por mais uma etapa da minha vida alcançada.

Aos meus pais por toda felicidade que me proporcionaram, e por acreditarem sempre em mim.

À minha irmã Karla, por estar sempre ao meu lado, como uma irmã e grande amiga, à minha irmã Karina e ao José Martinho pelo apoio.

À Luciana, pelo amor, carinho, compreensão, dedicação e apoio durante esta caminhada.

A todos os meus familiares e agregados, pela força e conselhos cedidos.

Ao meu orientador e ao meu co-orientador, pelo apoio e acompanhamento deste trabalho.

À Capes pelo apoio financeiro ao longo de todo o curso.

Aos professores da Universidade Federal de Ouro Preto e da Universidade Federal de Viçosa, pelo apoio técnico e incentivo.

Ao professor Dr. Márcio Sampaio da Universidade Federal de Viçosa pelos ensaios realizado na caracterização da madeira utilizada neste trabalho.

Ao professor Dr. Carlito Calil Junior da Universidade de São Paulo pela atenção dedicada e cooperação na realização deste trabalho.

Aos professores Leonardo Godefroid e Gabriel Polli, pelo apoio, incentivo e confiança.

Aos funcionários da FAOP – Fundação de Arte de Ouro Preto pela recepção e disponibilidade na casa Bernardo Guimarães.

RESUMO

Nas últimas décadas, com o desenvolvimento tecnológico ocorrido em todas as áreas do conhecimento, a indústria da construção civil obteve um grande impulso. A precisão nos projetos e na execução e/ou na recuperação das construções tornou-se característica fundamental para se obter sucesso na utilização da estrutura metálica, bem como a racionalização nos processos de planejamento com o emprego da construção modular. No sentido de aprimorar os processos construtivos, as construtoras passam a combater o desperdício e a improvisação procurando obter um gerenciamento global do empreendimento tirando partido do desenvolvimento tecnológico e de programas de qualidade. Nesse sentido, a compatibilização dos projetos e uma maior informação sobre os produtos oferecidos no mercado para sua melhor adequação e utilização passam a ter maior importância durante o processo. Desse modo, planejamento e padronização de procedimentos associados ao desenvolvimento tecnológico dos produtos, dão início ao que se pode chamar de construção industrializada. Dentro deste mesmo enfoque a utilização de componentes metálicos na recuperação e ou restauração de edificações convencionais (antigas) deve também tirar partido destas vantagens da construção industrializada. Faz-se um estudo e análise da intervenção em edificações antigas, por meio de reforços com elementos estruturais metálicos em elementos estruturais em madeira. Por meio de uma abordagem numérica pelo método dos elementos finitos avalia-se o desempenho de uma intervenção, utilizando reforços metálicos em peças de madeira, em um estudo de caso. A abordagem numérica é realizada via *software ANSYS 9.0* em uma viga mista de madeira e aço bi-apoiada, com carregamentos uniformemente distribuídos. Os resultados encontrados mostraram-se ser satisfatórios, com uma eficiência de aproximadamente 36% e 39%, e atendem aos padrões de perfis e chapas encontrados no mercado nacional. A recuperação de estruturas em madeira com peças metálicas é muito vantajosa, uma vez que essa não tem quase nenhuma perda, possuindo maior exatidão e a construção é muito rápida, deixando o ambiente de trabalho mais limpo.

ABSTRACT

In the last decades, with the technological development in all knowledge areas, the civil construction industry received a great impetus. The precision in the projects' designs and execution and/or rebuilding process has turned into a fundamental characteristic in order to achieve success in using metallic structures, as well as the rationalization in the processes of planning through the use of modular building. As an attempt to improve the building processes, building companies started to steer clear of waste and improvisation, looking for a global management of the enterprise, taking advantage of the technological development and of quality computer programs. In that sense, the compatibleness of designs and further information about the products offered by the market for their better adequacy and use acquire more importance throughout the process. This way, the planning and the standardization of procedures associated with the technological development of products give birth to what can be named "industrialized building". Focusing on this, the use of metallic components in the rebuilding and/or restoration of conventional buildings (antiques) need also to profit from the industrialized building. Studies and analysis of the intervention in antique buildings are being done with the use of stiffeners with metallic structural components in wood components. Through a numerical approach using the finite elements method, the performance of an intervention using metallic stiffeners in pieces of wood is appraised in a case study. The numerical approach is undertaken via *software ANSYS 9.0* in a compound simple beam (wood and steel) with uniformly distributed loading. The results were thought to be satisfactory, with an efficiency of approximately 36% to 39%, and match with the standards of profiles and plates found in the national market. The rebuilding of wooden structures with metallic pieces is very advantageous, once they have practically no loss, having a larger accuracy and the building process is considerably fast, leaving the work environment cleaner.

ABREVIATURAS

b : largura da seção transversal da viga de madeira

d : altura da seção transversal da viga de madeira

f : flecha máxima calculada

f_{adm} : flecha máxima admissível

f_y : limite de escoamento dos aços

g : carregamento permanente

i : raio de giração

k : coeficiente (geral)

l : vão livre da viga

q : carregamento acidental

x : coordenada

y : coordenada

z : coordenada

A : área da seção transversal da viga

E_m : módulo de elasticidade paralelo às fibras da madeira

E : módulo de elasticidade longitudinal do aço

F : ações em (geral), forças (em geral)

G : módulo de elasticidade transversal

I : momento de inércia genérico em relação ao eixo de gravidade

J : momento de inércia da seção transversal da viga em relação ao eixo de gravidade

L : vão livre da viga

M : momento fletor atuante na viga

M_{resist} : momento resistente pela viga

N : número de ciclos de carga aplicados

Q : carga uniformemente distribuída na viga

Q_c : carga combinada uniformemente distribuída na viga

R : reação de apoio da viga

V : força cortante atuante na viga

W : módulo de resistência elástica da seção transversal da viga

σ_f : tensão admissível da viga

σ_c : tensão calculada de compressão

σ_t : tensão calculada de tração

σ_n : tensão normal à fibras calculada

τ_v : tensão cisalhante admissível da viga

τ_{\max} : tensão cisalhante calculada da viga

λ : índice de esbeltez

ε : deformação normal específica

ν : coeficiente de poisson

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2. Objetivo.....	5
1.2.1. Geral.....	5
1.2.2. Específicos.....	5
1.3. Metodologia adotada.....	6
1.4. Estrutura do trabalho.....	8
CAPÍTULO II.....	9
2. A RESTAURAÇÃO ESTRUTURAL DE EDIFICAÇÕES ANTIGAS.....	9
2.1. Recuperação e reforço.....	9
2.1.1. Conceituação.....	9
2.1.2. Critérios gerais.....	9
2.2. Tratamento do entorno.....	11
2.2.1. Agentes climáticos.....	11
2.2.2. Agentes externos e geográficos.....	12
2.2.3. Agentes biológicos.....	12
2.2.4. Agentes inerentes ao uso.....	13
2.3. Pesquisa e diagnóstico.....	14
2.4. Medidas corretivas e de controles.....	15
2.5. Levantamento da Estrutura.....	19
2.6. Pesquisa de Campo e Ensaios de Laboratório.....	21
CAPÍTULO III.....	23
3. O AÇO E A MADEIRA COMO ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....	23
3.1. Características físicas e propriedades mecânicas do aço.....	23
3.2. Características e propriedades da madeira.....	27
3.2.1. Anatomia de madeira.....	27
3.2.3. Propriedades Mecânicas.....	32
3.3. Aço e madeira como uma proposta de estrutura mista.....	35

3.4 Tipos de intervenção com aço na madeira	36
3.5 Propostas de intervenção com aço na madeira.....	39
CAPÍTULO IV	42
4. CASOS EXEMPLOS DE INTERVENÇÃO EM OURO PRETO.....	42
4.1 Considerações iniciais.....	42
4.2 Casa Bernardo Guimarães, Ouro Preto – MG.....	43
4.3 Edificação sede da fazenda São José do Manso, Ouro Preto – MG	45
CAPÍTULO V	51
5. PROCEDIMENTOS PARA INTERVENÇÃO DO AÇO NA MADEIRA	51
5.1 Metodologia adotada.....	51
5.2 Problemas na intervenção aço em madeira	52
5.3 Estudo de caso – Elemento estrutural de madeira analisado	53
5.3.1 Caracterização da madeira	54
5.4 Modelo numérico	57
5.4.1 Elemento <i>solid64</i>	57
5.4.2 Elemento <i>shell43</i>	58
5.4.3 Elemento <i>beam189</i>	59
5.4.4 Elementos <i>conta 173</i> e <i>targel 170</i>	60
5.4.5 Elemento <i>Link8</i>	60
5.5. Geração da malha numérica.....	62
5.5.1 Discretização das barras rosqueadas	64
5.5.2 Discretização da viga de madeira.....	65
5.5.3 Discretização do perfil de aço	65
5.5.4 Discretização do tirante e das chapas de topo.....	66
5.6 Validação do modelo numérico	67
CAPÍTULO VI.....	71
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
6.1 Estudo de caso.....	71
6.2 Avaliação das propostas sugeridas.....	73

CAPÍTULO VII	84
7. CONCLUSÕES	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO A.....	90
ANEXO B.....	99

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I.....	1
Figura 1. 1 – Vista interna da Igreja de Santa Sofia - Constantinopla.....	3
Figura 1. 2 – Recuperação do Arco do cruzeiro da Igreja São Francisco de Assis.....	3
Figura 1. 3 – Vista interna do Teatro Municipal de Ouro Preto mostrando-se no detalhe as colunas em ferro fundido – Ouro Preto.	4
CAPÍTULO II.....	9
Figura 2. 1 – Fluxograma de atuação para resolução dos problemas patológicos.....	20
CAPÍTULO III.....	23
Figura 3. 1 – Diagrama tensão-deformação dos aços estruturais, em escala deformada.....	24
Figura 3. 2 – Ciclo de carregamento e descarregamento de um corpo de prova de aço.....	24
Figura 3. 3 – Tensões residuais em: (a) perfis soldados (b) chapas.....	26
Figura 3. 4 - Diagrama tensão-deformação teórico para	27
Figura 3. 5 – Seção transversal de um tronco.....	28
Figura 3. 6 – Planos principais da madeira.....	29
Figura 3. 7 – Perfis dobrado a frio, laminados ou soldados ligados a cada viga de madeira.....	36
Figura 3. 8 – Reforço de viga com chapa presa na face inferior da viga de madeira com barras inclinadas.....	37
Figura 3. 9 – Reforço com perfil I na parte superior da viga de madeira.....	37
Figura 3. 10 – Reforço de viga com barras de aço e tirantes unindo-as.....	38
Figura 3. 11 – Reforço de viga com chapas de topo, cantoneira e tirantes.....	38
Figura 3. 12 – Consolidação de estrutura da cobertura em madeira.....	39
Figura 3. 13 – Reforço de viga com chapa presa na face inferior da viga de madeira com parafusos e adesivo de alta aderência.....	40
Figura 3. 14 – Reforço de viga de madeira com chapa de topo e tirantes.....	40
Figura 3. 15 – Reforço de viga com perfil T.....	41
Figura 3. 16– Reforço de viga com perfil U.....	41
CAPÍTULO IV.....	42
Figura 4. 1 – Vista da Casa Bernardo Guimarães, Ouro Preto – MG.....	43
Figura 4. 2 – Planta baixa da Casa Bernardo Guimarães.....	44
Figura 4. 3 – Perfis I, chapas metálica, e anéis metálicos reforçando vigas de madeiras.....	46
Figura 4. 4 – Vista interna e externa da Casa da Fazenda São José do Manso.....	47
Figura 4. 5 – Pilares metálicos e pilares do mezanino compostos por perfis I soldados.....	50
CAPÍTULO V.....	51
Figura 5. 1 – Planta de formas do salão analisado.....	53
Figura 5. 2 – Ensaio de compressão paralelo às fibras.....	54

Figura 5. 3 – Ensaio de flexão estática. Corpo de prova de madeira sobre cutelos de aço.	55
Figura 5. 4 – Flecha no centro do vão x carregamento, via ensaio de flexão estática.	56
Figura 5. 5 – Elemento finito <i>solid64</i> .	58
Figura 5. 6 – Elemento finito <i>shell43</i> .	59
Figura 5. 7 – Elemento finito <i>beam189</i> .	60
Figura 5. 8 – Elementos finitos (a) <i>conta 173</i> e (b) <i>targel 170</i> .	61
Figura 5. 9 - Elementos finitos <i>link8</i> .	61
Figura 5. 10 – Malha em relação às peças consideradas.	62
Figura 5. 11 – Malha em relação às peças consideradas.	63
Figura 5. 12 – Malha em relação às peças consideradas.	63
Figura 5. 13 – Discretização da barra rosqueada.	64
Figura 5. 14 – Viga de madeira discretizada.	65
Figura 5. 15 – Perfil de aço discretizado	66
Figura 5. 16 – Tirante e chapa de topo.	66
Figura 5. 17 – Modelo da viga com carregamento aplicado	67
Figura 5. 18 – Malha da viga analisada numericamente.	68
Figura 5. 19 – Deslocamento da viga analisada numericamente.	68
Figura 5. 20 – Flecha máxima para os dois métodos analisados.	70
CAPÍTULO VI	71
Figura 6. 1 – Elementos metálicos utilizados para reforço estrutural, (a) perfil T, (b) chapa de aço, (c) chapa de aço de topo e (d) tirante de aço.	72
Figura 6. 2 – Modelo da viga de madeira candeia com o carregamento aplicado.	73
Figura 6. 3 – Modelo da viga de madeira candeia isolada em elementos finitos.	74
Figura 6. 4 – Deslocamento da viga de madeira candeia isolada em relação ao eixo y.	75
Figura 6. 5 – Modelo da viga mista, perfil T de aço e madeira com o carregamento aplicado	75
Figura 6. 6 – Modelo da viga mista, perfil T de aço e madeira em elementos finitos.	76
Figura 6. 7– Deslocamento da viga mista, perfil T de aço e madeira em relação ao eixo y.	77
Figura 6. 8 – Modelo da viga mista, chapa de aço e madeira com o carregamento aplicado.	77
Figura 6. 9 – Modelo da viga mista, chapa de aço e madeira em elementos finitos.	78
Figura 6. 10–Deslocamento da viga mista, chapa de aço e madeira em relação ao eixo y.	79
Figura 6. 11 – Modelo da viga de madeira candeia com o tirante, fixado por chapas de topo, com o carregamento aplicado.	79
Figura 6.12-Modelo da viga de madeira candeia com o tirante fixado por chapas de topo.	80
Figura 6. 13 – Deslocamento da viga de madeira candeia com o tirante fixado por chapas de topo.	81
Figura 6. 14 – Reforço em viga de madeira com tirante em forma de U	83

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. 1 – Quadro de Normas Técnicas.....	5
--	---

CAPÍTULO V

Tabela 5. 1 – Resultados obtidos pela linha elástica e pela análise numérica.	69
--	----

CAPÍTULO VI

Tabela 6. 1 – Composição de cargas.....	72
Tabela 6. 2 – Comparação entre as três propostas de intervenções.....	83

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A conservação e a restauração de edificações históricas são assuntos que exigem uma formação específica, pois as providências tomadas atualmente na maioria das vezes por construtoras são empíricas, e não garantem que os problemas de restauração não venham ocorrer novamente. Segundo Lourenço (1999), o rápido desenvolvimento dos materiais e técnicas de construção, que se afastam da prática tradicional, e as descobertas científicas, que colocam novos métodos à disposição de todos aqueles envolvidos na defesa do patrimônio, são aspectos decisivos na divisão entre a arte da construção e a ciência da conservação e restauro. Estes aspectos introduzem na conservação do patrimônio uma dimensão e caráter próprio, sendo extraordinariamente difícil representar o mesmo, sem formação e conhecimentos específicos. Por tanto, para que se possa intervir em edificações históricas, torna-se necessário um estudo indispensável da combinação entre o conhecimento científico e cultural do patrimônio arquitetônico.

Segundo Puccioni (1997), “somente quando a ciência e a cultura são conhecidas, as diretrizes podem ajudar para uma melhor conservação, reforço e restauração de edifícios, mantendo-se em mente que o propósito tanto da pesquisa como da intervenção é de salvaguardar o valor cultural e histórico da edificação como um todo e que a engenharia estrutural é parte do suporte científico necessário para obter este resultado”.

Para qualquer estudo ou planejamento de conservação estrutural, segundo o Comitê Científico para Análise e Restauração de Imóveis do Patrimônio Arquitetônico – ICOMOS (2001), demanda-se tanto de dados qualitativos, baseados em observações diretas da deterioração do material e de danos estruturais, pesquisas históricas, quanto de dados quantitativos baseados em testes específicos e modelos matemáticos usados na engenharia moderna, visando encontrar soluções mais adequadas para o problema de

resistência, transporte, da aplicação em obra, de operacionalidade funcional e estética perante as estruturas existentes.

Nas várias formas em que o aço é comercializado, e nas enormes possibilidades de características mecânicas e geométricas, que apresenta, além de possuir uma excelente flexibilidade construtiva, demonstra-se capaz de resolver de um modo notável os problemas do reforço estrutural. Devido as suas características, o aço, permite a execução de várias operações, que podem principiar em um simples reforço de elemento até a completa reestruturação e adaptação anti-sísmica.

Fazendo-se uma pesquisa na história do aço, descobre-se que na segunda metade do século XIX e nas duas primeiras décadas do século XX, a combinação do aço com madeira, pedra e argila, dominou toda a construção neoclássica, até que o concreto se firmou definitivamente, relegando a madeira e a pedra a um plano secundário.

Segundo Santos¹ apud Reis (1996), “estruturas metálicas empregadas para reforço e recuperação de edificações advém da época do renascimento. Em 1523, as cúpulas de são Marcos, em Veneza, datadas de 976 e 1017, foram envolvidas em anéis de ferro para eliminar os problemas estruturais caracterizados pela fenda nelas existentes na ocasião”. Na igreja de Santa Sofia de Constantinopla, o ferro aparece como elemento construtivo, nos arcos e abobadas colaterais e se encontram a vista, Figura 1.1.

A preservação e a restauração de edificações históricas no Brasil também apresentam a utilização do aço, mas em proporções bem inferiores ao se comparar com os países mais desenvolvidos, e inicialmente, sua aplicação se restringia simplesmente à armação de telhados, talvez, devido à baixa difusão da cultura da construção em aço no próprio país. Um exemplo que pode ser mencionado é o da Igreja de São Francisco de Assis, em Ouro Preto, que apresentava trincas em seu arco do cruzeiro, e foi restaurada utilizando vigas metálicas, a fim de eliminar os problemas estruturais que provocaram as trincas, Figura 1.2.

¹ SANTOS, P. F. **A arquitetura da sociedade industrial**. 1ª Ed., Edição Escola de Arquitetura da UFMG, Belo Horizonte, 1961.



Figura 1. 1 – Vista interna da Igreja de Santa Sofia - Constantinopla

Fonte: ECCLESIA, 2006.

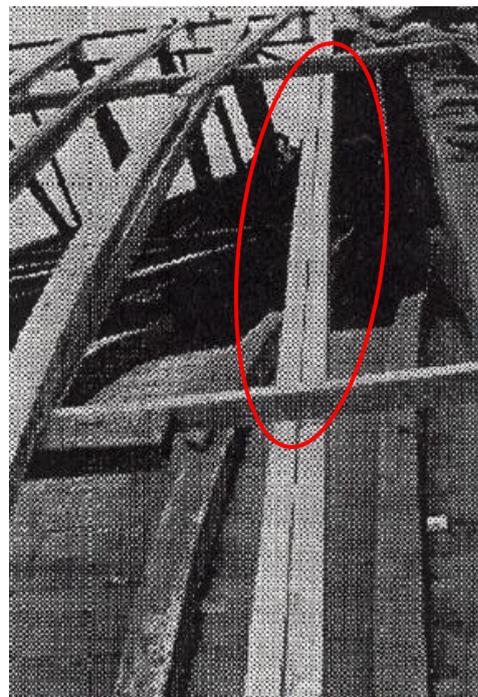


Figura 1. 2 – Recuperação do Arco do cruzeiro da Igreja São Francisco de Assis

Fonte: IPHAN, 1986.

Outro exemplo é o da Casa da Ópera de Vila Rica, hoje Teatro Municipal de Ouro Preto, que representa a mais antiga casa de espetáculos das Américas em funcionamento. A edificação conserva, ainda, a estrutura metálica de sustentação (coluna de ferro fundido) de suas frisas, pioneiramente instalada numa construção mineira, no meado do século 19. O teatro ouropretano foi inaugurado no dia 6 de junho de 1770, aniversário de Dom José I, rei de Portugal. Em 1817, o naturalista francês Auguste Saint-Hilaire assistiu a um espetáculo na Ópera e descreve, em sua obra sobre a viagem a Minas, a peça e o ambiente, ressaltando aspectos da construção, como as ordens de camarotes em estrutura de madeira. Em 1867 ocorre a primeira reforma do teatro, onde ele recebe a estrutura metálica de sustentação dos camarotes, ainda hoje ali vista, Figura 1.3

Foi a primeira vez que se empregou uma estrutura metálica em arquitetura em Minas Gerais, iniciativa também pioneira no plano nacional. As obras ocorreram no início da década de 1860, sendo intendente da capital Afonso Celso de Assis Figueiredo, futuro Visconde de Ouro Preto, último primeiro-ministro do Império.

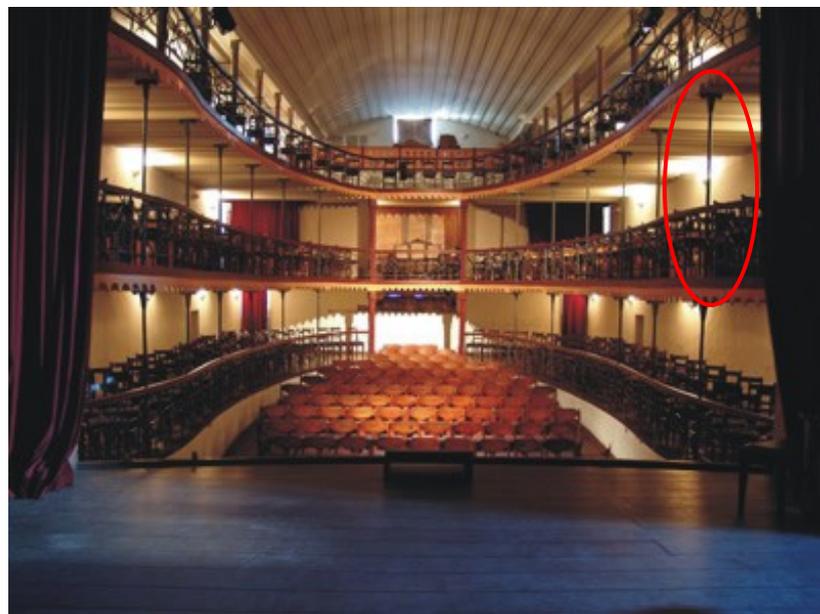


Figura 1. 3 – Vista interna do Teatro Municipal de Ouro Preto mostrando-se no detalhe as colunas em ferro fundido – Ouro Preto.

Fonte: SME, 2006

É importante mencionar que atualmente não existem normas para restauração de bens imóveis, existindo apenas a resolução criada pelo Comitê Científico Internacional para Análise e Restauração de Estruturas do Patrimônio Arquitetônico – ICOMOS (2001). Essa resolução do ICOMOS estabelece limites e critérios a serem obedecidos pelos construtores e restauradores. Além dessa resolução do ICOMOS, é fundamental que se consulte as normas brasileiras específicas de projetos em aço e madeira, dimensionamento e verificação dos esforços atuantes, Tabela 1.1.

Tabela 1. 1 – Quadro de Normas Técnicas

Norma	Ano	Descrição
NBR 8800	1986	Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios
NBR 14762	2001	Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento
NBR 7190	1997	Projeto de estruturas de madeira
NBR 8681	1983	Ações e seguranças nas estruturas - Procedimento

1.2. Objetivo

1.2.1. Geral

Estudar e analisar a intervenção, com estrutura metálica, em peças de madeira de edificações antigas definindo-se o tipo do elemento metálico de reforço em função das dimensões da seção transversal da viga e do vão livre a ser recuperado.

1.2.2. Específicos

- Identificação das propriedades geométricas, físicas e mecânicas relevantes dos elementos estruturais a serem recuperados e dos perfis metálicos a serem utilizados na intervenção;

- Avaliação da influência da não ocorrência de padronização de vãos em todas as construções antigas e também a não existência dos conceitos de construção modulada nas mesmas;
- Estudo e análise do comportamento do sistema estrutural e dos tipos de ligações entre os materiais diferentes;
- Estudo da utilização da madeira como uma proposta de estrutura mista;
- Identificação dos problemas patológicos nas interfaces e diretrizes para o diagnóstico das intervenções;
- Análise numérica pelo método dos elementos finitos (*ANSYS*) de elementos estruturais mistos de madeira e aço, para as propostas de reforços estruturais.

1.3. Metodologia adotada

O desenvolvimento do trabalho abrange uma abordagem teórico-investigativa e uma abordagem numérica.

Na abordagem teórica-investigativa engloba as seguintes etapas:

- a) Análise de experiências e ou projetos de recuperação em estrutura metálica;
- b) Estudo das normas técnicas e artigos específicos;
- c) Identificação laboratorial das propriedades físicas e mecânicas relevantes dos materiais utilizados no processo de recuperação;

- d) Estudo e análise dos problemas de interfaces com materiais diferentes e problemas patológicos.

A abordagem numérica compreende uma análise estrutural da intervenção, via simulação numérica utilizando o *software ANSYS*, pelo método dos elementos finitos, em função do tipo de perfil metálico utilizado e da modulação necessária, num estudo de caso. A configuração do carregamento é outro parâmetro importante na análise.

1.4. Estrutura do trabalho

No capítulo 1 levanta-se a questão de intervenção e restauração, usando estrutura metálica, quando teve sua utilização e quais as resoluções e normas específicas utilizadas. Além disso, evidenciam-se os objetivos do trabalho e uma breve delimitação da metodologia empregada.

No capítulo 2 apresentam-se conceitos de restauração, envolvendo recuperação e reforço em estruturas de madeira, abordando os critérios gerais em relação a esse processo. Ainda nesse capítulo é mencionado o valor histórico do patrimônio arquitetônico, sua complexidade histórica e sua organização, exigindo o conhecimento do tratamento do entorno da edificação a ser analisada, apresentando o comportamento do mesmo.

No capítulo 3 são abordados os materiais aço e a madeira como elementos estruturais, realçando suas composições e diferenças, além de suas propriedades físicas e mecânicas. Também é apresentado neste capítulo, propostas de estrutura mista aço e madeira.

No capítulo 4 são apresentados alguns casos exemplos de intervenções em sítios históricos, onde um desses, é utilizado no estudo de caso deste presente trabalho, envolvendo vigas de madeira do tipo candeia que necessitam de uma reavaliação de sua integridade estrutural.

No capítulo 5 trata-se dos procedimentos para a proposta de intervenção do aço na madeira, envolvendo a identificação da madeira por meio de ensaios de laboratório, seguida de suas propriedades físicas e mecânicas, em seguida sua modelagem numérica via elementos finitos no *software Ansys*.

No capítulo 6 são apresentados os resultados, começando pela validação do modelo e dando seqüência aos resultados obtidos no estudo de caso.

No capítulo 7 apresenta-se a conclusão deste trabalho, mostrando a eficiência da nova estrutura criada por meio da inserção de perfis metálicos em elementos estruturais de madeira, e também sua eficiência na execução na obra.

CAPÍTULO II

2. A RESTAURAÇÃO ESTRUTURAL DE EDIFICAÇÕES ANTIGAS

2.1. Recuperação e reforço

2.1.1. Conceituação

Segundo Calavera et al. (1987), reforço é todo trabalho que visa aumentar a capacidade portante das estruturas eliminando-se possíveis deficiências de resistência. A recuperação representa a etapa de repará-la para uma nova vida útil, eliminando-se os efeitos dos danos e as deteriorações. Estes autores afirmam que existem dois tipos de reforços, definidos a partir do momento em que os novos elementos incorporados à estrutura entram em carga, os reforços ativos e passivos.

Os reforços ativos são aqueles que a sua colaboração à resistência se alcança desde o momento da entrada em serviço da estrutura. E os reforços passivos são aqueles que exercem sua colaboração partindo do estado neutro em condições iniciais e entrando em carga, bem antes das condições específicas do material que originalmente forma a estrutura (fluência, retração e etc).

Esses reforços passivos são mais adequados em questões de aumento de segurança na estrutura, melhorando assim o desempenho do comportamento estrutural. Para tal aplicação, necessita-se de um conhecimento intenso das propriedades físicas e mecânicas do material a ser inserido e do material que compõe a estrutura, a fim de prever uma compatibilidade entre os materiais.

2.1.2. Critérios gerais

Segundo o ICOMOS (2001), tem-se os seguintes critérios gerais em relação ao processo de restauração:

- Conservação, reforço e restauração do patrimônio arquitetônico requerem uma abordagem multidisciplinar.
- O valor do patrimônio arquitetônico não é somente em aparência, mas também na integridade de todos seus componentes como um produto único da tecnologia de construção específica do tempo. Particularmente a remoção das estruturas internas mantendo somente as fachadas não se enquadra nos critérios de conservação.
- Quando qualquer mudança de uso ou função é proposta, todos os requisitos de conservação e condições de segurança têm que ser cuidadosamente considerados.
- A restauração estrutural em patrimônio arquitetônico não é um fim por si mesmo, mas um meio para preservação do edifício como um todo.
- A peculiaridade das estruturas do patrimônio arquitetônico, com sua complexidade histórica, requer a organização de estudos e propostas em etapas, semelhantes àquelas usadas em medicina. Anamnese², diagnóstico, terapia e acompanhamento, correspondem, respectivamente a busca de dados e informações significativas e identificação das causas de danos e degradações, escolha de medidas de reparo e controle e eficiência das intervenções. Para obter adequação de custos e mínimo impacto no patrimônio arquitetônico usando os recursos disponíveis de uma maneira racional, é normalmente necessário que o estudo repita estes passos e um processo iterativo.
- Nenhuma ação deve ser realizada sem primeiramente averiguar os possíveis benefícios e danos ao patrimônio arquitetônico, exceto em casos onde medidas urgentes de salvaguarda são necessárias para evitar o colapso iminente das

² Anamnese: informação acerca do princípio e elevação duma doença até a primeira observação do médico.

estruturas (depois de danos sísmicos); estas medidas urgentes, contudo, devem quando possível, evitar modificar a estrutura de maneira irreversível.

2.2. Tratamento do entorno

O conhecimento do entorno imediato onde está localizado o edifício é muito importante de ser considerado e analisado para se entender o comportamento da edificação e suas relações com o meio ambiente. Esse meio ambiente próximo à edificação, pode ser um fator de degradação ou até mesmo de aceleração dos processos de arruinamento da mesma. Entre os fatores ambientais que interferem na edificação, pode-se citar o clima, meio geográfico (latitude, altitude, topografia, proximidades de superfícies de água, vegetações, etc.). Além de fatores ambientais, ações artificiais resultantes da ação dos seres humanos podem também interferir na edificação.

2.2.1. Agentes climáticos

A umidade relativa e a temperatura do ar são agentes (variáveis) da natureza climática que mais interferem na envolvente da edificação. Quanto mais baixa for a percentagem de umidade relativa, maior capacidade terá o ar de absorver vapor de água. As taxas de umidade relativa são determinadas pelas condições de clima do local e podem ser alteradas naturalmente ou artificialmente. Mudanças artificiais de temperatura provocadas por aparelhos de calefação ou de ar condicionado alteram a umidade dos ambientes, reduzindo suas taxas de umidade relativa.

Os materiais construtivos não são muito atingidos pela alteração gradual do nível de temperatura e umidade relativa, porém, se estas alterações ocorrem de forma brusca, ou com pequeno intervalo de tempo, podem aparecer problemas de trincas ou ruptura de superfície dos materiais, provocadas pelo processo natural de dilatação e contração física dos mesmos.

2.2.2. Agentes externos e geográficos

Os agentes externos que interferem nas condições do edifício podem ser naturais ou artificiais e, muitas vezes, são relacionados ou atuam conjuntamente com outros.

O local onde a edificação está situada é um fator relevante pois, de acordo com suas características geológicas e geomorfológicas, por exemplo, a declividade pode facilitar ou dificultar a drenagem natural do local, influenciando de forma positiva ou negativa em termos estruturais em relação ao edifício.

2.2.3. Agentes biológicos

Segundo o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN (1999a), os agentes biológicos incluem os vegetais e os animais. Estes agentes são caracterizados, principalmente pelas suas dimensões e pela sua ação específica enquanto elementos de degradação das edificações.

A vegetação é o primeiro desses agentes e pode ser dividida em quatro grandes grupos, sendo eles: microfloras, vegetação de pequeno porte, médio e grande porte.

Os agentes biológicos animais são os mais importantes, no enfoque deste trabalho, sendo eles: microorganismos e insetos.

- Os microorganismos mais comuns são os fungos e mofos e eles aparecem geralmente em ambientes fechados e naqueles que apresentam temperatura e umidade relativa do ar elevada, associando-se a estas condições altas taxas de umidade no material (alvenaria ou madeira) em que eles se manifestam.
- As construções são freqüentemente atacadas por insetos, principalmente os xilófagos (brocas ou carunchos e os cupins ou terminas) e as formigas. Os cupins podem construir seus ninhos tanto na madeira seca como no solo, criando galerias de terra desde o seu ninho até a parte do edifício que estão atacando,

provocando problemas de instabilidade principalmente, nas estruturas de pisos, forros e telhados. As formigas também podem trazer problemas para a construção, pois criam nos terrenos, sob a edificação, grandes galerias capazes de provocar recalque nas fundações ou afundamento nos pisos.

2.2.4. Agentes inerentes ao uso

Em relação aos agentes inerentes ao uso tem-se o desgaste natural do tempo e o desgaste resultante de alterações inadequadas.

O tempo atua com definidor de vida útil dos materiais constituintes da edificação. A esse tempo físico outros elementos da natureza climática do lugar podem ser associados tanto para prolongar a vida útil dos materiais como para acelerar seu processo de envelhecimento.

As condições de exposição constantes a variações acentuadas de temperatura e umidade relativa do ar, combinações como a ação de águas presentes nos materiais, podem alterar as suas características físico-químicas fazendo com que eles percam a elasticidade e a coesão, provocando um processo de degradação acelerada.

A utilização e a ocupação do edifício provocam um desgaste natural dos materiais construtivos. Esse uso quando criterioso, buscando sempre obedecer a determinados critérios de limpeza e manutenção, preserva a integridade do edifício como um todo e contribui no sentido da própria conservação do imóvel.

A sobrecarga nas estruturas e acréscimo que alteram as cargas, os empuxos e as conexões da edificação pode gerar situações que reduzem a instabilidade da edificação causando problemas no futuro.

Outro fator que pode redundar em problemas para o edifício está relacionado com o uso indevido de materiais como, por exemplo, a substituição de reboco de areia e cal por massa com cimento nas partes baixas do edifício (fazendo elevar a coluna de umidade

ascendente por capilaridade) e a utilização de pinturas impermeáveis na superfície de paredes externas que apresentam problemas de umidade ascendente.

2.3. Pesquisa e diagnóstico

Segundo o ICOMOS (2001), tem-se os seguintes critérios gerais em relação à pesquisa e diagnóstico:

- Os dados e as informações devem primeiro ser interpretados de maneira aproximada, para estabelecer um plano de atividades adequado, proporcional aos problemas reais das estruturas.
- A total compreensão das características estruturais dos materiais é necessária na prática da conservação. É essencial a informação sobre a estrutura no seu estado original e inicial, sobre as técnicas usadas na construção, sobre as alterações posteriores e seus efeitos, sobre os fenômenos que tenham ocorrido, e, finalmente, sobre o seu estado atual.
- As respostas estruturais a uma edificação “redescoberta” podem ser completamente diferentes daquelas a uma edificação “exposta”. As soluções estruturais urgentes, no local, necessárias para estabilizar a estrutura enquanto esta estiver sendo escavada, não devem comprometer a concepção do edifício como um todo, quanto à forma e uso.
- O diagnóstico é baseado em abordagens históricas, qualitativas e quantitativas. A abordagem qualitativa deve basear-se principalmente na observação direta do dano estrutural e da deterioração do material, assim como na pesquisa histórica e arqueológica. A abordagem quantitativa deve basear-se principalmente em ensaios de materiais e de estruturas, monitoramento e análises estruturais.

- Antes de tomar uma decisão sobre uma intervenção estrutural é indispensável determinar primeiro as causas dos danos e da deterioração, em seguida avaliar o nível de segurança da estrutura.
- A avaliação da segurança, o último passo do diagnóstico, onde a necessidade de medidas de reparo é determinada, deve conciliar a análise qualitativa com a quantitativa: observação direta, pesquisa histórica, análise estrutural e, se for o caso, experiências e ensaios.
- Todos os aspectos relacionados à informação adquirida; ao diagnóstico, incluindo a avaliação de segurança e a decisão de intervir devem ser descritas em um Memorial Justificativo (“Relatório Explicativo”).

Segundo Lichtenstein³ apud Borges (2001), o diagnóstico da situação é o entendimento dos fenômenos e múltiplas relações de causa e de efeitos que normalmente caracterizam um problema patológico em uma edificação. E para definir a conduta de ação, inicialmente é feito o prognóstico da situação, ou seja, são levantadas as hipóteses da tendência de evolução futura do problema e as alternativas de intervenção acompanhadas dos respectivos prognósticos.

2.4. Medidas corretivas e de controles

Segundo o ICOMOS (2001), tem-se os seguintes critérios gerais em relação a medidas corretivas e de controle:

- A terapia deve se dirigir às causas dos problemas e não aos sintomas.
- A melhor terapia é a manutenção preventiva.

³ LICHTENSTEIN, Norberto B. **Patologia das construções**: procedimento para formulação do diagnóstico de falhas e definição de conduta adequada à recuperação de edificações. 1985. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- A avaliação da segurança e a compreensão do significado da estrutura deve ser a base para medidas de conservação e reforço.
- Nenhuma ação deve ser executada sem se demonstrar que é indispensável.
- Cada intervenção deve ser proporcional aos objetivos de segurança estabelecidos, mantendo assim a intervenção ao mínimo necessário para garantir segurança e durabilidade com o menor dano aos valores patrimoniais.
- O projeto de intervenção deve ser baseado em uma clara compreensão da natureza das ações que foram a causa dos danos e da deterioração bem como das ações futuras que serão levadas em consideração para a análise estrutural; uma vez que o projeto depende destas.
- A escolha entre técnicas “tradicionalis” e “inovadoras” deve ser pensada considerando cada caso e a preferência deve ser dada àquelas que são menos evasivas e mais compatíveis com os valores patrimoniais, levando em conta requisitos de segurança e durabilidade.
- Às vezes, a dificuldade de avaliar os verdadeiros níveis de segurança e os possíveis benefícios de intervenções pode sugerir “um método de observação”, que compreende uma abordagem cumulativa começando de um nível mínimo de intervenção, com a possível adoção subsequente de uma série de medidas suplementares ou corretivas.
- Sempre que possível, as medidas adotadas devem ser “reversíveis” para que possam ser removidas e substituídas por outras mais adequadas quando um maior conhecimento for adquirido. Quando não forem completamente reversíveis, as intervenções não devem limitar intervenções futuras.

- As características dos materiais empregados em trabalhos de restauração (particularmente materiais novos) e sua compatibilidade com os materiais existentes devem ser totalmente conhecidas. O conhecimento deve incluir o comportamento de longo prazo, para que efeitos colaterais indesejados sejam evitados.
- As qualidades peculiares da estrutura e seu entorno, no seu estado original ou primitivo, não devem ser destruídas.
- Cada intervenção deve, tanto quanto possível, respeitar a concepção, as técnicas e os valores históricos da estrutura no seu estado original ou primitivo, deixando evidências que possam ser reconhecidas no futuro.
- A intervenção deve ser resultado de um plano integrado abrangente que dá o peso devido aos diferentes aspectos da arquitetura, estrutura, instalações e funcionalidade.
- A remoção ou alteração de qualquer material histórico ou das características arquitetônicas peculiares deve ser evitada sempre que possível.
- Estruturas deterioradas devem ser reforçadas em vez de substituídas sempre que possível.
- Imperfeições e alterações, quando já fazem parte da história da estrutura, devem ser mantidas desde que não comprometam os requisitos de segurança.
- Desmontagem e remontagem devem ser empreendidas somente como medida opcional exigida pela própria natureza dos materiais e da estrutura, quando a conservação por outros meios for impossível, ou danosa.

- Sistemas de segurança provisórios usados durante a intervenção devem ser justificados e não criar nenhum dano aos valores patrimoniais.
- Qualquer proposta para intervenção deve ser acompanhada por um programa de controle a ser efetuado, tanto quanto possível, enquanto o trabalho estiver sendo executado.
- Medidas que são impossíveis de controlar durante execução não devem ser permitidas.
- Controle e monitoramento durante e depois da intervenção devem ser efetuados a fim de se verificar a eficácia dos resultados.
- Todas as atividades de controle e monitoramento devem ser documentadas e guardadas como parte da história da estrutura.

Segundo Lichtenstein³ apud Borges (2001), a definição da conduta de ação é feita levando em conta três parâmetros básicos: grau de incerteza sobre os efeitos de relação custo/benefício, disponibilidade de tecnologia para a execução dos serviços.

A probabilidade da intervenção não atingir o resultado esperado está ligada a incerteza de correção do diagnóstico e com a eficiência demonstrada em casos semelhantes anteriores. A divulgação de casos reais permite uma base mais segura para escolha da mais adequada conduta.

As alternativas de intervenção devem ser avaliadas pelos custos envolvidos e desempenho do edifício ao longo do tempo propiciado por cada uma delas. Essa comparação é necessária a fim de se optar pela melhor conduta a ser tomada.

Faz-se necessário um levantamento dos recursos técnicos envolvidos na execução das intervenções para cada uma das alternativas. Tais recursos estão relacionados à técnica requerida responsável pela execução e os materiais equipados necessários.

Lichtenstein³ apud Borges (2001), apresenta um fluxograma de atuação para a resolução de problemas patológicos, independentemente do material utilizado na edificação, visando a adoção da melhor conduta a ser seguida, não intervir, ou intervir reparando, protegendo ou restringindo o uso, Figura 2.1.

2.5. Levantamento da Estrutura

Segundo o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN (1999b), o levantamento da estrutura inicia-se com uma observação direta da mesma, a fim de se obter uma compreensão inicial da estrutura e de se dar uma direção apropriada às investigações subseqüentes. Dentre estas observações, estão relacionadas às seguintes etapas:

- a) Identificar deterioração e danos;
- b) Verificar os fenômenos de estabilidade, ou a ausência deles;
- c) Decidir se há riscos imediatos e medidas urgentes a serem tomadas;
- d) Descobrir a agressividade do meio ambiente à edificação.

O estudo de falhas estruturais começa pelo mapeamento de danos visíveis e é uma tarefa bastante delicada na qual a intervenção do que foi encontrado deve ser usada para direcionar o processo de levantamento. Este processo requer uma identificação dos possíveis esquemas estruturais de modo que os aspectos críticos das estruturas possam ser examinados em maiores detalhes.

A RESTAURAÇÃO ESTRUTURAL DE EDIFICAÇÕES ANTIGAS

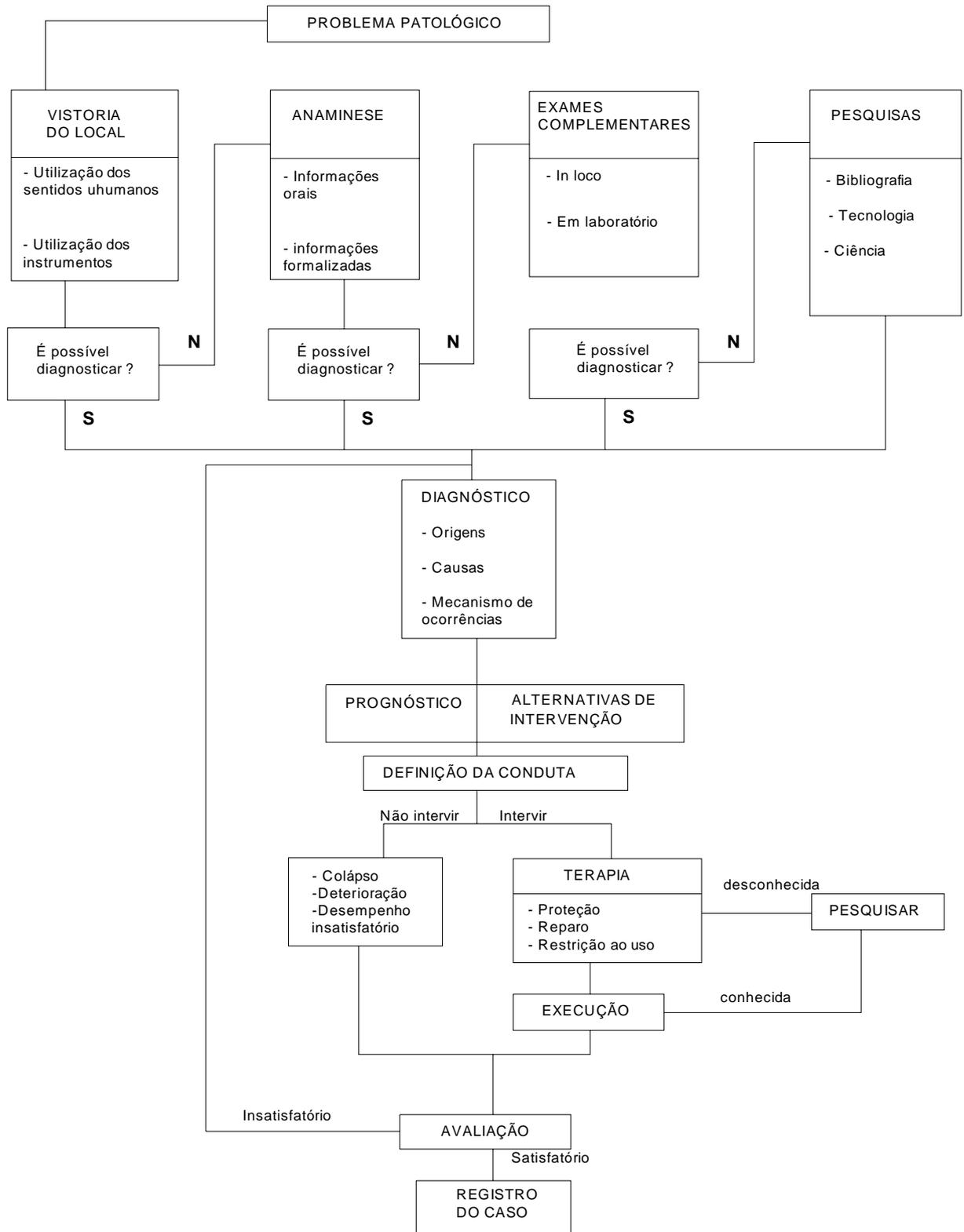


Figura 2. 1 – Fluxograma de atuação para resolução dos problemas patológicos

Fonte: LICHTENSTEIN³ apud BORGES (2001)

Em seguida, parte-se para os levantamentos geométricos ou desenhos, que devem mapear diferentes tipos de materiais, notando sua deterioração, danos estruturais, prestando atenção especialmente aos padrões de trincas, e às evidências de esmagamento e suas irregularidades, onde essas, podem ser o resultado de deslocamentos prévios, além de iniciar a ligação entre diferentes etapas de construção ou alterações das estruturas.

Segundo Persike (2002), uma outra ação a ser considerada é a do meio ambiente, que pode estar danificando uma edificação, já que isso pode ser agravado pelo descuido durante o período original de construção (falta de drenagem, umidade ascendente devido à ação capilar), pelo uso de materiais não adequados, e ou materiais menos resistentes comparados aos atuais e pela falta de manutenção subsequente.

Também é de fundamental importância a observação de áreas onde estão concentradas tensões e deformações, em particular as zonas de esmagamento (alta compressão) e as zonas de trincas ou de deslocamento (alta tração), incluindo a análise de suas direções e, juntamente com uma investigação das condições do solo podem indicar as causas de tais danos. Isto pode ser complementado com informações obtidas por ensaios específicos e geralmente envolve um processo interativo, onde os resultados dos testes sugerem a necessidade de maiores investigações.

2.6. Pesquisa de Campo e Ensaio de Laboratório

Conforme a resolução do ICOMOS (2001), a programação de ensaios deve ser baseada em uma visão clara dos fenômenos cuja compreensão possa ser relevante. Os testes geralmente têm o objetivo de identificar as características mecânicas (resistência, deformabilidade, etc.), físicas (porosidade, umidade, etc.) e químicas (composição, etc.) dos materiais, as tensões e deslocamentos da estrutura, a presença de descontinuidades e ou trincas no interior da estrutura, etc. Como regra, a programação de ensaios deve ser dividida em estágios, começando com a aquisição de dados básicos e continuando com exames e testes mais extensos baseados em uma avaliação dos dados iniciais.

Os ensaios não-destrutivos são preferíveis àqueles que envolvem alterações na estrutura. Se estes ensaios forem insuficientes, deve ser feita uma análise custo/benefício das alterações relacionadas às perdas culturais que possam ocorrer para aprofundar o conhecimento, o que leva à redução de intervenções estruturais.

Os ensaios devem ser sempre, conduzidos por pessoas habilitadas e capazes de avaliar corretamente sua confiabilidade e as implicações dos resultados devem ser cuidadosamente avaliadas. Se possível, diferentes métodos devem ser usados e os resultados comparados. Talvez também seja necessário efetuar ensaios em amostras selecionadas, retiradas da estrutura.

CAPÍTULO III

3. O AÇO E A MADEIRA COMO ELEMENTOS ESTRUTURAIS

3.1. Características físicas e propriedades mecânicas do aço

Os aços são ligas ferro carbono que podem ter até 2% de teor de carbono em sua composição, mas os aços mais comercializados para construção, não ultrapassam 1,5% a fim de viabilizar sua aplicação e controlar sua dureza. A presença de outros elementos na composição do aço, como o manganês, o silício, o fósforo e o enxofre resultam em aços fabricados para diversas funções, uma vez que a classificação do aço se dá devido sua composição química.

É de fundamental importância conhecer bem as propriedades físicas e mecânicas dos aços utilizados na construção civil. As propriedades do aço definem o comportamento do aço quando sujeito a esforços mecânicos e determinam a capacidade do material de resistir e transmitir os esforços aplicados sem que haja ruptura ou deformação excessiva. Essas propriedades podem ser obtidas por meio de ensaios de tração simples e de cisalhamento simples.

Um dos principais diagramas considerados para efeito de cálculo pode ser obtido pelo ensaio de tração simples, onde esse apresenta a relação existente entre a tensão aplicada e a deformação específica resultante, Figura 3.1.

Até certo nível de tensão aplicada, o material trabalha no regime elástico-linear, isto é, segue a lei de Hooke e a deformação linear específica é proporcional ao esforço aplicado. A proporcionalidade pode ser observada, (Figura 3.2) no trecho retilíneo do diagrama tensão-deformação, e a constante de proporcionalidade, é denominada módulo de deformação longitudinal ou módulo de elasticidade (E). Ultrapassado o limite de proporcionalidade (f_p), tem lugar a fase plástica, na qual ocorrem deformações crescentes sem variação de tensão (patamar de escoamento). O valor constante dessa

tensão é a mais importante característica dos aços estruturais e é denominada resistência ao escoamento (limite de escoamento f_y).

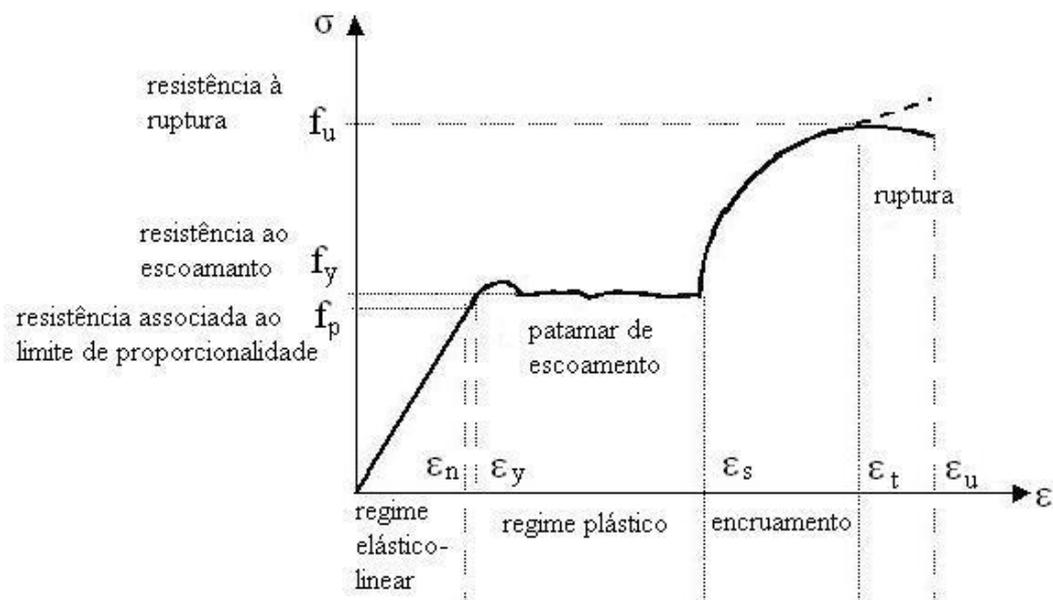


Figura 3. 1 – Diagrama tensão-deformação dos aços estruturais, em escala deformada.

Fonte: SILVA, 2006.

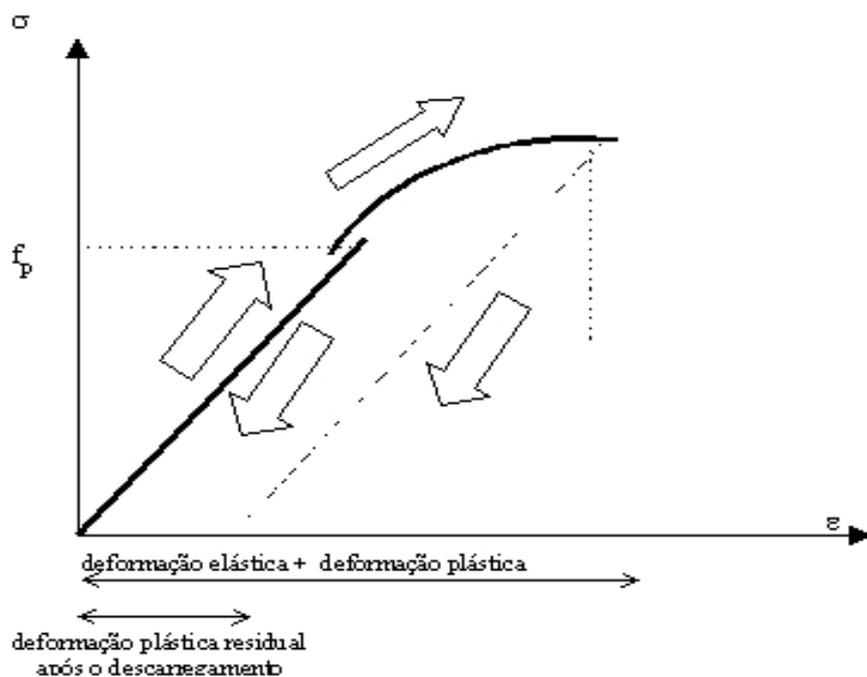


Figura 3. 2 – Ciclo de carregamento e descarregamento de um corpo de prova de aço

Fonte: SILVA, 2006.

Após o escoamento, a estrutura interna do aço se rearranja e o material passa pelo encruamento, em que se verifica novamente a variação de tensão com a deformação específica, porém de forma não-linear.

O valor máximo da tensão antes da ruptura é denominado resistência à ruptura do material. Essa resistência é calculada dividindo-se a carga máxima que ele suporta, antes da ruptura, pela área da seção transversal inicial do corpo de prova. Entenda-se que f_u é calculado em relação à área inicial, apesar de o material sofrer uma redução de área quando solicitada à tração. Embora a tensão verdadeira deva ser calculada considerando-se a área real, a tensão tal como foi definida anteriormente é mais importante para o engenheiro, pois os projetos são feitos com base nas dimensões iniciais.

Uma peça de aço, sob efeito de tensões de tração ou de compressão sofre deformações, que podem ser elásticas ou plásticas. Tal comportamento deve-se à natureza cristalina dos metais, pela presença de planos de escorregamento ou de menor resistência mecânica no interior do reticulado. Elasticidade de um material é a sua capacidade de voltar à forma original em ciclo de carregamento e descarregamento conforme, Figura 3.2. A deformação elástica é reversível, ou seja, desaparece quando a tensão é removida. A deformação elástica é consequência da movimentação dos átomos constituintes da rede cristalina do material, desde que a posição relativa desses átomos seja mantida. A relação entre os valores da tensão e da deformação linear específica, na fase elástica, é o módulo de elasticidade, cujo valor é proporcional às forças de atração entre os átomos. Nos aços, o módulo de elasticidade longitudinal vale aproximadamente $2,05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

Ductilidade é a capacidade dos materiais de se deformar muito sem se romper. Pode ser medido por meio do alongamento (ϵ) ou da estrição, ou seja a redução na área da seção transversal do corpo de prova. Quanto mais dúctil o aço, maior será a redução de área ou o alongamento antes da ruptura. A ductilidade tem grande importância nas estruturas metálicas, pois permite a redistribuição de tensões locais elevadas. As barras de aço sofrem grandes deformações antes de se romper, o que na prática constitui um aviso da presença de tensões elevadas. As diferentes velocidades de resfriamento, após a

laminação, conforme o grau de exposição, da chapa ou perfil laminado, levam ao aparecimento de tensões que permanecem nas peças, recebendo o nome de tensões residuais (σ_r). Em chapas, por exemplo, as extremidades resfriam-se mais rapidamente que a região central, contraindo-se; quando a região central da chapa resfria-se, as extremidades, já solidificadas, impedem essa região de contrair-se livremente. Assim, as tensões residuais são de tração na região central e de compressão nas bordas (Figura 3.3b). Essas tensões são sempre normais à seção transversal das chapas e, evidentemente, tem resultante nula na seção.

As operações executadas posteriormente nas fábricas de estruturas metálicas envolvendo aquecimento e resfriamento (soldagem, corte com maçarico, etc.) também provocam o surgimento de tensões residuais. Esse é o caso dos perfis soldados onde, nas regiões adjacentes aos cordões de solda, permanecem tensões longitudinais de tração após o resfriamento (Figura 3.3a).

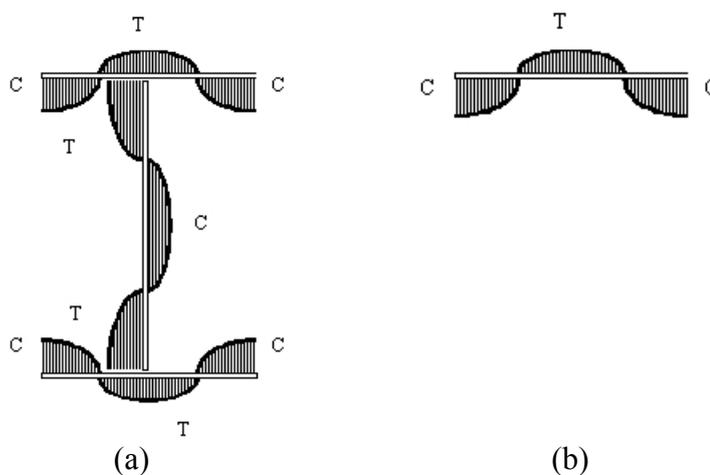


Figura 3. 3 – Tensões residuais em: (a) perfis soldados (b) chapas

Fonte: SILVA, 2006

Por simplicidade, a norma NBR 8800:1986 indica um valor único a ser adotado para a tensão residual em vigas, $\sigma_r = 115$ MPa, para tração ou para compressão. Portanto o diagrama tensão-deformação didaticamente adotado para projeto é semelhante ao apresentado na Figura 3.4.

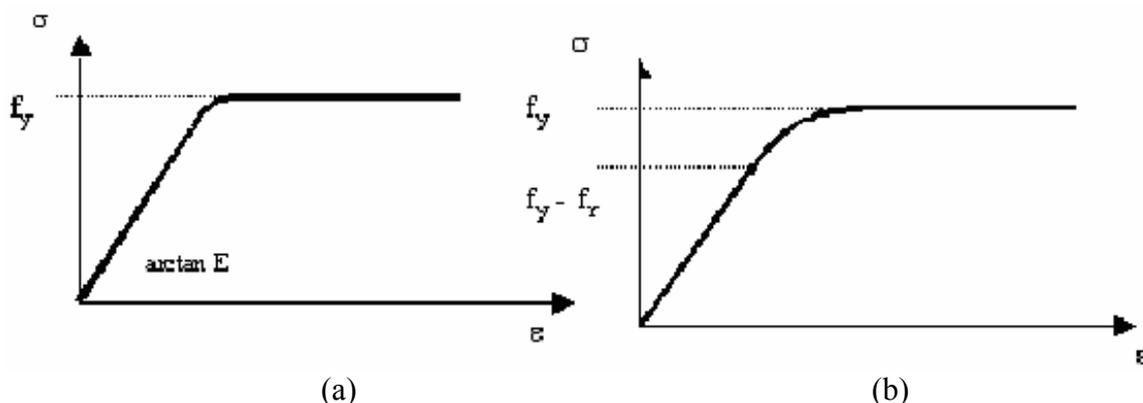


Figura 3. 4 – Diagrama tensão-deformação teórico para (a) aço virgem (b) aço com tensão residual.

Fonte: SILVA, 2006.

3.2. Características e propriedades da madeira

3.2.1. Anatomia de madeira

A madeira é um material natural orgânico, anisotrópico, e de estrutura celular complexa, que desempenha as funções estruturais, de transporte da seiva, de transformação e armazenamento dos produtos da fotossíntese. A madeira é classificada, genericamente, em duas categorias: madeiras duras e madeiras macias.

Segundo Rodrigues (2004), as madeiras duras são provenientes de árvores folhosas e estão incluídas na divisão das angiospermas e o seu crescimento é lento. Uma das características mais perceptível é a folhagem larga e achatada, com tendência a cair no outono (Peroba, Ipê, Aroeira, Candeia, Carvalho, Castanho etc.) e as madeiras macias são provenientes de árvores coníferas ou resinosas, e estão incluídas na divisão das

gimnospermas e o seu crescimento é rápido. As folhas são em forma de agulha e mantêm-se verdes todo o ano (Pinus).

Ainda segundo Rodrigues (2004), a composição química da madeira é muito importante uma vez que está relacionada com as suas características mecânicas, de trabalhabilidade, de durabilidade e de estética. Na madeira as células encontram-se distribuídas nos sentidos, longitudinal e transversal formando assim a sua estrutura, e diferenciando-se desse modo em madeiras resinosas ou folhosas. Os principais elementos, constituintes da madeira são o carbono em grande percentagem (50%), seguido do oxigênio (44%) e numa pequena percentagem o hidrogênio (6%).

Denomina-se anisotropia da madeira característica que a mesma possui devida à orientação das suas células constituintes da madeira, apresentando três direções principais. As direções mais relevantes são a direção longitudinal ou axial (direção das fibras) e a direção tangencial (perpendicular às fibras), Figura 3.5 e Figura 3.6.

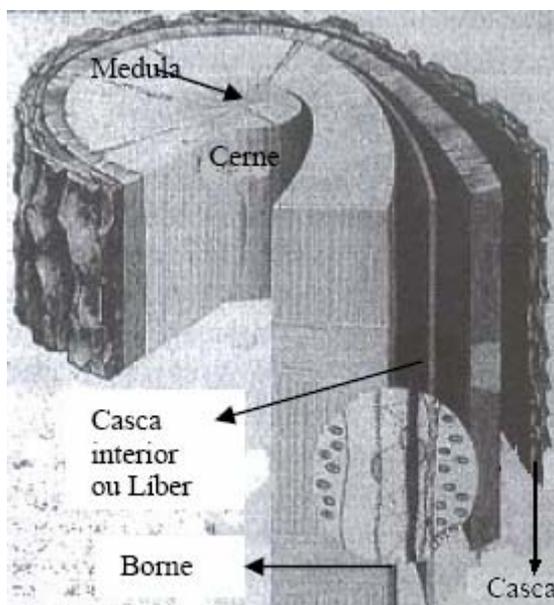


Figura 3. 5 – Seção transversal de um tronco

Fonte: RODRIGUES, 2004

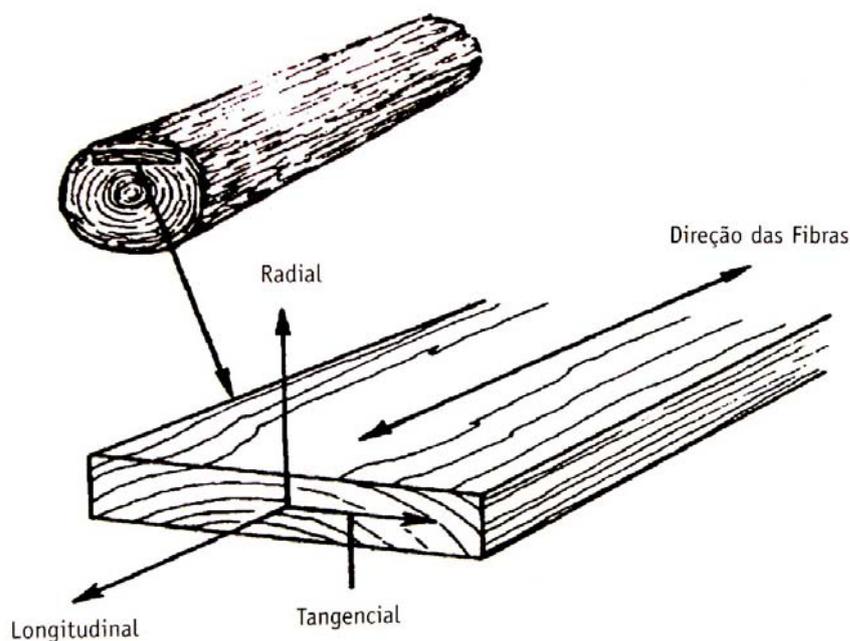


Figura 3. 6 – Planos principais da madeira.

Fonte: CALIL JUNIOR, 2003

A casca ou proteção externa da árvore que é constituída por uma camada externa de células mortas, e uma por camada interna fina de tecido celular vivo que transporta as substâncias nutritivas (seiva).

O lenho constitui a parte resistente das árvores. Compreende o cerne, formado por células mortas, que tem como função resistir aos esforços externos que solicitam a árvore, e o alburno, que segundo Pfeil (2003), é formado por células vivas, que além da função resistente é veículo da seiva bruta das raízes às folhas.

A medula é o miolo central mole, de tecido esponjoso e cor escura. Não tem resistência mecânica, nem durabilidade, e sua presença na peça já desdobrada constituem um defeito.

Os raios medulares são responsáveis em ligar as diferentes camadas entre si e têm a função de transportar e armazenar a seiva. Pelo seu efeito de amarração transversal, inibem em parte a retratilidade devida a variação de umidade

As fibras das madeiras são dispostas longitudinalmente no caule, têm extremidades afiladas e fechadas, diâmetro variável e reduzido. Em seu conjunto, fortemente aglomeradas, constituem os elementos de resistência e sustentação da árvore. As características mecânicas da madeira produzidas estão estreitamente ligadas com a compacidade, textura e disposição do tecido fibroso.

A madeira tem massa específica baixa e grande resistência mecânica, apresenta praticamente a mesma resistência à compressão que o concreto de alta resistência, sendo superior ao mesmo na resistência à flexão. Sua resiliência permite absorver choques que romperiam ou fendilhariam outro material, porém apresenta forte tendência de ruptura frágil, Petrucci (1997).

Este conhecimento somente poderá ser adquirido por meio de estudos sistemáticos, e ensaios convenientes em laboratórios especializados. Estes ensaios devem levar em consideração os fatores de variação dos resultados inerentes ao próprio material e à execução dos ensaios.

Em relação à natureza do material, os fatores que influenciam e determinam a variação dos resultados são a espécie botânica da madeira, a diferença entre alburno e cerne, massa específica e umidade.

Com relação à espécie botânica da madeira decorre do fato de haver alterações na sua estrutura e constituição anatômica de espécies para espécies.

A massa específica aparente que está ligada diretamente como todas as outras propriedades, de tal modo que é possível ajuizar o comportamento da madeira por meio do conhecimento de sua massa específica.

Com relação a diferença entre alburno e cerne, o corpo de prova retirado de partes diferentes do tronco de madeira apresenta variações sensíveis em relação a suas propriedades.

O teor de umidade é responsável pelos resultados dos ensaios, uma vez que o corpo de prova em estado de completa secagem apresenta resultados máximos e em estados de umidade igual ou superior ao ponto de saturação das fibras, apresenta resultados mínimos. A madeira por ser um material higroscópico tem a capacidade de absorver ou perder água conforme as condições ambientais (umidade relativa e temperatura do ar). Para cada condição climática corresponde um grau de umidade designado de equilíbrio higroscópico. A umidade da madeira deve estar o mais próximo possível da umidade de equilíbrio higroscópico, ou seja, entre 12% a 15% de umidade, para que se evitem os efeitos volumétricos conseqüentes.

Além desses fatores, a presença de defeitos pode determinar dispersão notável entre resultados. Segundo Rodrigues (2004), pesquisadores concluíram que os corpos de prova para ensaios deveriam ser de pequenas dimensões, isentos de defeitos, de vários espécimes de cada espécie, abrangendo todas as seções e comprimentos de toras, e em condições fixadas de umidade, direção e velocidade de aplicação das cargas.

Alguns defeitos ocorrem quando existe uma variação de umidade entre 0% e 30%, ou seja, a umidade da madeira está abaixo do ponto de saturação das fibras. Quando a umidade aumenta a madeira aumenta de volume, quando a umidade diminui, ela contrai. A variação dimensional, na direção tangencial é a mais elevada (varia de 5 a 10%), enquanto que na direção radial é metade da direção tangencial e na direção longitudinal é praticamente desprezível (0,1 a 0,4%).

A retração volumétrica é a soma das três retrações lineares ortogonais. A diferença entre a retração radial e a tangencial representa a causa da deformação das madeiras durante a secagem. Por essa razão, preferem-se madeiras com retrações radiais e tangenciais idênticas. A dilatação linear, na direção longitudinal é de cerca de 1/3 do coeficiente de dilatação linear do aço. Na direção radial é de 4 a 7 vezes o coeficiente de dilatação do aço.

A durabilidade é a resistência natural que a madeira possui face aos ataques de agentes xilófagos, durante um intervalo de tempo variável. Para que os materiais lenhosos

tenham uma boa durabilidade natural deve possuir as seguintes características: elevada densidade, elevado número de anéis por centímetro para as resinosas e reduzido número para as folhosas, um poro fechado, elevada percentagem de cerne, elevado teor em substâncias tóxicas (resinas, gomas, etc.), e baixo teor em água. Na avaliação da durabilidade é fundamental conhecer a permeabilidade da madeira, para se poder aumentar a sua durabilidade pela atuação de determinado tratamento preservador.

Com a aplicação correta da madeira, por meio da escolha adequada da espécie na classificação e do sistema estrutural apropriado, pode-se equipará-la em relação ao concreto e ao aço em suas aplicações. Além disso, a madeira ainda permite variações em sua aplicação como, por exemplo, a madeira laminada colada e o compensado, que permitem a execução de estruturas com características diferenciadas em relação a outros materiais.

No Brasil, as características físicas e mecânicas das madeiras são determinadas conforme a NBR 7190:1997.

3.2.3. Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas referem-se à resistência que oferece a madeira aos esforços principais, exercidos no sentido das fibras, e aos esforços secundários, exercidos transversalmente às fibras.

Como já dito anteriormente, as fibras constituem o elemento resistente da madeira, quando seus vazios são grandes, tem-se madeira mole, pouco resistente; quando as fibras são longas, os tecidos são mais ligados, e mais resistentes à tração. Segundo Petrucci (1997), uma forte proporção de fibras ou fortes feixes das mesmas dão rigidez e compacidade, e uma fraca proporção e uma repartição regular dão flexibilidade.

Dentre todas as propriedades mecânicas da madeira, algumas, das mais importantes são:

3.2.3.1. Tração paralela às fibras

A madeira possui uma elevada resistência à tração paralela às fibras. Como exemplo de peças solicitadas a estes esforços, pode-se referir a linha e as asnas de uma tesoura de telhado. A relação entre a tensão e a deformação é praticamente linear até a ruptura.

3.2.3.2. Compressão paralela às fibras

A madeira possui uma elevada resistência à compressão paralela às fibras. Tomando como exemplo de peças submetidas a este esforço, pode-se referir aos pilares e aos pendurais. Segundo Rodrigues (2004), a relação entre tensão e deformação específica (ϵ) é linear numa primeira fase e não linear na segunda fase. Quanto menor for o módulo de elasticidade, menor é a resistência à compressão de peças esbeltas. A resistência à tração é superior à resistência à compressão nas madeiras livres de defeitos. No entanto, em madeiras classificadas segundo a presença de defeitos, a resistência à tração é inferior à resistência à compressão, devido à influência dos defeitos (essencialmente nós).

3.2.3.3. Resistência à flexão

A resistência à flexão das madeiras também é elevada. Um caso que se pode tomar como exemplo de peças: vigas e vigotas.

Partindo do ponto de vista de que a madeira é um material anisotrópico onde o módulo de elasticidade não é o mesmo para a tração e compressão, e a partir de estudos experimentais, Petrucci (1997), estabelece uma série de coeficientes de correção ao momento de inércia, segundo sua cota de qualidade da madeira, que permite calcular a resistência à flexão em função da carga de ruptura,

$$\sigma_f = \frac{\frac{P \times l}{4}}{\gamma \times \frac{b \times h^2}{6}} = \frac{3}{2} \times \frac{P \times l}{\gamma \times b \times h^2} \quad (3.1)$$

sendo P é a carga de ruptura, (N); l é o vão livre entre apoios do corpo de prova, (cm); b é a base da seção transversal do corpo de provas,(cm); h é a altura da seção transversal do corp de provas, (cm); e γ é o fator de correção.

- Para madeira perfeita, sem nós, nem defeitos tem-se:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt[6]{h}} \quad (3.2)$$

- Madeira de 1º escolha tecnológica, com pequenos defeitos tem-se:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt[3]{h}} \quad (3.3)$$

- Madeira de 2º escolha, com nós admissíveis, madeira de carpintaria tem-se:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt[2]{h}} \quad (3.4)$$

3.2.3.4. Tração perpendicular às fibras

A madeira possui uma baixa resistência à tração perpendicular às fibras (≈ 30 a 70 vezes menor que na direção paralela às fibras), Segundo Rodrigues (2004), isso ocorre devido à existência de poucas fibras na direção perpendicular ao eixo da árvore e à conseqüente falta de travamento das fibras longitudinais. Esta questão é crítica no caso de peças curvas.

3.2.3.5. Compressão perpendicular às fibras

A madeira possui uma resistência à compressão perpendicular às fibras menor que a compressão paralela às fibras. Segundo Rodrigues (2004), a relação tensão de compressão perpendicular às fibras-deformação, é inicialmente linear, passando para um estado de esmagamento sem ser perceptível, de imediato, a ruptura da peça. Este esforço é característico nas zonas de apoio das vigas, onde se concentra toda a carga em pequenas superfícies que deveriam ser capazes de transmitir a reação sem sofrer deformações.

3.2.3.6. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade varia conforme ao tipo de esforço, tração ou compressão. Segundo Rodrigues (2004), geralmente é usado o módulo de elasticidade aparente, que corresponde à flexão.

Os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas da madeira são o teor de umidade, a duração da carga aplicada, e a qualidade da madeira. E os fatores secundários que influenciam as propriedades da madeira são a temperatura e o efeito do tamanho da peça de madeira.

O fator de maior importância na resistência da madeira é a sua qualidade, ou melhor dizendo, são os defeitos que esta possui ou não, como por exemplo:

- a) Nós criados pelos ramos das árvores;
- b) Desvio da fibra afetada pela presença de nós;
- c) Existência de fendas longitudinais radiais provenientes da secagem que cortam os anéis de crescimento transversalmente;
- d) Fendas longitudinais tangenciais produzidas pela separação dos anéis de crescimento, que são consequência da falta de aderência entre as membranas da madeira devido às irregularidades do crescimento da árvore.

3.3. Aço e madeira como uma proposta de estrutura mista

Quando a capacidade resistente da estrutura de madeira dos pavimentos não é suficiente podem-se adicionar peças de madeira nova ligadas a ela, ou simplesmente colocar outras vigas entre as existentes de modo a diminuir o vão entre elas, ou ainda colocar peças de material distinto como o aço em partes ou ao longo de toda a viga.

No caso de surgimento de fendas, onde possa comprometer a capacidade resistente da viga, faz-se uma análise da profundidade e do quanto se pode eliminar das faces da viga, reduzindo assim, o mínimo possível da sua seção lateral. Em seguida estuda-se o caso de intervenção que possa ser mais útil e rápida em cada caso.

Em peças de madeira de grandes dimensões, é inevitável a existência de fendas provenientes de secagem, e essas, nem sempre comprometem a resistência da viga. Nestas situações, é mais usual utilizar varões de aço inclinados (ângulos entre 20 a 30°), colados com cola epóxi, sendo as fendas preenchidas também com a mesma cola. Já no caso onde essas fendas comprometem a resistência da viga, é necessário um aprofundamento nas intervenções, com o aço.

3.4 Tipos de intervenção com aço na madeira

Segundo Mazzolani⁴ apud Teobaldo (2004), os pisos de madeira, mais freqüentes em construções antigas, pode ser reforçado de duas maneiras. A primeira, reforçando cada viga de madeira com elemento de aço, para aumentar a resistência do piso e para reduzir a deformação do mesmo. Esta finalidade pode ser atingida de três modos, como mostrado nas figuras 3.7 e 3.8.



Figura 3. 7 – Perfis dobrado a frio, laminados ou soldados ligados a cada viga de madeira.

⁴ MAZZOLANI, Federico. L'Acciaio nel Consolidamento. Milão: ASSA – Associazione Sviluppo Strutture Acciaio, 1991. 49 p.



Figura 3. 8 – Reforço de viga com chapa presa na face inferior da viga de madeira com barras inclinadas.

Ainda segundo Mazzolani⁴ apud Teobaldo (2004), a segunda maneira de reforçar pisos de madeira é indicada quando as vigas em madeira estão em boas condições, merecendo ser deixadas à vista. Neste caso, o perfil I em aço é colocado na face superior das vigas existentes e apropriados sistemas de conexões são concebidos com o propósito de impedir o deslizamento entre os dois componentes do novo sistema misto aço-madeira, Figura 3.9. Uma variação deste sistema consiste no emprego de planos de espessuras consideráveis ligados à viga inferior mediante parafusos.



Figura 3. 9 – Reforço com perfil I na parte superior da viga de madeira

Outra intervenção, segundo Rodrigues (2004), consiste em colocar barras de aço inclinadas perfurando a viga e em seguida pender tirantes às barras na região abaixo da viga, transferindo o esforço de tração da viga de madeira para os tirantes, Figura 3.10.



Figura 3. 10 – Reforço de viga com barras de aço e tirantes unindo-as.

Uma intervenção, semelhante a anterior, consiste em colocar chapas de aço de topo nas extremidades da viga. Sob a viga, no meio do seu vão, fixa-se uma cantoneira no sentido transversal e em seguida pender tirantes às chapas de aço, transferindo o esforço de tração da viga de madeira para os tirantes, Figura 3.11.



Figura 3. 11 – Reforço de viga com chapas de topo, cantoneira e tirantes.

Outro elemento estrutural horizontal das construções é a cobertura, com degradação sempre acentuada devido ao contato direto com os agentes atmosféricos. Quando as condições dos elementos de madeira são aceitáveis, é possível uma consolidação mediante ligação de perfil de aço em U ou chapa à estrutura existente por meio de pregos ou parafusos completados por resina e ligados entre eles por solda executada na obra, Figura 3.12.

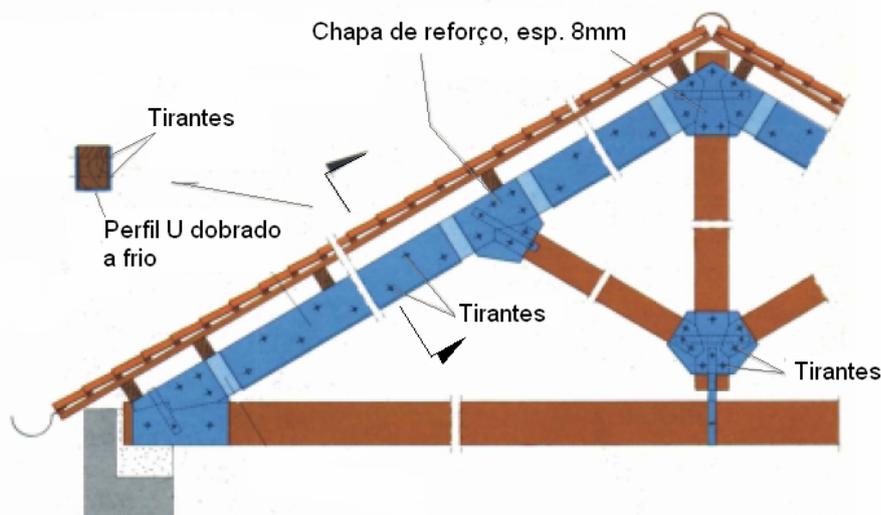


Figura 3. 12 – Consolidação de estrutura da cobertura em madeira.

Fonte: Mazzolani⁴ apud Teobaldo (2004).

Vale ressaltar, que em alguns casos a estrutura é irrecuperável, e nesse caso, a melhor solução é substituir a velha disposição de madeira pelo aço, indiferentemente do tipo de telha a ser utilizada. Segundo Teobaldo (2004), o emprego desta tipologia é muito freqüente em edifícios de culto, sendo que em muitos casos a função do teto vem integrada àquela de diafragma.

3.5 Propostas de intervenção com aço na madeira

Existem outras propostas de intervenções com aço nas estruturas de madeira também eficientes, mas com diferentes níveis de complexidade na sua análise estrutural e também na sua execução in loco.

Uma proposta consiste simplesmente em colar uma chapa de aço abaixo da viga de madeira com cola de alta aderência, e alguns parafusos ao longo da viga, Figura 3.13.



Figura 3. 13 – Reforço de viga com chapa presa na face inferior da viga de madeira com parafusos e adesivo de alta aderência.

Uma outra proposta, bem semelhante à citada por Rodrigues (2004), só que, neste caso, as barras de aço são substituídas por chapas de topo, reforçada com contra-forte e fixada à viga de madeira por meio de parafusos. Os tirantes unem uma chapa de topo a outra, transferindo o esforço de tração da viga de madeira para os tirantes, Figura 3.14.



(a)



(b)

Figura 3. 14 – Reforço de viga de madeira com chapa de topo e tirantes, (a) vista longitudinal; (b) detalhe da chapa de topo

Ainda existem mais duas propostas de intervenção com aço em madeira e não menos importantes, onde uma delas consiste em criar um rasgo longitudinal na região inferior da viga de madeira e inserir (embutir) um T de cabeça pra baixo dentro deste rasgo e fixá-lo por barras rosqueadas, que por sua vez promovem uma certa protensão fazendo com que o perfil T e a viga de madeira trabalhem juntos, como uma estrutura mista, Figura 3.15.



Figura 3. 15 – Reforço de viga com perfil T

A próxima proposta é semelhante a anterior, só que são feitos dois rasgos ao invés de um, porém com espessura bem mais fina, inserindo-se um perfil U em chapa dobrada a frio, também fixada por barras rosqueadas. Também tem a função de trabalhar como uma estrutura mista. Figura 3.16.

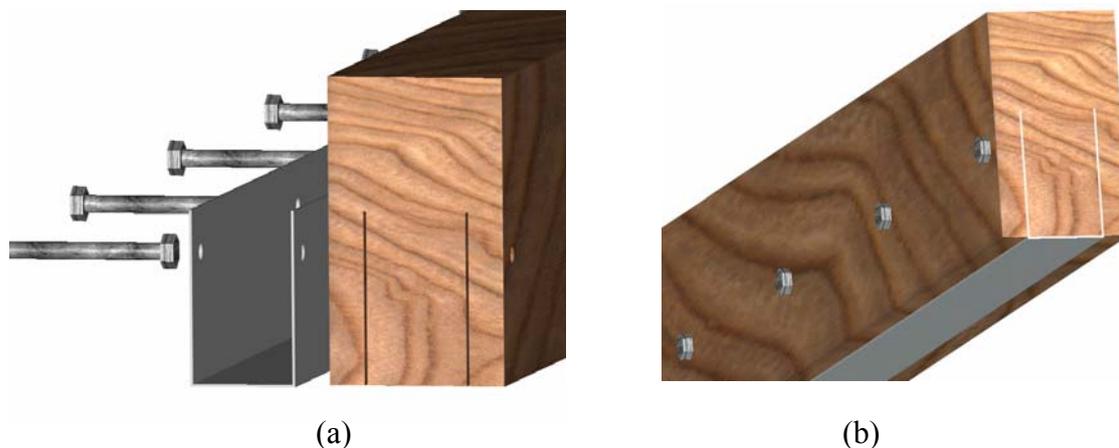


Figura 3. 16– Reforço de viga com perfil U

CAPÍTULO IV

4. CASOS EXEMPLOS DE INTERVENÇÃO EM OURO PRETO

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo apresenta-se dois casos de edificações históricas que optaram pela utilização do aço como material estrutural, no seu processo de restauração. Outro aspecto determinante nesta seleção foi a opção pela estrutura aparente, enfatizando a mesma.

É importante dizer que na maioria dos casos, a intervenção visa um novo uso ou resgate do edifício para uma nova função, havendo uma modificação da função original das obras. Dá-se destaque a duas edificações encontradas na cidade de Ouro Preto – MG, cidade patrimônio da humanidade, e por ser o foco principal de alcance deste trabalho.

A análise é feita por meio de uma mesma estrutura metodológica a fim de possibilitar melhor cruzamento de dados e análise de resultados. Os tópicos estudados para cada caso contemplam: o contexto histórico; o diagnóstico; o projeto de intervenção; a opção do material.

Faz-se também uma análise mais global, com o objetivo de elucidar três tópicos: as vantagens e desvantagens do método e concepção adotada, a relação da intervenção com relação às cartas patrimoniais, à resolução do ICOMOS e a avaliação do resultado final, estrutural e arquitetônica, do processo de intervenção.

São apresentados a casa de Bernardo Guimarães de propriedade do governo do Estado de Minas Gerais, situada na rua Alvarenga, 794, Bairro Cabeças, e a sede da fazenda do São José do Manso, localizada próximo ao Parque do Itacolomi. As duas edificações foram visitadas, possibilitando a observação e registro de detalhes construtivos, e a

primeira permitindo ainda recolhimento de alguns materiais para análise de propriedades geométricas, físicas e mecânicas.

4.2 Casa Bernardo Guimarães, Ouro Preto – MG

O imóvel conhecido como Casa Bernardo Guimarães foi construído no século XIX, Figura 4.1. A autoria do projeto e responsabilidade da execução da obra não foram identificados em pesquisa realizada pela fundação João Pinheiro no ano de 1974. Localizado na rua Alvarenga, no bairro Cabeças, o imóvel não possui tombamento individual pelo Patrimônio histórico Artístico e cultural – IPHAN, mas está compreendido no acervo arquitetônico e paisagístico da cidade, tombado conforme processo nº 70-T – inscrição nº 39 – Livro das Belas Artes, fls.8, em data de 20 de Abril de 1938, (FAOP, 2006).



Figura 4. 1 – Vista da Casa Bernardo Guimarães, Ouro Preto – MG.

Fonte: FAOP, 2006.

O prédio teve como descrição original o uso residencial. Nele residiu o poeta escritor ouropretano Bernardo José da Silva Guimarães, que faleceu em 1884 aos 57 anos.

Os herdeiros cederam o prédio ao governo do Estado de Minas que por sua vez o doou em 1995 para uso da Sociedade São Vicente de Paula (SSVP), com fins exclusivos de manter ali uma casa de cuidados a idosos desamparados, onde funcionou até a transferência para sede própria. Foi devolvido ao Estado de Minas em 2003, conforme consta em registro documental, (FAOP, 2006).

Atualmente o prédio destina-se a oficina de restauração da FAOP, onde também se encontra uma biblioteca para auxiliar nos estudos internos do corpo de alunos e profissionais, Figura 4.2.

No processo de restauração dessa edificação houve a inserção de estruturas metálicas em alguns elementos estruturais (viga) de madeira e também a construção de novos elementos estruturais em aço com finalidades distintas, Figura 4.3.

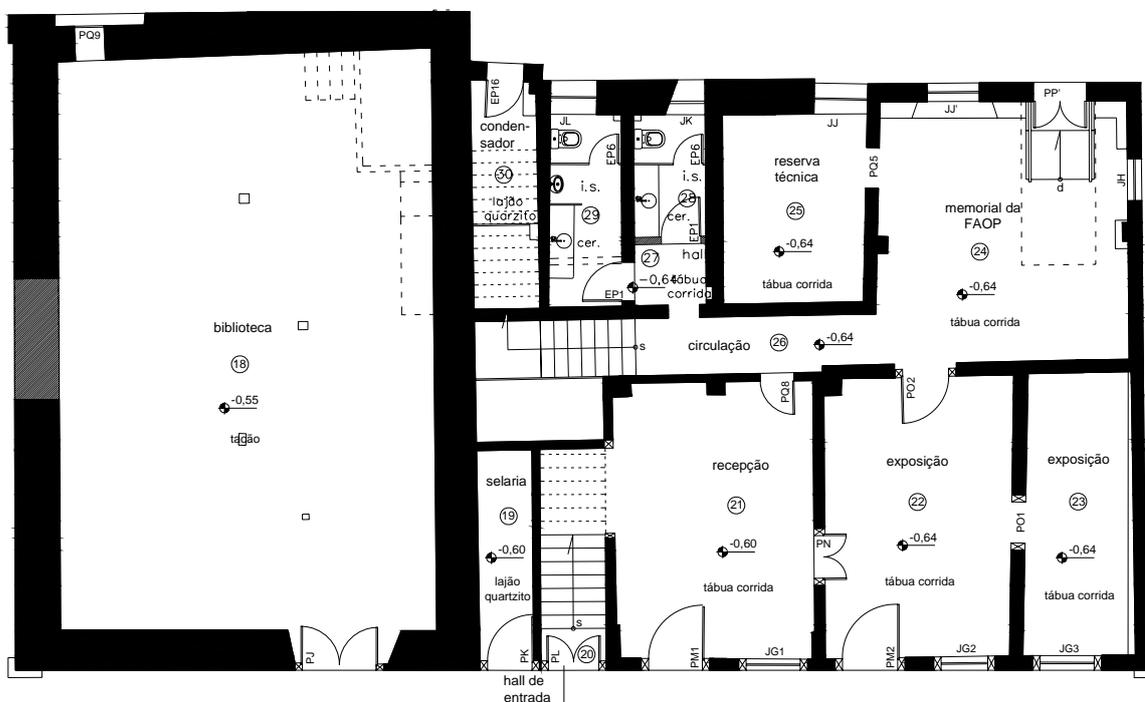


Figura 4. 2 – Planta baixa da Casa Bernardo Guimarães.

Primeiramente foi criado um elevador em estruturas metálica de acesso de pedestres e deficientes físicos, ligados às rampas de acesso aos dois pavimentos envolvidos. Outra utilização da estrutura metálica foi na construção de um mezanino na fachada principal com o objetivo de dar uma vista mais agradável, eliminando-se uma parede cega.

E por fim, e mais aproveitável ao presente estudo, foram utilizadas estruturas metálicas, mais preciso, perfis I e chapas metálicas a fim de reforçar algumas vigas de madeira no salão onde irá situar a nova biblioteca da FAOP.

Todas as vigas receberam um reforço com chapas metálica inserida na região inferior e externa da viga original fixadas com parafusos de aço. Nas vigas mais solicitadas foram inseridos também perfis I metálicos dos dois lados da viga original de madeira, e na menos solicitadas, inseriram perfis I somente de um lado. Outro recurso que utilizaram foi o de emprego de anel metálico para reforçar as extremidades da viga original. Figura 4.3.

4.3 Edificação sede da fazenda São José do Manso, Ouro Preto – MG

Situada entre Ouro Preto e Mariana, no Parque Estadual do Itacolomi cuja importância histórica se deve à referência geográfica do pico para a bandeira de Antônio Dias encontrar o ouro paladiado. A casa sede da antiga fazenda, hoje sede do parque, data do século XVIII, após a descoberta do ouro e ocupação do território pelos bandeiristas. Presume-se que esta edificação tenha sido construída entre 1706 e 1708. Anteriormente chamada de “Vargem da Olaria”, a casa já abrigou diversas funções devido à sua localização estratégica, tais como moradia do guarda mor, fortim, hospedaria, posto de cobrança dos quintos de ouro e vigilância e defesa do acesso às minas de Ouro Preto. Essa pluralidade de usos proporcionou à edificação uma manutenção e duração de aproximadamente, dois séculos e meio.



(a)



(b)

Figura 4. 3 – Perfis I, chapas metálica, e anéis metálicos reforçando vigas de madeiras.

A edificação sede da fazenda São José do Manso tem grande importância por ser um dos raros edifícios existentes em Minas Gerais que testemunha a influência paulista bandeirante. É uma edificação considerada como um exemplar “tardio” da tipologia originária das casas rurais seiscentistas de São Paulo, se diferenciando dos modelos paulistas pelo uso de alvenaria de pedra como técnica construtiva, Figura 4.4.



Figura 4. 4 – Vista interna e externa da Casa da Fazenda São José do Manso

Fonte: TEOBALDO, 2004

Desde a década de 1940, o valor histórico da fazenda é reconhecido pelo Serviço do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, porém, seu tombamento só aconteceu em 1998, juntamente com a intervenção realizada. Já haviam sido realizadas algumas intervenções na construção em 1948, 1956 e 1957. Sobre a intervenção de 1948 sabe-se dos reparos da cobertura havendo poucas referências do estado interno da edificação, sendo mencionada apenas por uma ficha de inventário do D.P.H.A.N. (Departamento do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional) a ameaça de ruínas das paredes, mas nenhuma obra no sentido de estabilizá-las.

Em 1956, consta no relatório geral do 3º distrito do D.P.H.A.N. a reconstrução total da cobertura, fabricação dos pontaletes das tesouras, a demolição e montagem de duas tesouras grandes e quatro pequenas, a estabilização das paredes, limpeza, abertura de caixas para pilares e vigas, colocação de ferragens, fundição dos pilares de concreto, colocação de tesouras, espigões, terças. Em 1957 há o desabamento de parte da cobertura, onde haviam sido aproveitadas algumas peças. No relatório de 1957 consta o

aumento do reforço por meio de novas colunas embutidas de pedra, restauração de vergas de janelas completamente arruinadas, reforço no madeiramento do telhado e conclusão do retelhamento, além da restauração das esquadrias.

Segundo a análise técnica da firma Consultare, as aberturas realizadas para a inserção dos pilares de concreto armado na alvenaria perimetral externa existente – com média de 15 cm de espessura, não abrangendo os 75 cm de espessura das mesmas – na intervenção realizada em 1956 foram os maiores responsáveis pela redução de estabilidade das alvenarias. Além disso, a cinta de concreto introduzida na intervenção da mesma época, não possuía dimensões suficientes para garantir sua função estrutural, porém sua presença também não prejudicava a estabilidade das alvenarias.

Praticamente abandonada depois da morte de seu antigo proprietário, a fazenda foi vendida em janeiro de 1995 ao Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais – IEF/MG, que atualmente está implantando infra-estrutura para abrigar um centro gerencial e turístico voltado para o parque, estando fechada temporariamente ao público. Constatada a situação do mau estado de conservação da construção, o IEF buscou medidas para garantir a recuperação e revitalização da antiga sede da fazenda destinando à edificação um novo uso, transformando-a em Centro de Referência e Interpretação do Parque Estadual do Itacolomi, por meio de um convênio com o IEPHA/MG (2001). Como justificativa foi alegada a preservação do exemplar como marco da presença bandeirista em terreno mineiro, além da permanência da vocação original da “casa do Manso” de sede de uma fazenda por quase três séculos e agora do parque. Devido a essa modificação de uso, pode-se dizer, que este caso, assim como o Parque das Ruínas, trabalha com o conceito de reciclagem.

A obra de intervenção da Fazenda São José do Manso é de 1998 com projeto, selecionado por meio de concurso, dos arquitetos Carlos Alberto Maciel, Danilo Matoso, Flávio Carsalade e Paulo Lopes. O mau estado de conservação em que a edificação se encontrava comprometia sua estabilidade. As alvenarias de pedra mostravam sinais de contínuo processo de degradação de suas peças, consequência do

peso do telhado, da umidade e da degradação das argamassas utilizadas nas alvenarias e revestimentos.

Neste caso, a estrutura metálica utilizada na intervenção possui funções estruturais, mantendo a estrutura e a geometria do telhado, o que permite a manutenção de parte da estabilidade das paredes da construção, uma vez que o peso dos telhados não é mais descarregado sobre as mesmas. Este fato foi um dos fatores que foi relevante na seleção da obra. O tratamento da parte externa e interna da edificação foi dado de forma diferenciada, sendo que interiormente foi conservado o estado em que a construção se encontrava, não esquecendo a estabilização dos elementos necessários.

Deve-se ressaltar que as paredes internas já não existiam mais na época da restauração, permanecendo apenas as espessas paredes externas. Na área interna foram executados um mezanino em estrutura metálica e a sustentação da cobertura, sendo este último realizado em estrutura de aço. Os pilares internos da casa foram executados em estrutura metálica (perfis metálicos novos). Os painéis, em vidro temperado, utilizados para a proteção da alvenaria exposta internamente foram instalados juntamente com a estrutura de sustentação metálica. Este tipo de intervenção pode ser enquadrado na metodologia de inserção.

Quanto às técnicas utilizadas na intervenção, para a sustentação da cobertura foram utilizados pilares metálicos em aço SAC 41 (anticorrosivo), para os pilares de sustentação do mezanino foram fornecidos e instalados perfis do tipo I soldado, Figura 4.5.

O mesmo tipo de perfil foi utilizado na instalação das vigas e travessas do mezanino. Segundo o relatório do IEPHA/MG (2001) houve um acréscimo na estrutura metálica prevista inicialmente devido ao detalhamento estrutural executivo.

Na intervenção realizada na área externa todo o reboco foi demolido. A viga em concreto da varanda também foi demolida e sua sustentação foi executada em estrutura

de aço. Os beirais em beira seveira⁵ foram demolidos e reconstruídos, sendo necessária a realização de uma complementação em pedra nas alvenarias para a execução dos mesmos. Sabe-se que alguns elementos foram previstos inicialmente para serem executados em madeira e substituídos posteriormente pela estrutura metálica.

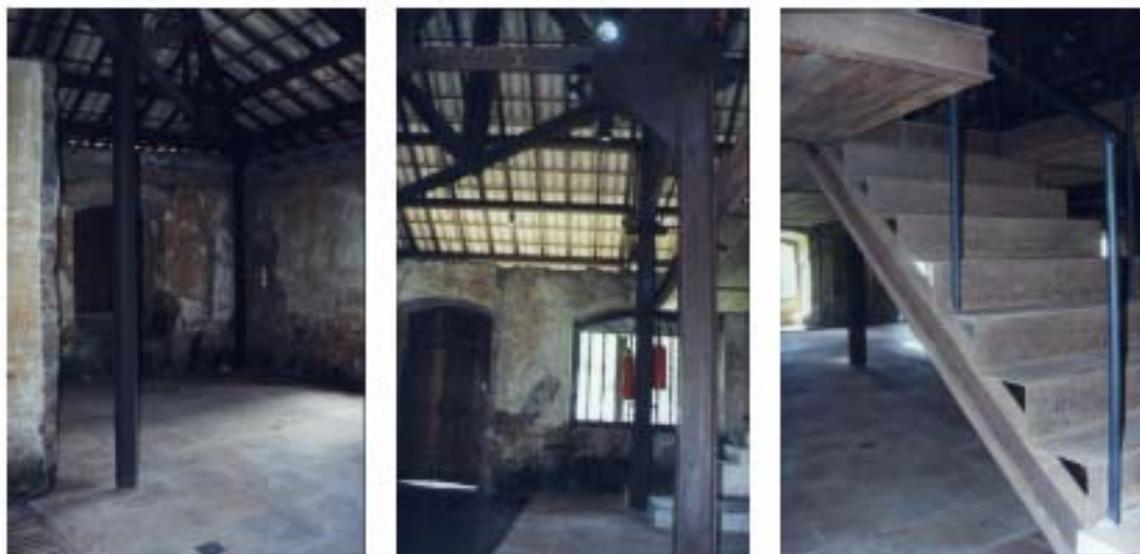


Figura 4. 5 – Pilares metálicos e pilares do mezanino compostos por perfis I soldados.

Fonte: IEPHA/MG, 2001

⁵ Beira seveira: beiral formado por duas ou mais camadas de telhas.

CAPÍTULO V

5. PROCEDIMENTOS PARA INTERVENÇÃO DO AÇO NA MADEIRA

5.1 Metodologia adotada

A proposta é inserir perfis de aço no interior das vigas de madeiras prendendo-as por barras rosqueadas, ou anexar chapas de aço na base inferior da mesma viga por meio de adesivos de alta aderência, ou usar tirantes de aço na região tracionada, a fim de aumentar a capacidade portante da viga de madeira, ou simplesmente recuperar parte da sua capacidade portante. Quando se trata de uma peça num processo de deterioração mais agravada, a inserção funciona assim como uma viga mista de aço mais madeira, apresentando assim, um comportamento de uma viga mista, e não mais simplesmente de uma viga somente em madeira.

Primeiramente, foi identificado em ensaio laboratorial a madeira em questão e seu módulo de elasticidade longitudinal. Visto que se tratava de uma candeia e módulo de elasticidade paralelo as fibras é igual a 6.405.200 kN/m².

De posse desses dados, analisa-se um modelo de elementos finitos no *software ANSYS* (2005), que corresponda às propriedades físicas da madeira, considerando sua anisotropia, ou seja, um elemento que permitisse trabalhar com anisotropia e ou ortotropia. Sabendo-se que a madeira apresenta comportamentos distintos entre suas direções paralelas às fibras, radial e tangencial, e sendo essas ortogonais entre si, adota-se um comportamento ortotrópico para o elemento finito.

Já com o elemento de viga modelado no *ANSYS* (2005), ao inserir suas propriedades ortotrópicas, e considerando outras informações dadas por Pfeil (2003), utiliza-se o módulo de elasticidade longitudinal igual ao seu valor obtido em laboratório, e seus módulos de cisalhamentos, iguais a 7% do longitudinal, dado esse obtido por meio de iteração no *ANSYS*, de modo a compilar o modelo e aproximar-se do valor de 5% especificado pela NBR 7190:1997. Utiliza-se o coeficiente de Poisson igual a 0,35. Esse

valor corresponde à proporção entre a deformação específica transversal e a longitudinal da madeira (Dado cedido pelo Dr. Carlito Calil Júnior, Coordenador do Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira – LaMEM, Escola de Engenharia de São Carlos, USP).

A fim de verificar se os procedimentos de modelagem no *software* ANSYS e se as propriedades estão sendo discriminadas corretamente, considera-se a efeito de comparação das flechas e tensões principais, por meio de um exercício de flexão simples, proposto por Moliterno (1981). Neste caso, considera-se uma viga de madeira de peroba rosa bi-apoiada com carregamento uniformemente distribuído baseada no método das tensões admissíveis, (Anexo A).

Ao obter coerência nos valores esperados na validação do modelo, parte-se para a modelagem dos elementos de viga mista, onde os modelos numéricos apresentados neste trabalho são também propostos para a análise de viga mista aço-madeira em elementos finitos simulados via ANSYS 9.0 (2005). Considera-se uma viga mista simplesmente apoiada, com carregamento uniformemente distribuído.

Tratando-se de restauração de uma viga centenária, é necessário considerar a imperfeição geométrica das peças, uma vez que essa, era lavrada, e também seu estado de deterioração. Assim, determina-se uma nova seção transversal reduzida de modo a representar uma homogeneidade ao longo de toda a viga. Com a seção reduzida já calculada, faz-se a modelagem da viga.

5.2 Problemas na intervenção aço em madeira

Um fator muito comum é a falta da cultura do projeto em madeira, na maioria das vezes, as obras de madeira são executadas sem projeto, baseadas somente na experiência do mestre de obras e do carpinteiro.

Outros fatores são a falta de mão de obra qualificada e ferramentas adequadas para a proposta em questão deste trabalho, tais como serras grandes de raio e

espessura dos dentes iguais à altura e espessura da alma do perfil a fim de promover um rasgo ao longo da viga para inserir futuramente o perfil T invertido.

Também, é necessário um tratamento de impermeabilização da madeira e de proteção do aço por meio de pinturas, para não permitir que esses venham sofrer danos provocados pela umidade.

5.3 Estudo de caso – Elemento estrutural de madeira analisado

Neste estudo de caso analisa-se um elemento estrutural encontrado no salão da casa Bernardo Guimarães, atual biblioteca da FAOP. Este salão possui três vigas internas iguais de madeira, identificadas como candeia, com vãos de 6,90 m e seção transversal de (21 x 31 cm), Figura 5.1.

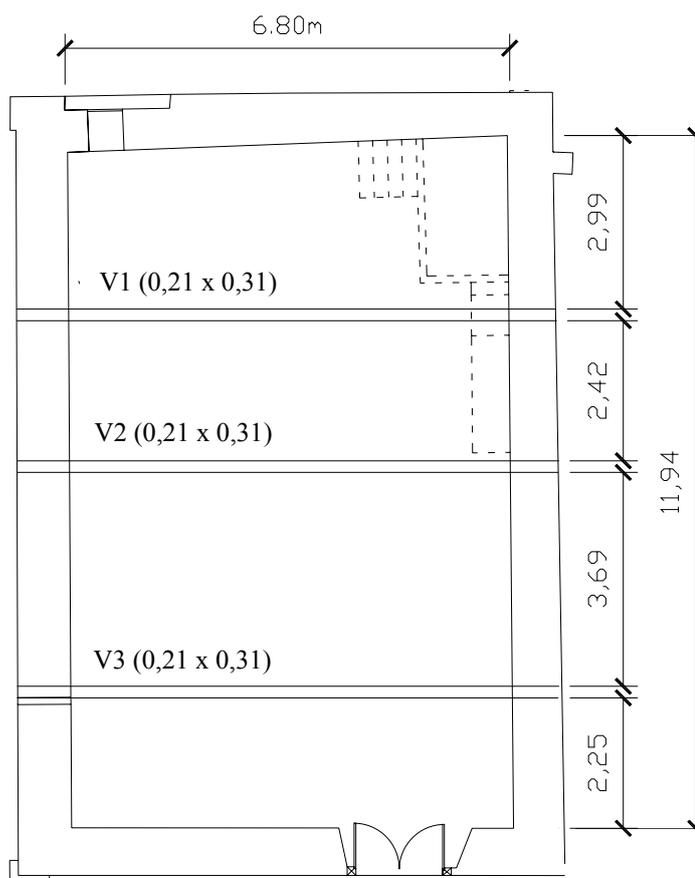


Figura 5. 1 – Planta de formas do salão analisado

5.3.1 Caracterização da madeira

Para se utilizar uma determinada espécie de madeira, é imprescindível o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas. A madeira em questão foi caracterizada como candeia, identificada por meio de inspeções visuais, observando-se seu cerne de dureza média e cor variando para bege, além do seu cheiro característico. Desse modo, para a determinação das propriedades da candeia, realizou-se ensaios experimentais no Departamento de Floresta da Universidade Federal de Viçosa, coordenados pelo professor Marcio Sarmet Sampaio. Esses ensaios levam em consideração os valores de variação dos resultados inerentes ao próprio material e à execução dos ensaios. Neste caso foram realizados os ensaios de compressão paralela às fibras, flexão estática, e cisalhamento.

No ensaio de compressão paralela às fibras são ensaiados corpos de prova extraídos conforme a NBR 7190:1997, que diz que os corpos de provas devem ser extraídos nas dimensões de 0,05 x 0,05 x 0,15 m. No entanto, se tratando de corpos de provas de elementos estruturais de madeira centenários, optou-se em extraí-los com as dimensões de 0,02 x 0,02 x 0,06 m, respeitando a proporção de 1 x 1 x 3 utilizada pela NBR 7190:1997. As seções transversais dos corpos de prova são medidas com aproximação de 0,0001 m. Os corpos de prova são rompidos entre os pratos de uma prensa, provida de articulação conveniente em uma das cabeças. A taxa de carregamento é de aproximadamente 980665 kN/m²/min. Figura 5.2.

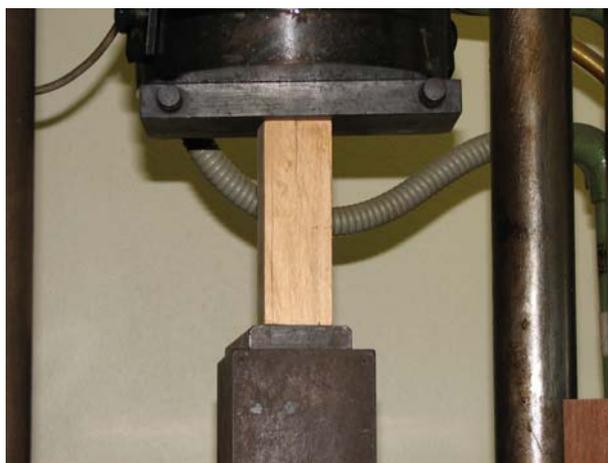


Figura 5. 2 – Ensaio de compressão paralelo às fibras

A carga máxima atingida para romper o corpo de prova é expressa em kN, e é dividida pela seção transversal do mesmo. O módulo de elasticidade à compressão é calculado dividindo a carga específica correspondente ao limite de proporcionalidade pela deformação unitária, com “E” expresso em kN/m².

No ensaio de flexão estática, ensaio esse realizado por minha opção, são ensaiados corpos de prova de 0,02 x 0,02 x 0,30 m, extraídos conforme anexo B da NBR 7190:1997. O ensaio consiste em carregar por meio de uma carga central os corpos de prova, apoiados nos extremos, fazendo-os fletir até produzir a ruptura, Figura 5.3.

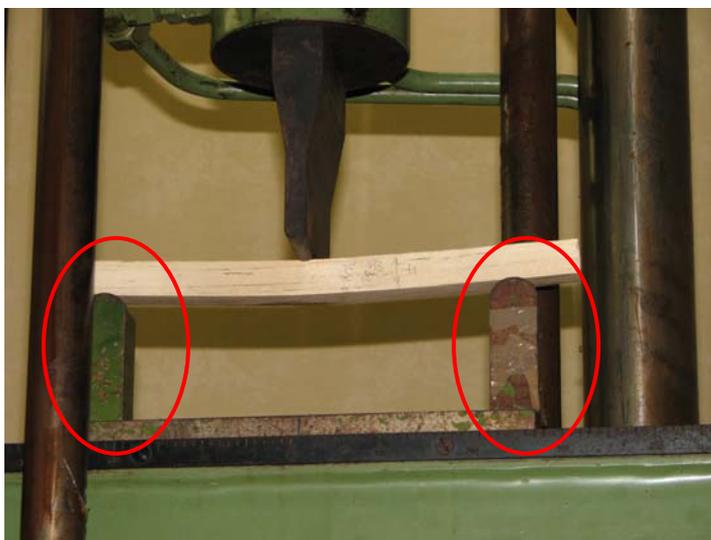


Figura 5. 3 – Ensaio de flexão estática. Corpo de prova de madeira sobre cutelos de aço.

Os corpos de prova foram apoiados sobre cutelos de aço, de forma cilíndrica, (Figura 5.3), com raio de 0,015 m e a carga é aplicada tangencialmente aos anéis de crescimento, por meio de um cutelo central, com formato e dimensão dos apoios. O vão livre que se processou a flexão é de 0,24 m. A velocidade de aplicação da carga admitida é tal que a ruptura seja provocada num tempo mínimo de 2 min.

A resistência à ruptura é dada por:

$$\sigma_f = \frac{M}{W} = \frac{3 Pl}{2 bh^2} \quad (5.1)$$

onde: M é o momento fletor resistido pelo corpo de prova,(N.m); P é o carga de ruptura, (N); b é a base da seção transversal do corpo de provas,(cm); h é a altura da seção transversal do corp de provas, (cm); e W é o seu módulo de resistência, (m³);

A relação entre o vão livre e a flecha atingida na ruptura (L/f) é o índice aproximado da rigidez da madeira. Para ensaiar corpo e prova secos ao ar, os resultados foram corrigidos para 15% de umidade, conforme explica a NBR 7190:1997. A tensão limite de proporcionalidade e o módulo de elasticidade são obtidos por meio da curva mostrada na Figura 5.4.

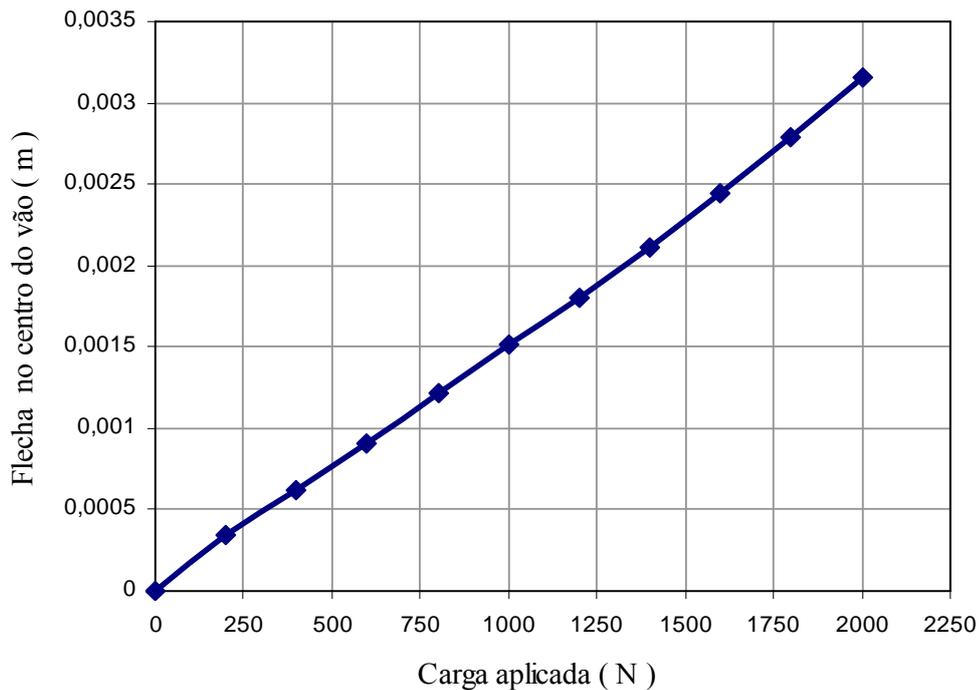


Figura 5. 4 – Flecha no centro do vão x carregamento, via ensaio de flexão estática.

Neste caso o módulo de elasticidade é calculado para o limite de proporcionalidade por:

$$E = \frac{L^3 Q}{4 fbh^3} \quad (5.2)$$

onde L é o vão livre do corpo de prova, (m); Q é a carga correspondente ao limite de proporcionalidade, (N); f é a flecha lida no centro da peça, (m); b e h são as dimensões da seção transversal, (m).

No Cisalhamento paralelo às fibras a forma e as dimensões dos corpos de prova utilizados estão prescritas na norma NBR 7190:1997. Os ensaios foram realizados em uma prensa, a “seção de trabalho” foi medida com aproximação de 0,1 mm e os resultados foram expressos em N/cm². A carga foi aplicada à razão de 250 N/cm² por min.

5.4 Modelo numérico

Os modelos numéricos desenvolvidos são elaborados com base em elementos pré-definidos, disponibilizados na biblioteca interna do *ANSYS*, (2005), os quais serão apresentados a seguir. Na escolha dos elementos levam-se em consideração aspectos como número de graus de liberdade, esforço computacional e, principalmente, representatividade perante a composição real de cada material envolvido na análise proposta.

5.4.1 Elemento *solid64*

O elemento *solid64*, esquematizado na Figura 5.5, é utilizado na discretização da viga de madeira. A opção por um elemento do tipo sólido se deve ao fato de um futuro trabalho com o objetivo de simular efeitos localizados como a concentração de tensões junto aos conectores de cisalhamento.

Além disso, a utilização de um elemento do tipo sólido na representação da viga de madeira possibilitará, em trabalhos futuros, a análise do campo de temperatura na mesma, no que se refere ao estudo de vigas mistas em situação de incêndio. O elemento *solid64* possui oito nós, cada um com três graus de liberdade, sendo eles translações segundo os eixos x , y e z . Esse elemento é capaz de simular o comportamento de

materiais como a madeira, ou seja, fendas na tração e esmagamento na compressão. Os módulos de elasticidades transversais e longitudinais podem ser incluídos em um tópico das propriedades do elemento.

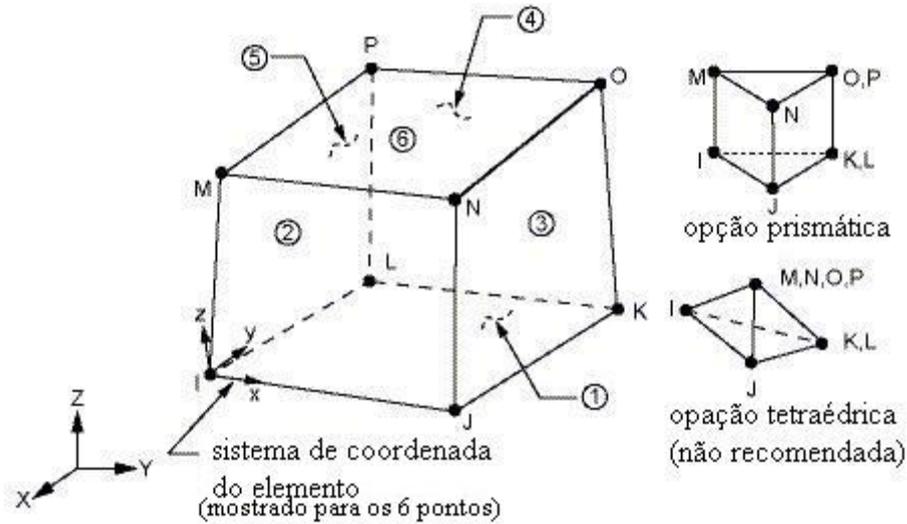


Figura 5. 5 – Elemento finito *solid64*.

Fonte: ANSYS, 2005.

5.4.2 Elemento *shell43*

O elemento *shell43* (Figura 5.6) é utilizado para discretizar o perfil de aço. Trata-se de um elemento plano, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó, três translações e três rotações. O elemento em questão possui deformação linear no plano em que está contido, e permite a consideração de não-linearidade do material, além de outras características não utilizadas nesta análise.

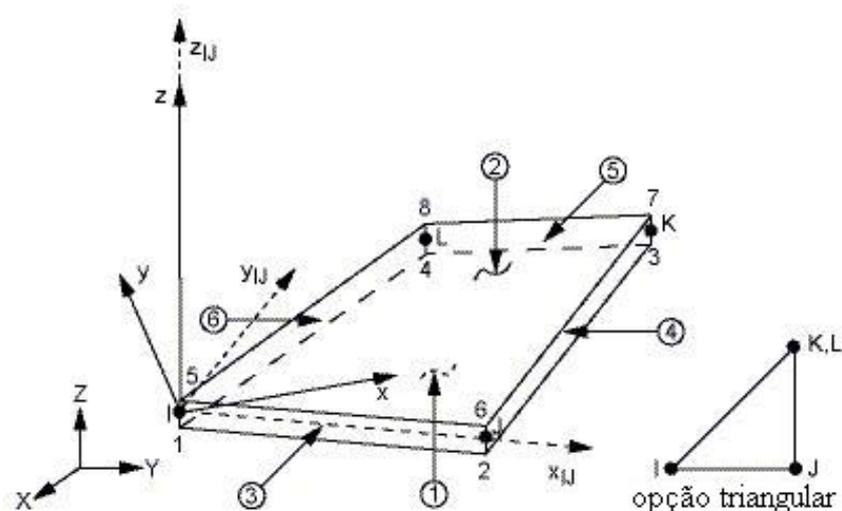


Figura 5. 6 – Elemento finito *shell43*.

Fonte: ANSYS, 2005.

5.4.3 Elemento *beam189*

O elemento *beam189* (Figura 5.7) é utilizado na modelagem das barras rosqueadas. Trata-se de um elemento de viga, com três nós (I, J e K) e seis graus de liberdade por nó, o que inclui as translações e as rotações segundo os eixos x, y e z. O elemento proporciona uma modelagem mais simples dos conectores, sem que com isto se perca representatividade nos resultados. O elemento responde a esforços de flexão, possibilita a consideração da não linearidade do material, e ainda permite configurar a forma da seção transversal, no caso circular.

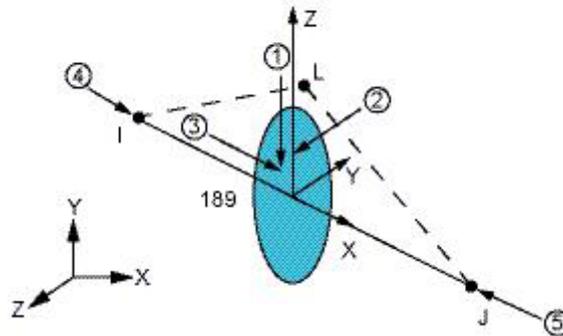


Figura 5. 7 – Elemento finito beam189.

Fonte: ANSYS, 2005.

5.4.4 Elementos *conta 173* e *targel 170*

Os elementos, *conta 173* e *targel 170* (Figura 5.8), são utilizados a fim de representar o contato existente na interface entre viga de madeira e a chapa de aço. São utilizados em análises tridimensionais com contato do tipo superfície-superfície, capazes de simular a existência de pressão entre os elementos, quando há contato, e a separação entre os mesmos elementos, quando não há contato. O par de contatos utilizado permite ainda a consideração de atrito e coesão (adesão) entre as partes. As características geométricas dos elementos *conta 173* e *targel 170* (Figura 5.8) variam de acordo com o tipo de elemento sobre o qual eles são aplicados.

5.4.5 Elemento *Link8*

O elemento *link8* (Figura 5.9), é utilizado a fim de representar um tirante de aço, fixado entre chapas de aço de topo, por sua vez, presas às bordas da viga de madeira. Trata-se de um elemento de barra, com dois nós (I e J) e 1 grau de liberdade por nó, o que inclui somente o deslocamento axial. O elemento proporciona uma modelagem mais simples e responde a esforços de tração.

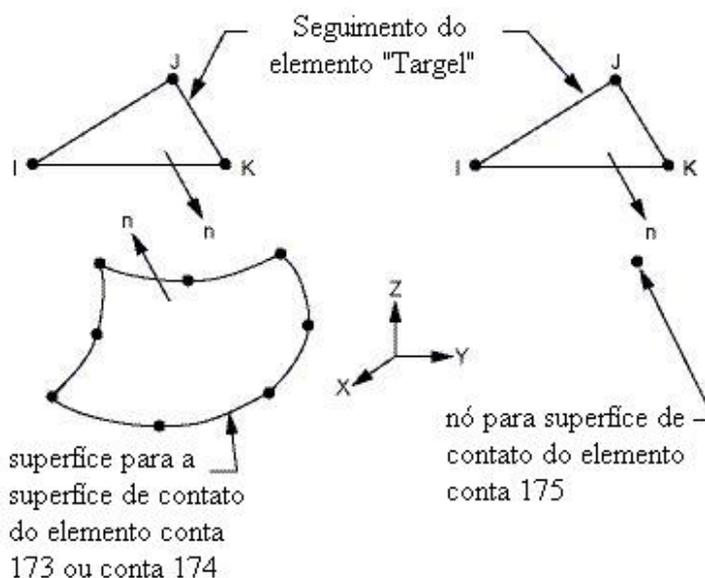
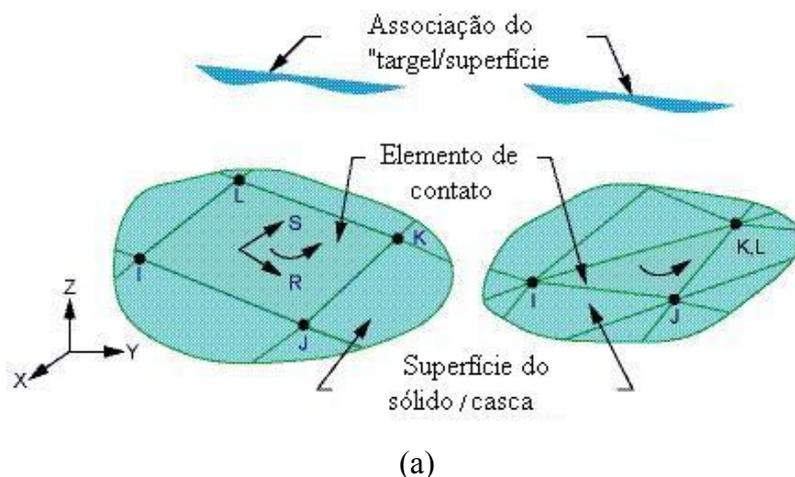


Figura 5. 8 – Elementos finitos (a) *conta 173* e (b) *target 170*.

Fonte: ANSYS, 2005.

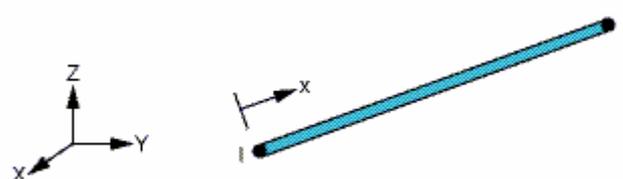


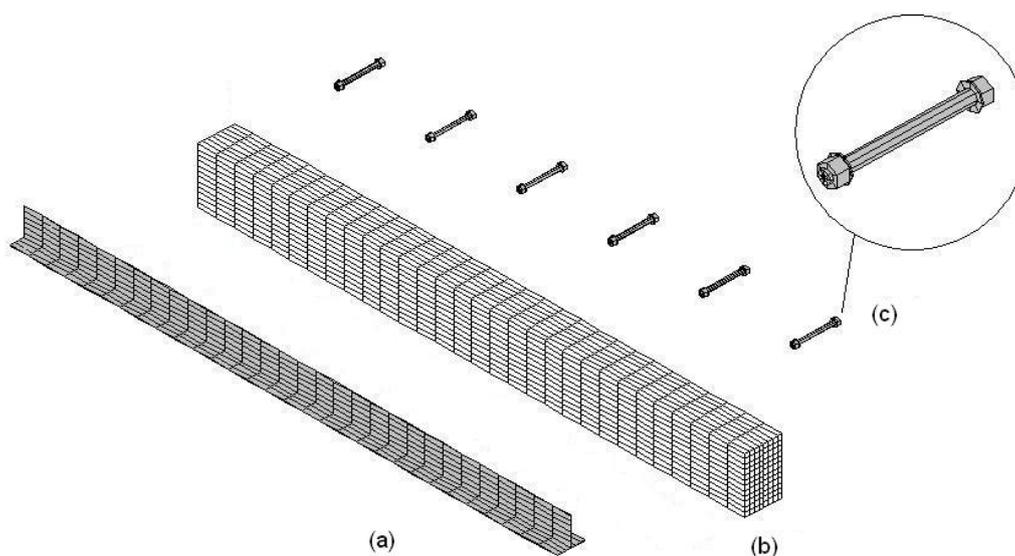
Figura 5. 9 - Elementos finitos *link8*.

Fonte: ANSYS, (2005).

5.5. Geração da malha numérica

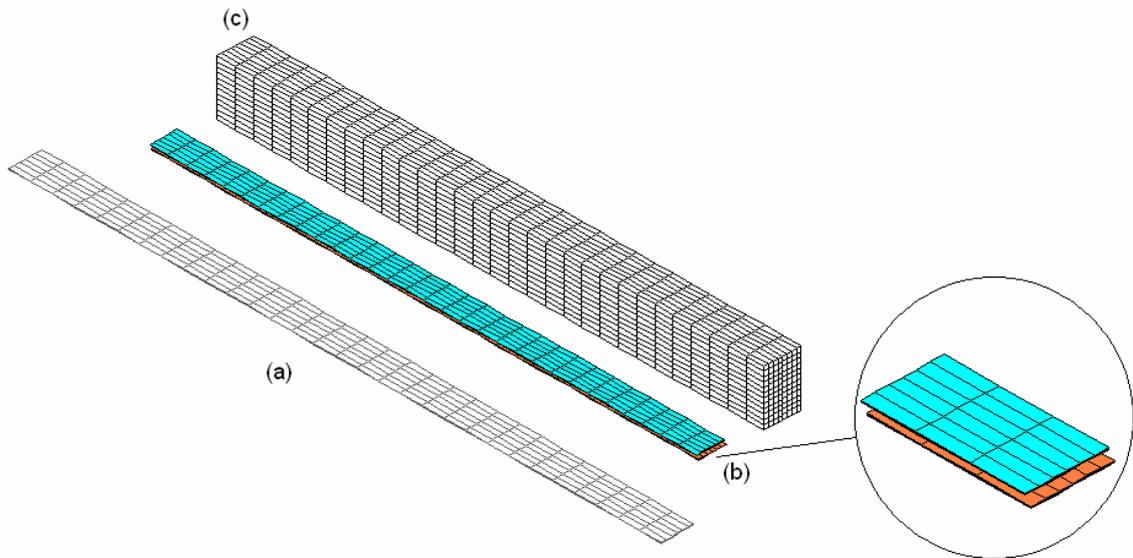
Os modelos desenvolvidos são constituídos por conjuntos de elementos sendo eles: a viga de madeira; o perfil de aço e barras rosqueadas; a barra de aço e par de contatos; e o tirante fixado à viga de madeira por meio de chapas de aço de topo, Figuras de 5.10 a 5.12. No grupo referente à viga de madeira é levada em conta a anisotropia, considerando para efeito de análise numérica, a madeira como ortotrópica.

Cada conjunto foi discretizado separadamente, porém de forma a coincidir os nós de cada um na interface entre eles, possibilitando o acoplamento entre tais conjuntos, realizado por meio destes nós.



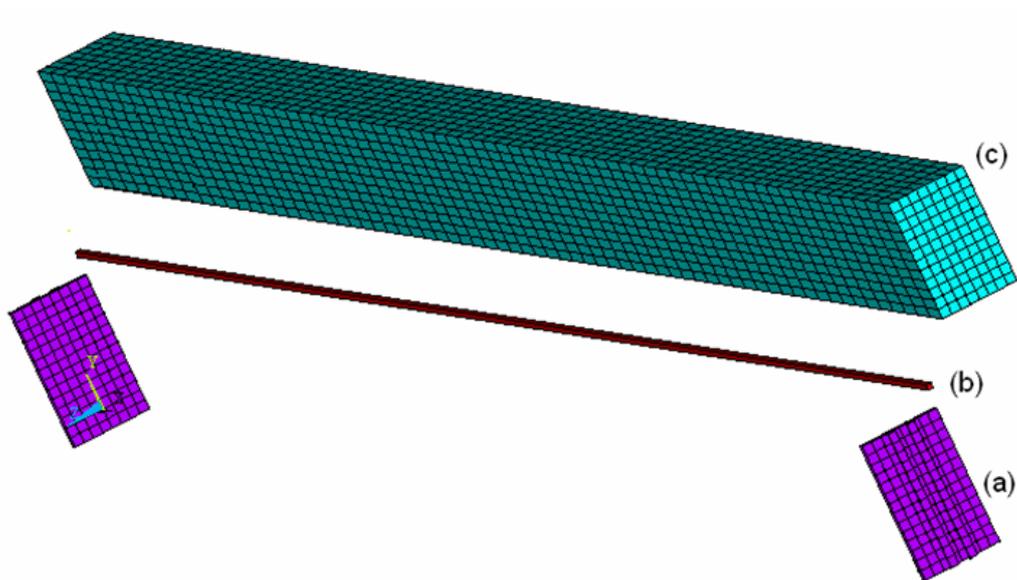
(a) perfil de aço, (b) viga de madeira e (c) barras rosqueadas.

Figura 5. 10 – Malha em relação às peças consideradas.



(a) chapa de aço, (b) par de contatos e (c) viga de madeira.

Figura 5. 11 – Malha em relação às peças consideradas.



(a) chapa de topo, (b) tirante de aço e (c) viga de madeira.

Figura 5. 12 – Malha em relação às peças consideradas.

No grau de refinamento da malha leva-se em consideração o esforço computacional e a confiabilidade do resultado. Alguns fatores, citados a seguir, estabeleceram os critérios adotados para a definição da malha.

5.5.1 Discretização das barras rosqueadas

Cada barra rosqueada é discretizada por meio de um elemento do tipo *beam189*, sendo que esse único elemento simboliza o corpo e a porcas das barras rosqueadas, como ilustrada na Figura 5.13, lembrando que o elemento *beam189* possui três nós, um em cada extremidade e um nó intermediário.

A simplificação comentada anteriormente fica clara quando observada a procura do comportamento do conjunto, viga mista à flexão simples, e não o comportamento da ligação com a barra rosqueada e os elementos de aço e madeira.

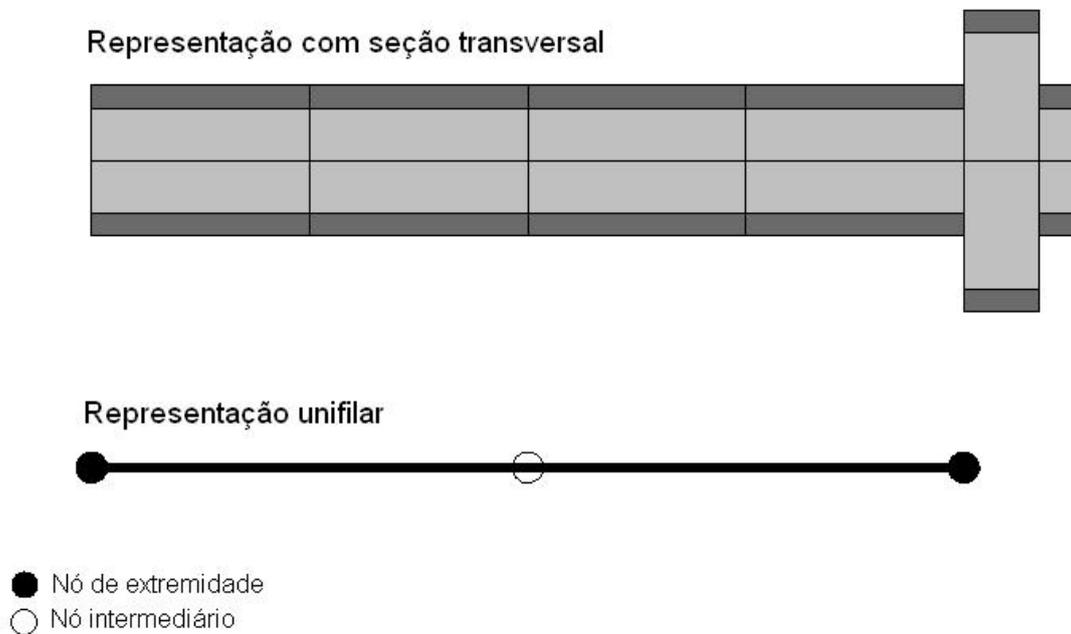


Figura 5. 13 – Discretização da barra rosqueada.

É importante salientar que se trata de um elemento unifilar. Para uma melhor visualização os mesmos conectores são simbolizados com sua seção transversal na forma volumétrica, como mostrado na Figura 5.13.

5.5.2 Discretização da viga de madeira

A divisão da malha na viga de madeira nas direções x, y e z, se dá devido à necessidade dos nós coincidirem com os nós da malha do perfil e os nós da barra rosqueável, Figura 5.14.

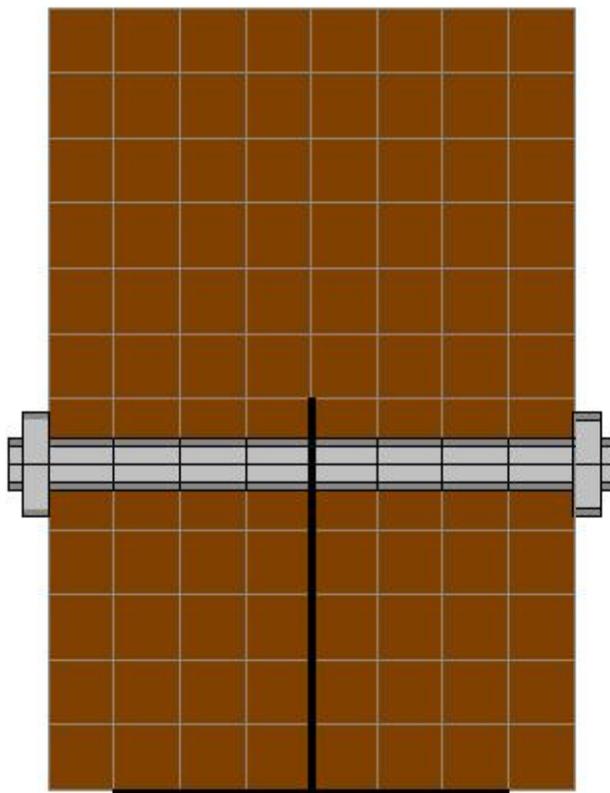


Figura 5. 14 – Viga de madeira discretizada.

5.5.3 Discretização do perfil de aço

Conforme apresentado anteriormente a discretização adotada para as barras rosqueadas e para a viga de madeira, respeita os aspectos de interesse (conexão dos nós). No caso do perfil metálico, o único aspecto a ser respeitado é a concordância em relação à malha adotada para a viga de madeira, de forma a coincidir os nós desses dois grupos de elementos, Figura 5.14 e 5.15.

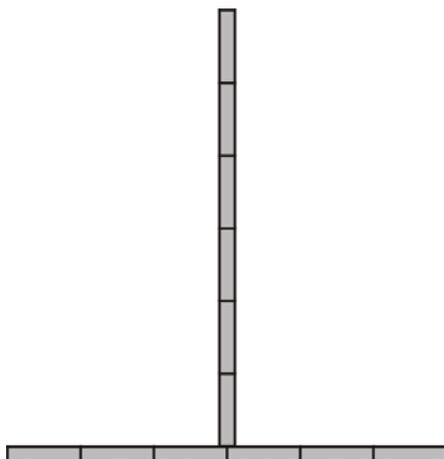


Figura 5. 15 – Perfil de aço discretizado

5.5.4 Discretização do tirante e das chapas de topo

A discretização adotada para os tirantes é de um elemento de barra de aço, e utilizando somente um elemento de malha, condição do *ANSYS 9.0*, (2005) para o elemento Link8. No caso das chapas de topo, essas são modelas semelhantes ao perfil T invertido, respeitando a concordância em relação à malha adotada para a viga de madeira, de forma a coincidir os nós desse grupo de elementos, Figura 5.16.

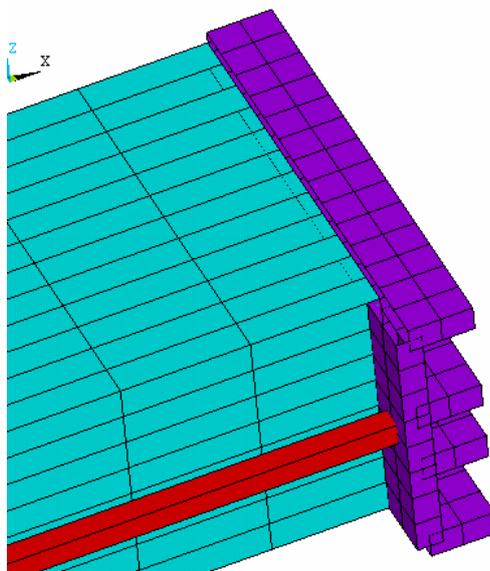


Figura 5. 16 – Tirante e chapa de topo.

5.6 Validação do modelo numérico

Neste tópico é analisado o exemplo de flexão simples, proposto por Moliterno, (1981), e as flechas são calculadas pelo método da linha elástica, (Anexo A), e também pelo método dos elementos finitos via *ANSYS 9.0*, (2005), Figura 5.17. Neste estudo avaliam-se os tipos de elementos finitos mais adequados a serem utilizados junto às suas características do elemento, no caso a madeira. O elemento em questão envolve uma malha retangular com um total de 18.711(dezoito mil setecentos e onze nós), e 16.000 (dezesesseis mil) elementos de malha, Figura 5.18.

Os valores obtidos, via modelo numérico (Figura 5.19), são superiores aos obtidos pelo método da linha elástica (solução exata), como se esperava se tratando de cálculo de estruturas.

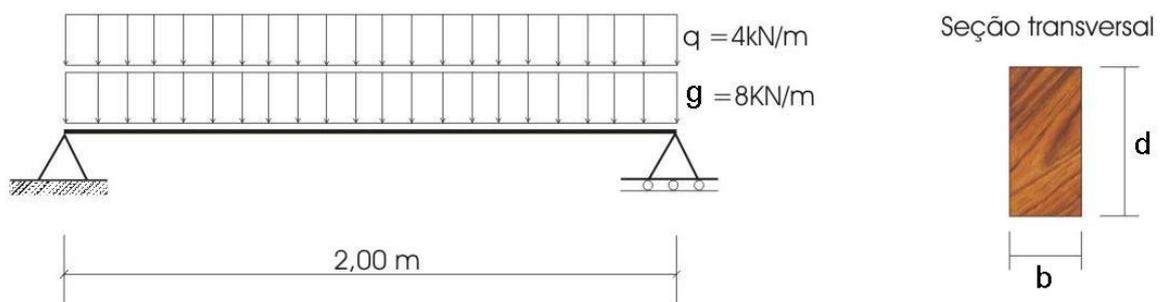


Figura 5. 17 – Modelo da viga com carregamento aplicado.

Aplica-se um aumento de carga gradativo, tanto para o método dos elementos finitos, quanto para o método da linha elástica, conforme resultados apresentados na Tabela 5.1 e Figura 5.20. Com os resultados obtidos pode-se comparar o comportamento do elemento estrutural e seu deslocamento em ambos os métodos, procurando explicar a eficiência do modelo numérico em elementos finitos adotado e a inserção das propriedades físicas da madeira no mesmo.

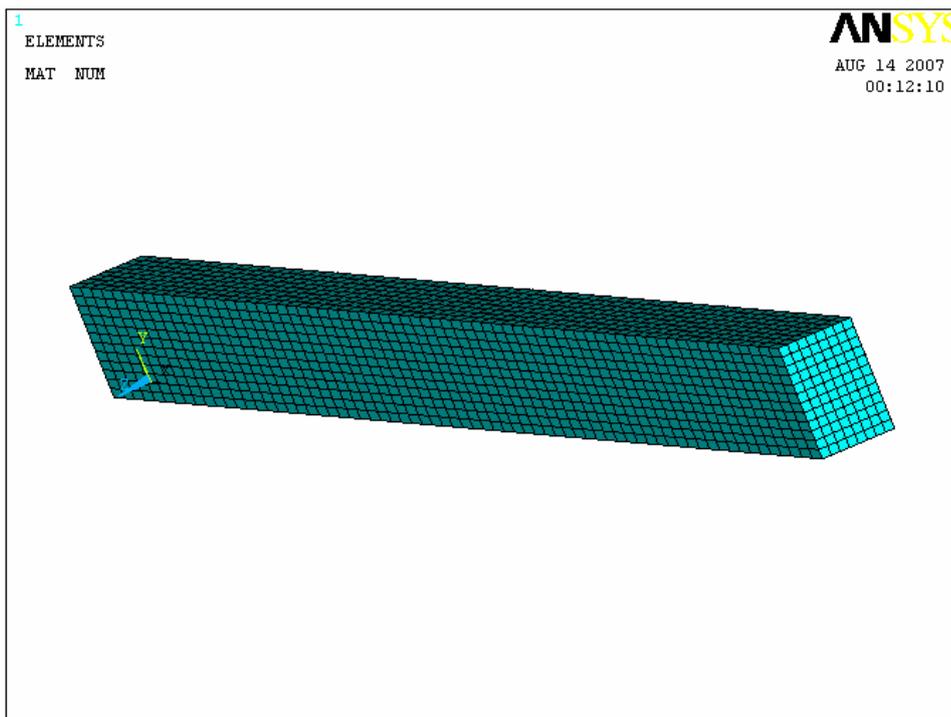


Figura 5. 18 – Malha da viga analisada numericamente.

Fonte: ANSYS, 2005

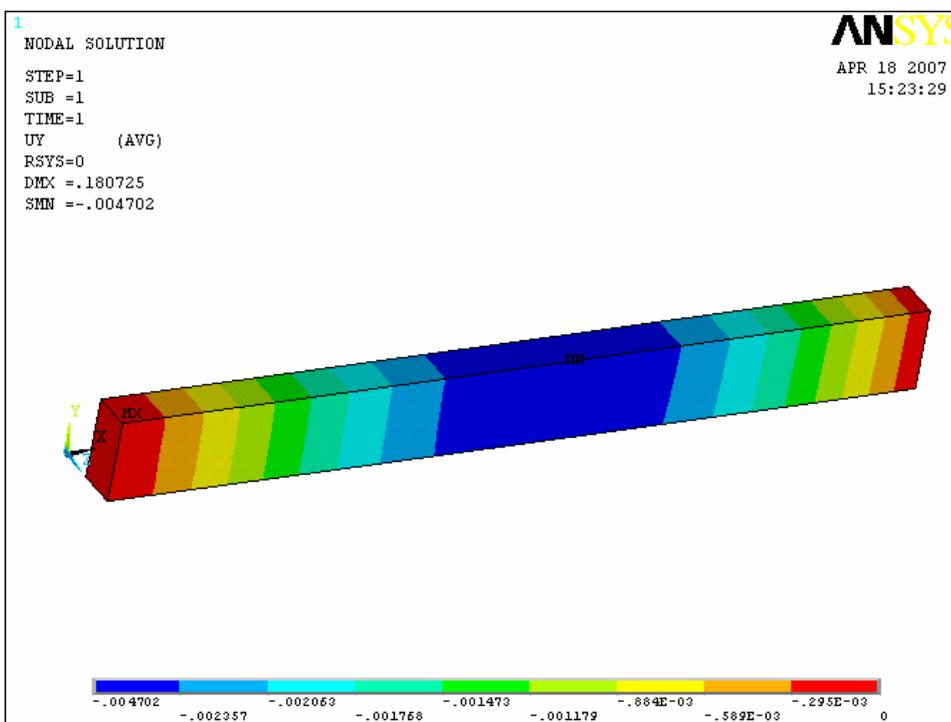


Figura 5. 19 – Deslocamento da viga analisada numericamente.

Fonte: ANSYS, 2005

Tabela 5. 1 – Resultados obtidos pela linha elástica e pela análise numérica.

Linha Elástica		Método dos Elementos Finitos	
Carregamento (g+q)	Flecha “ f “	Carregamento (g+q)	Flecha “ f “
(N)	(m)	(N)	(m)
12000	0,0040	12000	0,0047
13000	0,0043	13000	0,0051
14000	0,0046	14000	0,0055
15000	0,0050	15000	0,0059
16000	0,0053	16000	0,0063
17000	0,0056	17000	0,0067
18000	0,0060	18000	0,0070
19000	0,0063	19000	0,0074
20000	0,0066	20000	0,0078
21000	0,0070	21000	0,0082

Observando os valores mostrados na Tabela 5.1 e Figura 5.20, verifica-se que há uma diferença entre os valores encontrados pelos dois métodos. Assim, torna-se necessário calcular o erro absoluto, a fim de validar os resultados obtidos via simulação numérica, utilizando elementos finitos, comparados aos analíticos, via método da linha elástica (Anexo B).

Utilizando-se a definição de erro (Anexo B), obtém-se um erro de aproximadamente 18 % entre os valores obtidos, via método analítico e numérico.

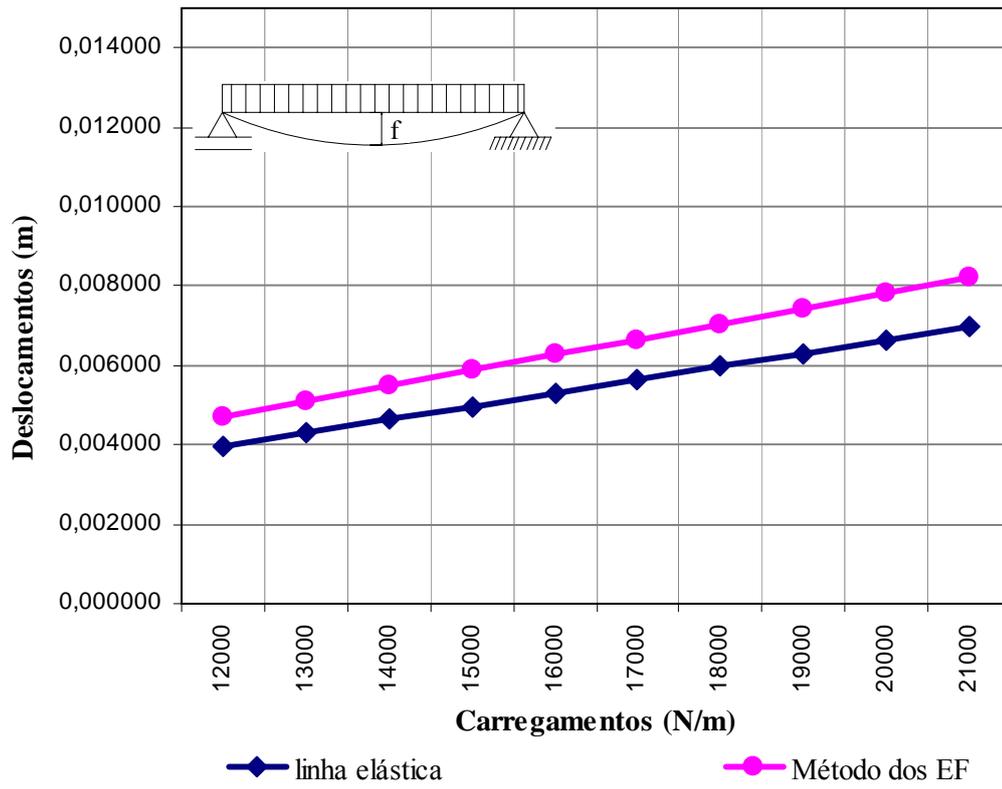


Figura 5. 20 – Flecha máxima para os dois métodos analisados.

CAPÍTULO VI

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Estudo de caso

Faz-se aqui análise de um elemento estrutural de madeira, mais propriamente, uma viga, presente na Casa Bernardo Guimarães. A proposta é um reforço da mesma com a inserção de perfis metálicos, ou tirantes de aço, a fim de manter o aspecto estético, além de preservar uma peça centenária.

Como material metálico utiliza-se o aço ASTM A-36, tanto para o perfil T como para a chapa, barras de aço rosqueadas com porcas e arruelas, adesivo de alta aderência, e tirantes de aço. Figura 6.1. O elemento estrutural analisado é uma viga de madeira candeia com seção transversal de 21 x 31 cm e vão livre de 6,9 m, submetida a um carregamento de parede de pau-a-pique.

Os pesos específicos adotados para os materiais são referentes aos valores sugeridos pela norma NBR 6120:1980. A carga devido ao peso próprio é obtida por meio de uma combinação entres os pesos específicos da argila e da madeira com suas respectivas proporções que compõem o peso próprio da parede de pau-a-pique. A carga variável é determinada conforme a sua função de utilização sobre a estrutura, neste caso a função de utilização sobre a estrutura a ser analisada é para escritório, e é obtida pela norma NBR 6120:1980. As cargas permanentes e as variáveis utilizadas para este estudo de caso são especificadas na Tabela 6.1.

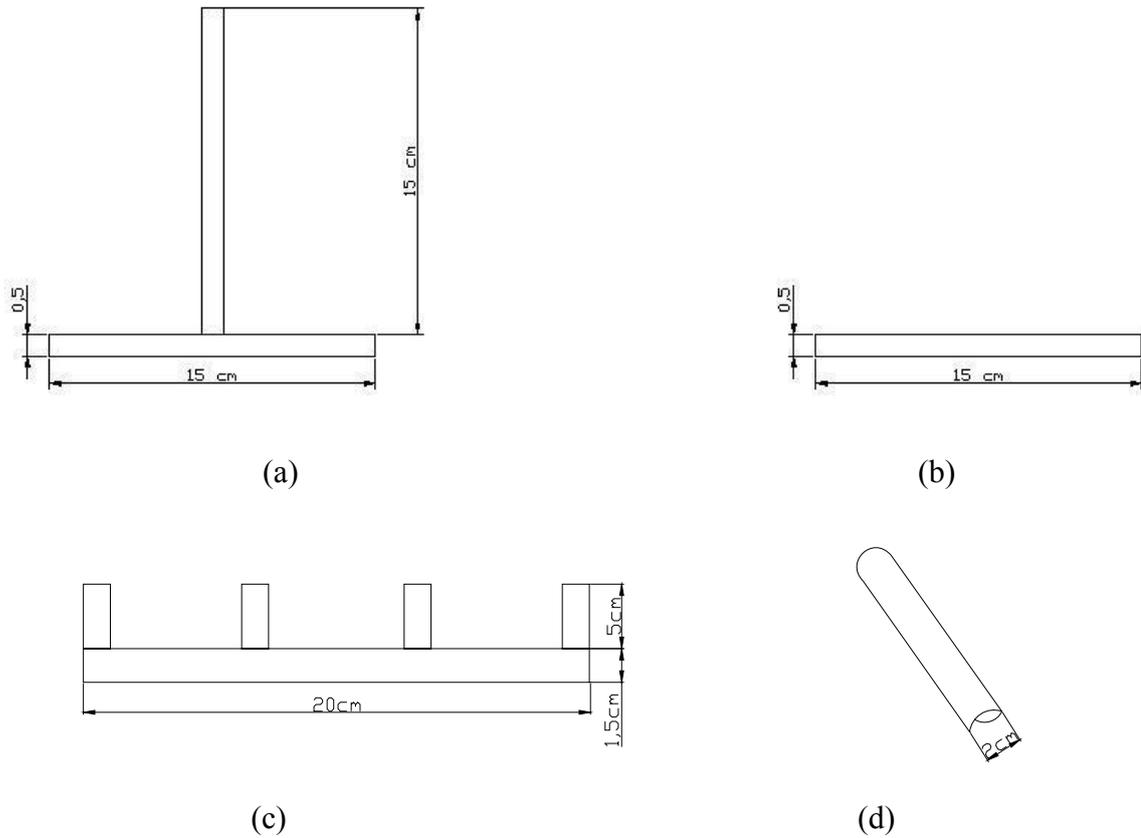


Figura 6. 1 – Elementos metálicos utilizados para reforço estrutural, (a) perfil T, (b) chapa de aço, (c) chapa de aço de topo e (d) tirante de aço.

Tabela 6. 1 – Composição de cargas

Cargas Permanentes		
Tipo de carregamento	Símbolo	(kN/m)
Parede	F_g	4,73
Cargas Variáveis		
Tipo de carregamento	Símbolo	(kN/m)
Carga variável para escritório	F_q	0,40

Segundo a norma NBR 7190:1997, o deslocamento máximo para viga de piso suportando os acabamentos e sujeitos a trincas (alvenaria, painéis rígidos, pisos, etc), é dado por:

$$\delta_{\max} = \frac{L}{350} = \frac{690}{350} = 1,97 \text{ cm} \tag{6.1}$$

onde δ_{\max} é o deslocamento máximo obtido no meio do vão da viga (cm); L é o comprimento do vão livre da viga (cm).

Para a aplicação do carregamento distribuído na viga (carga máxima) é preciso primeiramente fazer combinação entre a carga permanente e a variável conforme prescrito na norma NBR 7190:1997, dessa forma a combinação de carregamento é representada por:

$$Q_c = F_g + F_q \quad (6.2)$$

onde Q_c é a carga combinada solicitante (kN/m); F_g é a carga devido a ação permanente (kN/m); e F_q é a carga devido a ação variável (kN/m). Sendo assim, para o carregamento da viga de madeira (carga de projeto), Q_c tem-se:

$$Q_c = 4,73 + 0,40 \approx 5,13 \text{ kN/m} \quad (6.3)$$

6.2 Avaliação das propostas sugeridas

Nesta primeira análise, estuda-se a viga de madeira candeia adotada para o estudo de caso e a carga de projeto. Utiliza-se as propriedades físicas da madeira candeia, determinadas em laboratório, Figura 6.2.

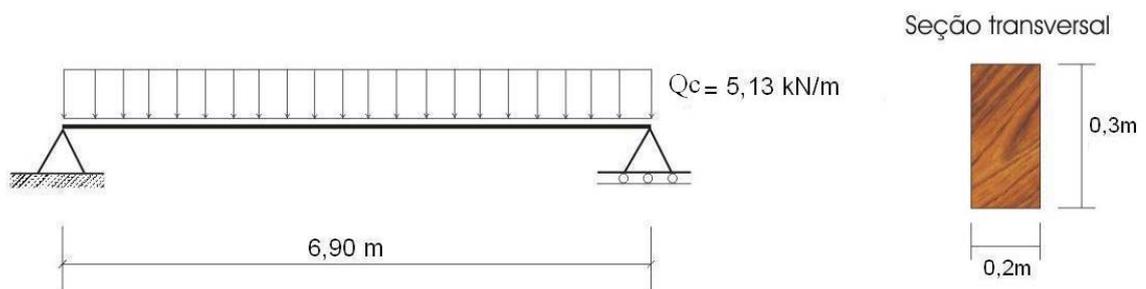


Figura 6. 2 – Modelo da viga de madeira candeia com o carregamento aplicado.

A proposta de estrutura é modelada em três dimensões no *software ANSYS 9.0* (2005) como apresentado na Figura 6.3. Nesta modelagem são utilizados 6624 elementos *Solid64*, com 8190 nós. Após modelagem, aplica-se o carregamento q_d , a gravidade de $9,8 \text{ m/s}^2$ e as condições de contorno, sendo que o movimento está restringido aos eixos x e y na borda esquerda, e na borda direita, somente ao eixo y . Na Figura 6.3 é apresentada a malha utilizada na modelagem numérica e na Figura 6.4 é apresentado o deslocamento da viga em relação ao eixo y .

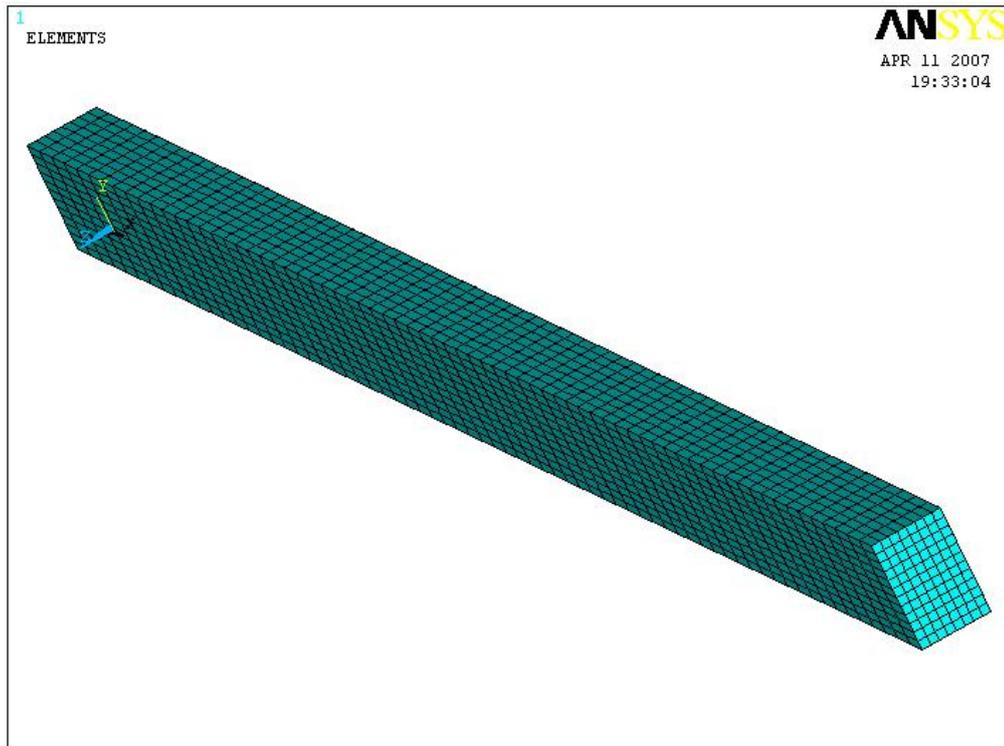


Figura 6. 3 – Modelo da viga de madeira candeia isolada em elementos finitos.

Fonte: ANSYS, 2005.

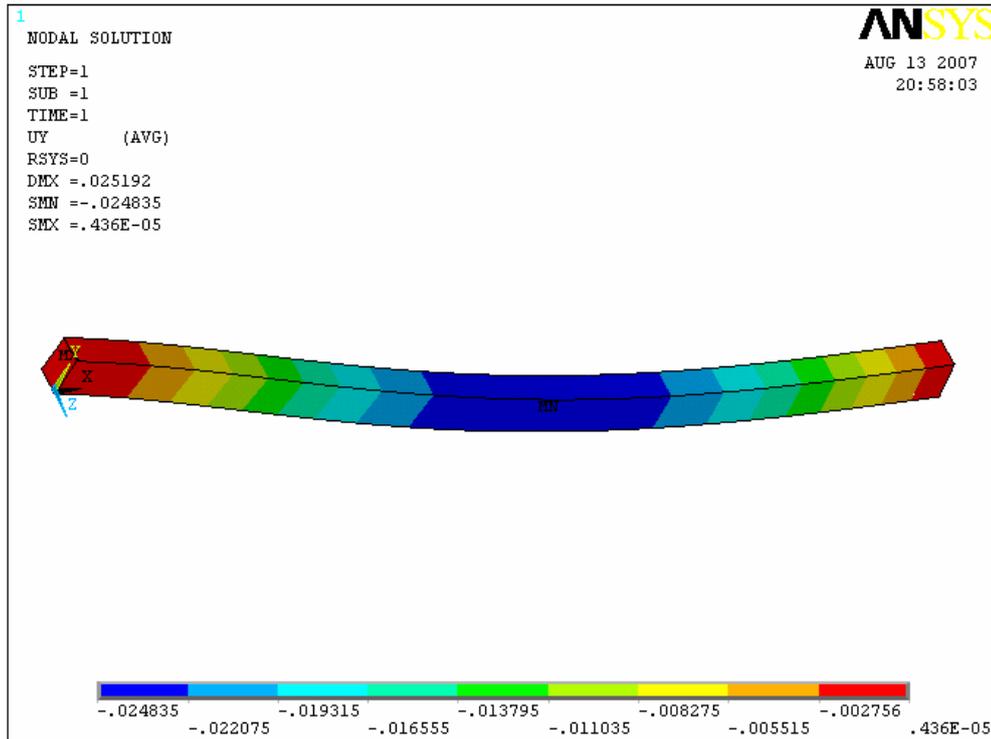


Figura 6. 4 – Deslocamento da viga de madeira candeia isolada em relação ao eixo y.

Fonte: ANSYS, 2005.

Outra análise é da viga de madeira candeia adotada para o estudo de caso, com o perfil T inserido em sua alma ao longo de todo seu comprimento. Utiliza-se as mesmas características do elemento finito, propriedades físicas e carregamentos do modelo anterior. Vale ressaltar que o perfil metálico T, por sua vez também recebe todas as suas respectivas propriedades físicas estabelecidas pelo fabricante, Figura 6.5.

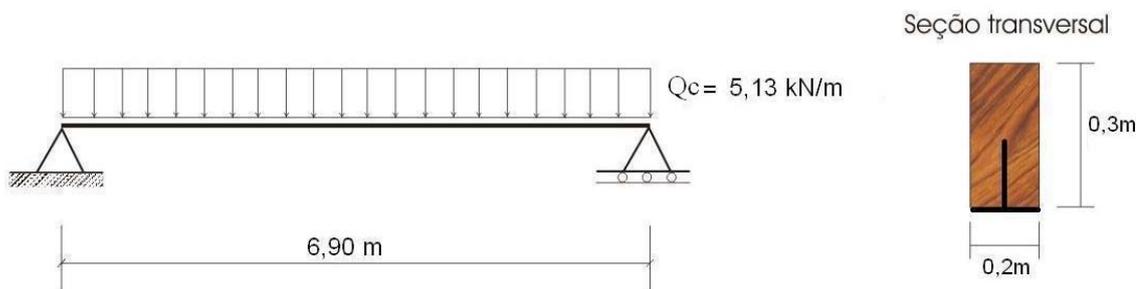


Figura 6. 5 – Modelo da viga mista, perfil T de aço e madeira com o carregamento aplicado

Essa proposta de estrutura é modelada em três dimensões no *software ANSYS 9.0* (2005) como apresentado na Figura 6.6. Nesta modelagem são utilizados 6624 elementos *Solid64* e 828 elementos de *Shell43*, totalizando 7452 elementos e 9170 nós. Após modelagem, aplica-se o carregamento q_d , a gravidade com o valor de $9,8 \text{ m/s}^2$, e as condições de contorno, sendo que o movimento está restringido aos eixos x e y na borda esquerda, e na borda direita, somente ao eixo y . Na Figura 6.6 é apresentada a malha utilizada na modelagem numérica e na Figura 6.7 é mostrado o deslocamento da viga em relação ao eixo y .

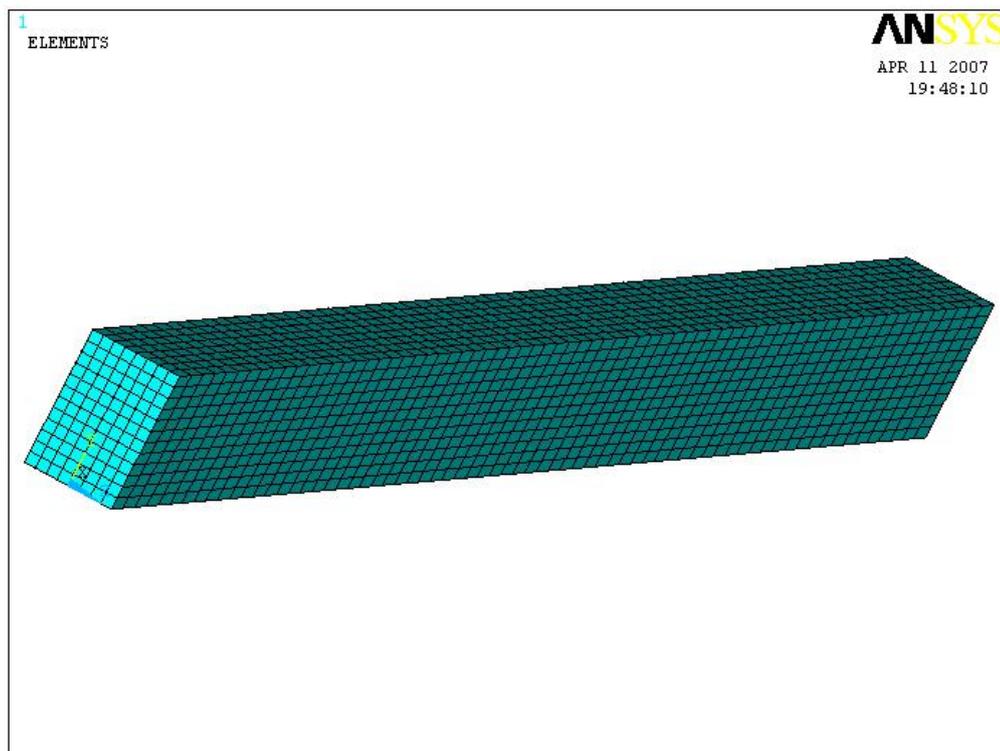


Figura 6. 6 – Modelo da viga mista, perfil T de aço e madeira em elementos finitos.

Fonte: ANSYS, 2005.

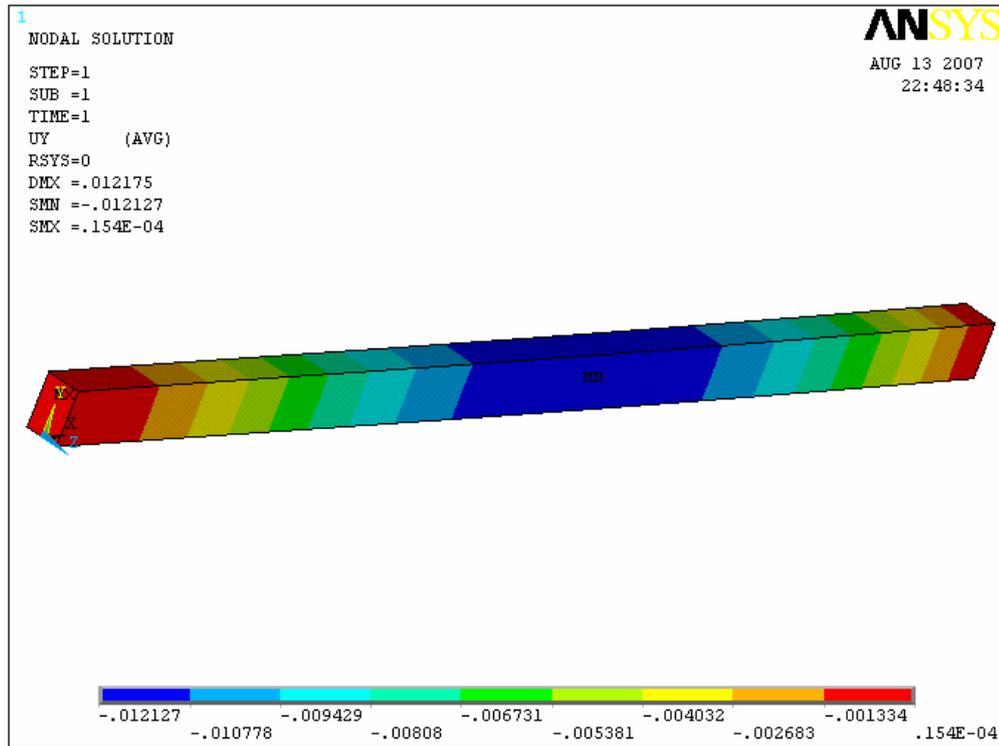


Figura 6. 7 – Deslocamento da viga mista, perfil T de aço e madeira em relação ao eixo y. Fonte: ANSYS, 2005.

Realiza-se agora uma análise muito semelhante à anterior, porém, a única alteração, é a fixação de uma chapa de aço colada por adesivo de alta aderência na base da viga de madeira, e também presa com ajuda de parafusos fixados de baixo para cima, ao invés de inserir o perfil T na alma da mesma. Aqui nesta análise também se aplicam as propriedades físicas, os carregamentos, a ação da gravidade e as condições de contorno do exemplo anterior, Figura 6.8.

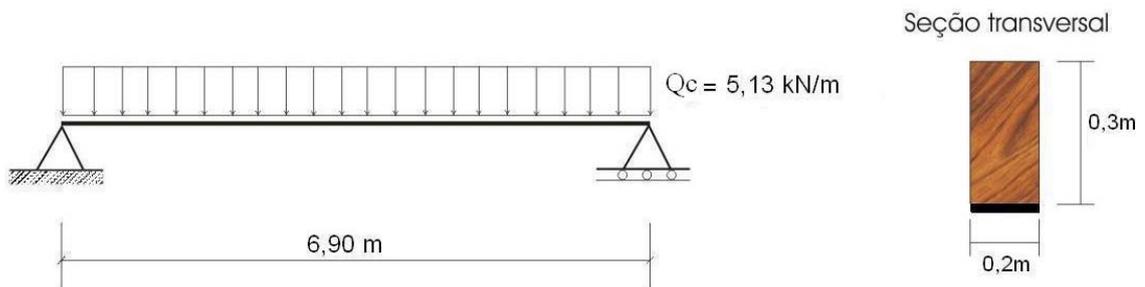


Figura 6. 8 – Modelo da viga mista, chapa de aço e madeira com o carregamento aplicado.

Essa nova proposta de estrutura é modelada em três dimensões no *software ANSYS 9.0* (2005) como apresentado na Figura 6.9. Nesta modelagem são utilizados 6624 elementos *Solid64* e 414 elementos de *Shell43*, totalizando 7038 elementos e 8661 nós. Após modelagem, aplica-se o carregamento q_d , a gravidade como valor de $9,8 \text{ m/s}^2$ e as condições de contorno, sendo que o movimento está restringido aos eixos x e y na borda esquerda, e na borda direita, somente ao eixo y . Na Figura 6.9 é apresentada a malha utilizada na modelagem numérica e na Figura 6.10 é apresentado o deslocamento da viga em relação ao eixo y .

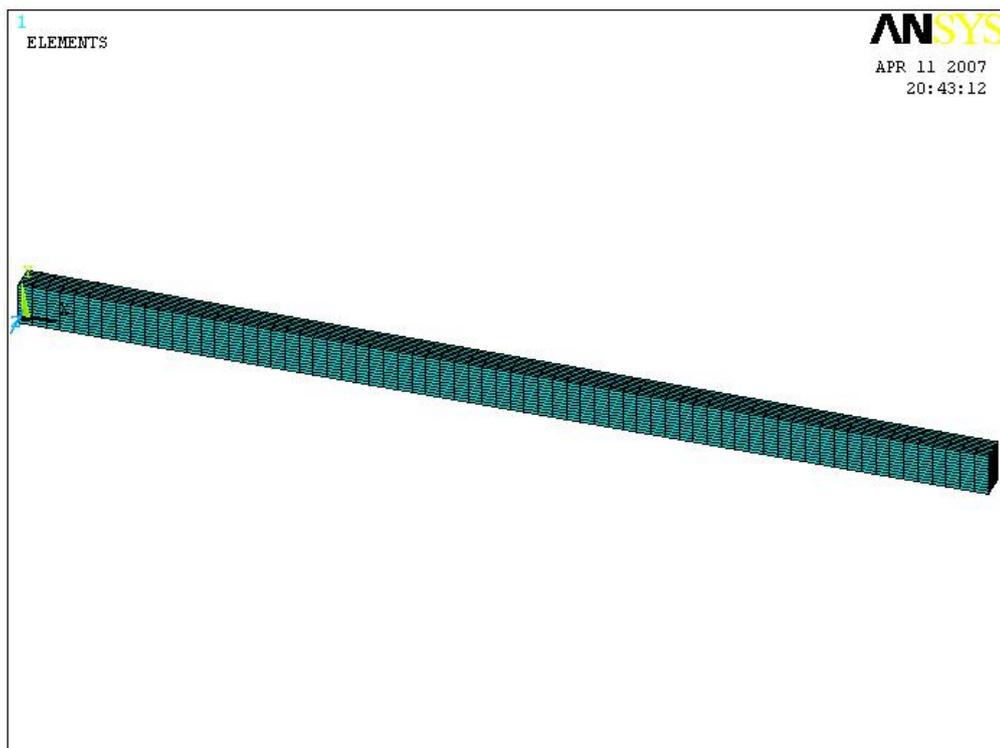


Figura 6. 9 – Modelo da viga mista, chapa de aço e madeira em elementos finitos.

Fonte: ANSYS, 2005.

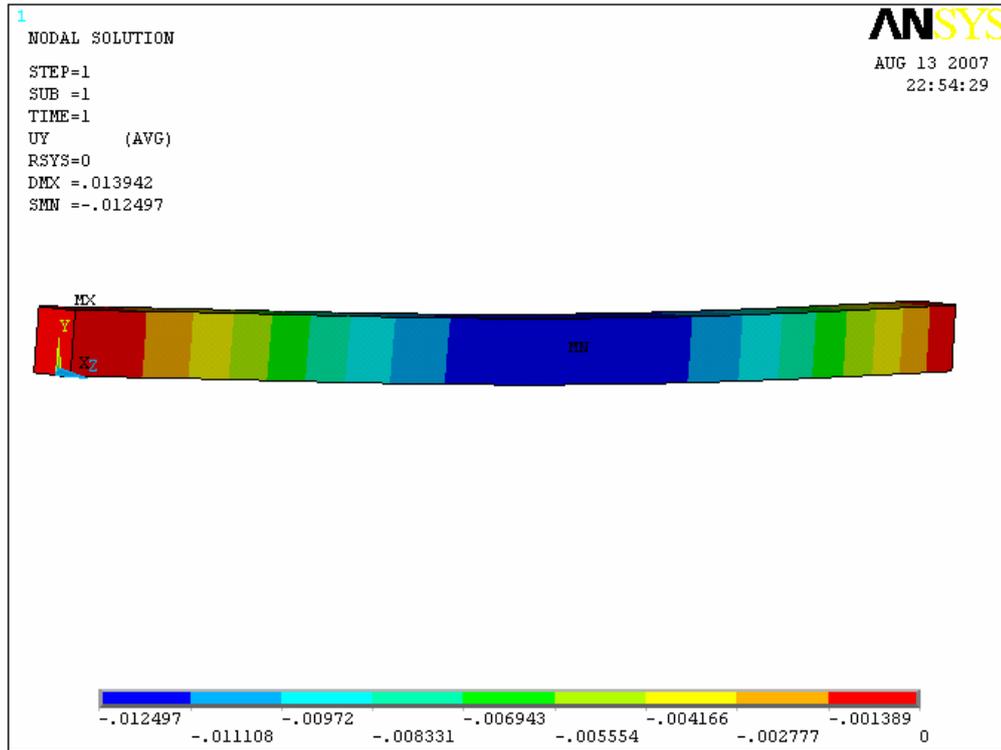


Figura 6. 10–Deslocamento da viga mista, chapa de aço e madeira em relação ao eixo y.

Fonte: ANSYS, 2005.

Por último, realiza-se a análise para a proposta, na qual instala-se chapas de aço enrijecidas nas bordas da viga presas por parafusos e pinos, em seguida fixa-se em suas extremidades inferiores um tirante de aço, que sofre uma pré-tração, a fim de resistir junto com a viga de madeira os esforços de tração. Nesta análise, também se aplicam as propriedades físicas, os carregamentos, a ação da gravidade e as condições de contorno da proposta anterior, Figura 6.11.

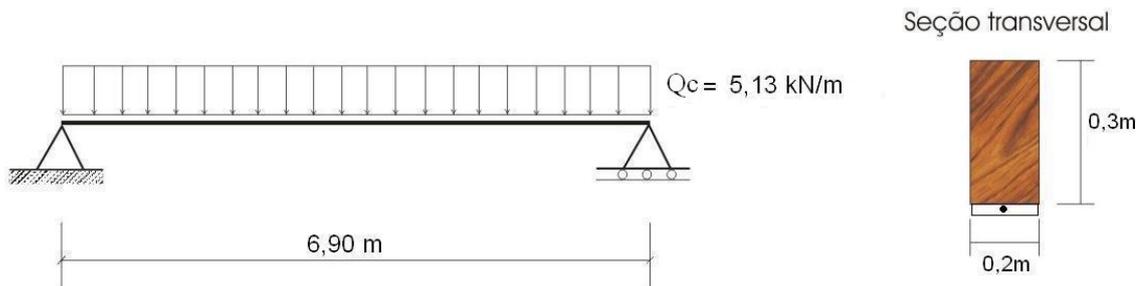


Figura 6. 11 – Modelo da viga de madeira candeia com o tirante, fixado por chapas de topo, com o carregamento aplicado.

Essa proposta de estrutura é modelada em três dimensões no *software ANSYS 9.0* (2005) como apresentado na Figura 6.12. Nesta modelagem são utilizados 6624 elementos *Solid64*, 471 elementos de *Shell43*, e 01 elemento de *Link8*, totalizando 7096 elementos e 8468 nós. Após a modelagem, aplica-se o carregamento q_d , a gravidade de $9,8 \text{ m/s}^2$ e as condições de contorno, sendo que o movimento está restringido aos eixos x e y na borda esquerda, e na borda direita, somente ao eixo y . Na Figura 6.12 é apresentada a malha utilizada na modelagem numérica e na Figura 6.13 é apresentado o deslocamento da viga em relação ao eixo y .

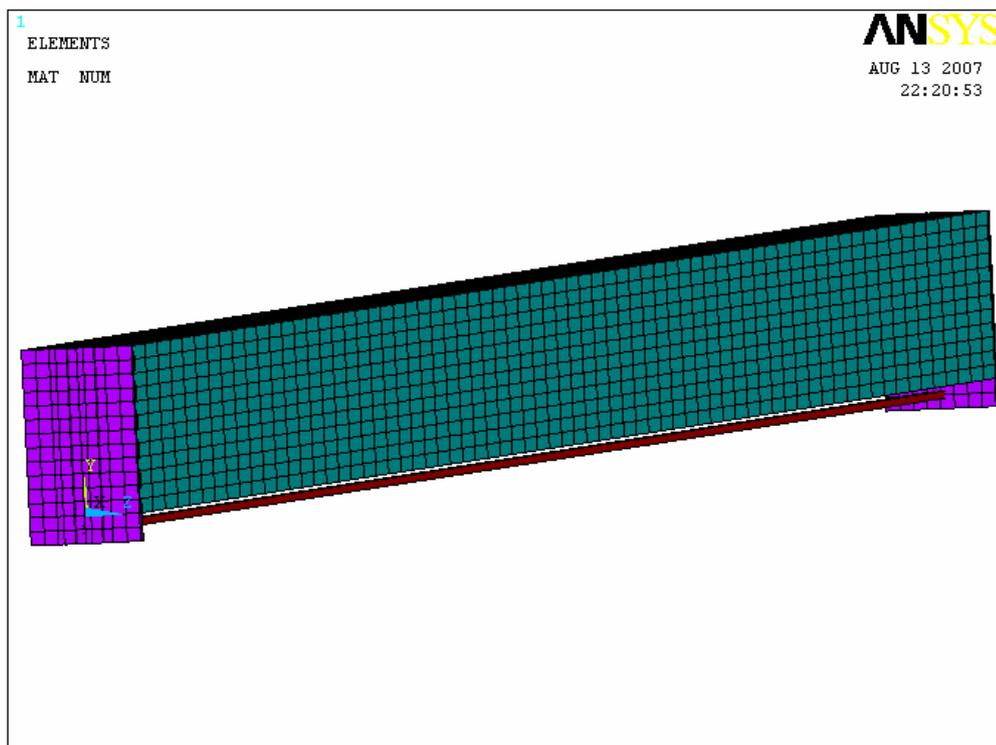


Figura 6.12-Modelo da viga de madeira candeia com o tirante fixado por chapas de topo.

Fonte: ANSYS, 2005.

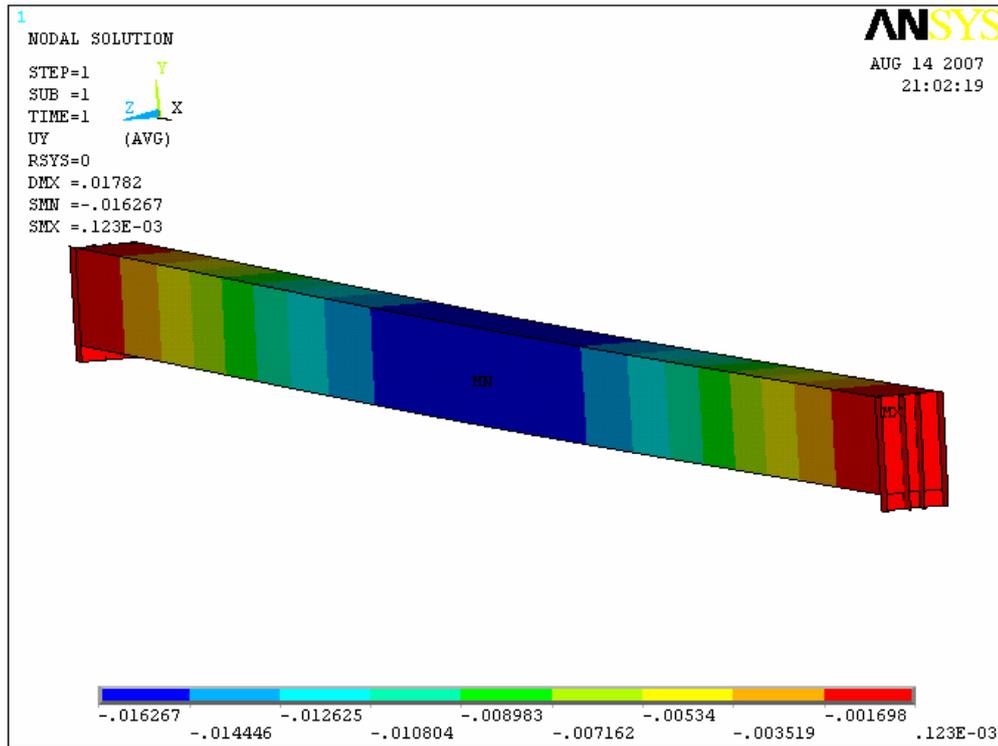


Figura 6. 13 – Deslocamento da viga de madeira candeia com o tirante fixado por chapas de topo.

Fonte: ANSYS, 2005.

Com o modelo em elementos finitos validado, pode-se obter a flecha apresentada pela viga de candeia utilizada no estudo de caso, e compará-la com a flecha admissível de 0,0197 m, conforme estabelecido pela NBR 7190:1997.

Nota-se que a viga de madeira quando solicitada ao carregamento descrito nesse trabalho, apresentou uma flecha de 0,0248 m, valor esse superior ao admissível. Provando-se necessário a intervenção com peças metálicas para reduzir seu valor, e aumentar sua capacidade portante.

Contudo quando se insere um perfil T invertido na alma da viga de madeira, ela aumenta significativamente a sua capacidade portante, reduzindo sua flecha para 0,0121 m, e apresentando uma melhoria de aproximadamente 39 %.

Ao fixar a chapa de aço na base inferior da viga de madeira com adesivo de alta aderência e parafusos, obtém-se uma flecha de 0,0125 m, valor esse responsável por uma melhoria da flecha máxima de aproximadamente 36 %.

E ao fixar o tirante de aço nas chapas de topo instaladas nas bordas da viga de madeira, obtém-se uma flecha de 0,0163 m, valor esse responsável por uma melhoria da flecha máxima de aproximadamente 17 %. Esse valor é determinado no ponto máximo em que as chapas de topo resistem antes de se deformarem.

Para as três intervenções de reforço com peças de aço metálicas em peças de madeiras apresentadas, a flecha máxima passou a ser inferior à flecha admissível estabelecida pela norma NBR 7190:1997, mostrando a eficiência da estrutura mista, Tabela 6.2.

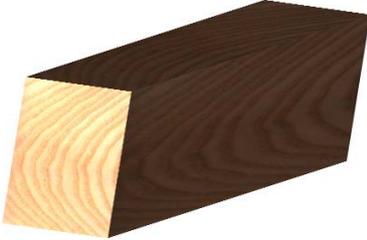
Pode-se observar que a intervenção com tirantes é pouco significativa em relação às outras duas intervenções analisadas. A intervenção com o perfil T invertido na viga de madeira é mais eficiente, porém seu processo construtivo requer uma mão de obra mais especializada e um tempo de execução maior do que a intervenção com chapa de aço fixada na base da viga com adesivo de alta aderência e parafusos. Como a diferença entre a eficiência das duas intervenções mais significativas é pequena, aconselha-se utilizar a chapa de aço fixada na base inferior da viga com adesivo de alta aderência e parafuso.

Uma outra proposta que pode ser analisada, semelhante ao exemplo mostrado na figura 3.9, seria a intervenção conforme esquematizadas na Figura 6.14, onde fixa-se duas chapas de aço na base da viga e solda-se nelas um tirante em no formato de U unindo-as. Porém este reforço só se aplica em peças de dimensões menores, com peças estruturais de telhados.



Figura 6. 14 – Reforço em viga de madeira com tirante em forma de U

Tabela 6. 2 – Comparação entre as três propostas de intervenções.

Eficiência das intervenções	
Viga de madeira	Perfil T invertido
	
Flecha admissível = 0,0197 m	Eficiência em relação à flecha admissível é de 39 %
Flecha máxima real = 0,0248 m	Eficiência em relação à flecha real é de 51 %
	Flecha máxima = 0,0121 m
Chapa de aço	Tirante com chapa de topo
	
Eficiência em relação à flecha admissível é de 36 %	Eficiência em relação à flecha admissível é de 17 %
Eficiência em relação à flecha real é de 49 %	Eficiência em relação à flecha real é de 34 %
Flecha máxima = 0,0125 m	Flecha máxima = 0,0163 m

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSÕES

A conservação e restauração de edificações históricas são assuntos de fundamental importância para preservação da nossa cultura. Nos países mais desenvolvidos essa preocupação com a preservação de bens patrimoniais culturais é bem mais disseminada, e no Brasil está sendo mais valorizada nas últimas décadas. Assim, engenheiros, arquitetos e cientistas de todo mundo vêm buscando formas mais eficazes de promover a conservação e a restauração de edificações históricas. Portanto, somente com a consolidação da ciência e da cultura, é que se pode traçar as diretrizes para uma forma mais eficaz de intervir em uma edificação histórica.

A carência de estudos voltados para a restauração de estruturas em madeira em edificações antigas e a preocupação em manter o trabalho grandioso realizado por artistas motivaram o desenvolvimento desta pesquisa. No entanto, o projeto de estruturas de madeira e reforços com aço deve atender as suas respectivas normas, e cada caso de intervenção deve ser analisado individualmente e com critérios diferentes.

No presente trabalho trata-se do problema de intervenção, por meio de reforços usando estrutura metálica, em estruturas de madeira muito utilizadas em edificações antigas. Inicialmente apresenta-se o conceito de restauração e/ou conservação de edificações, envolvendo a recuperação e o reforço em estruturas de madeira. Aborda-se os critérios gerais em relação a esse processo, quando da sua utilização e quais as normas específicas. E avalia-se ainda a viabilidade de utilização dessas intervenções na prática, via estudo de caso, para a recuperação de estruturas de madeira em sítios históricos.

São apresentados dois exemplos de edificações antigas, da cidade de Ouro Preto, MG, em que um desses exemplos teve-se algumas peças de madeira recuperadas com peças metálicas. No processo de análise das estruturas de madeira, dessa edificação apresentada, encontram-se algumas peças, que apesar do tempo se apresentam praticamente íntegras, caso de algumas estruturas de piso (barrotes).

Nesse caso recomenda-se apenas uma impermeabilização das peças. As peças de madeira danificadas encontradas podem ser classificadas em dois grupos: o grupo das peças recuperáveis, onde se faz necessário, somente uma pequena redução da sua seção transversal, para eliminar a superfície deteriorada por umidade e a partir daí estudar o processo de intervenção com reforço metálico e o grupo das peças que devem ser substituídas por peças metálicas e ou peças novas de madeira.

Nesse trabalho, apresentam-se os aspectos para a intervenção em estruturas de madeira com perfis de aço e/ou chapas metálicas, por meio de uma análise utilizando modelagem numérica via *software* ANSYS. Trata-se o aço e a madeira como elementos estruturais, como uma proposta de estrutura mista, realçando suas composições e diferenças, de acordo com as normas de madeira e de aço. A inserção de peças estruturais metálicas em estruturas de madeiras, quando definidas adequadamente podem apresentar, além da sua função estrutural, resistência adequada com leveza, facilidade no processo construtivo, e boa estética.

Seguindo as recomendações da norma, para o dimensionamento de estruturas de madeiras, calcula-se, via o método analítico da linha elástica, uma estrutura mista de aço e madeira, com o objetivo de comparação com o modelo numérico utilizado. A solução via o método numérico, de elementos finitos, para um elemento estrutural de madeira (viga), apresentou um erro máximo compreendido em torno de 18 % em relação ao valor analítico. Esse erro corresponde a um excesso, comparado ao valor analítico, o que torna o modelo de elementos finitos mais conservador que o método da linha elástica.

Nas propostas de intervenção em estruturas em madeira apresentadas nesse trabalho são utilizados peças metálicas no formato de perfil T de 150 x 150 x 5 mm, chapa de 150 x 5 mm, chapas de topo de 200 x 350 x 15 mm, e tirantes de aço.

Os resultados encontrados atendem aos padrões de perfis e chapas encontrados no mercado nacional. Em relação à madeira, que foi analisada, vale salientar ainda que inicialmente esperava-se que ela apresentasse um módulo de elasticidade superior ao

encontrado, uma vez que, por ser muito oleosa, fazia-se passar por madeira de alta densidade, mas quando seca, apresentou valores médios para resistência e densidade.

A recuperação de estruturas de madeira com peças metálicas é muito vantajosa, uma vez que essa não tem quase nenhuma perda, possui maior exatidão e a construção é muito rápida, deixando o ambiente de trabalho mais limpo. Além disso, utilizando-se o aço pintado ou o aço anticorrosivo (quimicamente preparado), obtém-se um alto grau de durabilidade no processo de intervenção.

Verifica-se ainda a possibilidade de dimensionar uma estrutura mista de madeira e aço para construção civil e não somente para restauração, podendo aumentar a capacidade portante das peças estruturais como, por exemplo, peças em eucalipto que tem crescimento rápido e quando combinados com peças leves de aço, podem se tornar um bom investimento em peças de cobertura principalmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS. User's Manual. Versão 9.0. Swanson Analysis Systems Inc. Houston, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de estruturas de aço de edifícios: NBR 8800.** Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio: NBR 14762.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas para cálculo de estruturas de edificações: NBR 6120.** Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ações e segurança nas estruturas: NBR 8681.** Rio de Janeiro, 1993.

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

BORGES, Marcos Leopoldo. **Recuperação estrutural de edificações históricas utilizando perfis formados a fria.** 2001, 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

CALAVERA, J. et al. **Curso de Rehabilitacion. La Estructura.** Madrid: Colégio Oficial de Arquitectos. 1987.

CALIL JUNIOR, Carlito; ROCCO LAHR, Francisco Antônio; DIAS, Antônio Alves. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira 1ª.** Ed. São Paulo: Editora Manole Ltda, 2003.

COMITÊ CIENTÍFICO INTERNACIONAL PARA ANÁLISE E RESTAURAÇÃO DE IMÓVEIS DO PATRIMÔNIO ARQUITETÔNICO, 1., 2001, Paris. **Recomendações para análise, conservação e restauração estrutural do patrimônio arquitetônico.** Disponível em: <<http://www.icomos.org.br/icomos>>. Acesso em: 8 mar. 2006.

ECCLESIA (Capela de Santa Sophia). Disponível em:<http://www.ecclesia.com.br/images/fotos/hagia_sophia>. Acesso em: 2 mar. 2006.

FAOP. Disponível em: <<http://www.faop.mg.gov.br>>. Acesso em: 15 fev. 2006.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Diretrizes para a conservação e preservação de edificações.** Ouro Preto, 1999(b).

INSTITUTO ESTADUAL DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO DE MINAS GERAIS. **Diretrizes para a proteção do patrimônio cultural de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2001

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Fotos de Arquivo**. Ouro Preto, 1986.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Legislação**. Disponível em: <<http://www.iphan.gov.br>>. Acesso em: 22 mar. 2006.

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Manual de conservação preventiva para edificações**. Rio de Janeiro, 1999(a).

INSTITUTO DO PATRIMÔNIO HISTÓRICO E ARTÍSTICO NACIONAL. **Roteiro para apresentação de projeto básico de restauração do patrimônio edificado**. Rio de Janeiro, 2000.

LOURENÇO, Paulo B. **Reabilitação de construções antigas – casos práticos**: documento de trabalho. Universidade do Minho, 1999. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Historical%20constructions/page%2091-116%20_Lourenco_.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2006.

MOLITERNO, Antônio. **Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira**, 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1981. 461 p.

PATRIMONIUM. **O aço na recuperação de edifícios**. Disponível em: <<http://www.dgpatr.pt/patrimonium/p2/Aco>>. Acesso em: 8 mar. 2006.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michéle. **Estruturas de Madeira 6**. Ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2003.

PERSIKE, Ivo Hamilton. **Metodologia para manutenção do patrimônio edificado partindo do diagnóstico de causa prováveis e indicando sua terapia**. 2002, 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

PETRUCCI, Eládio G.R. **Materiais de construção 2**, 11.ed. São Paulo: Globo, 1998. 435 p.

PUCCIONI, Sílvia. **Restauração estrutural, uma metodologia de diagnóstico**. 1997, 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1997.

REIS, Márcia.V.M. **Uma proposta de padronização de telhados coloniais em estruturas metálicas**. 1996, 200 f. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1996

RODRIGUES, Romana M.S. Costa de Oliveira. **Construções antigas de madeira: Experiência de obra de reforço estrutural**. 2004, 287 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil, Universidade do Minho, Minho, 2004.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Propriedades mecânicas do aço**. 2006. Laboratório de mecânica computacional, Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://www.lmc.ep.usp.br/people/valdir/PEF5736/propr_mec/propr_mec1.html>. Acesso em: 19 mar. 2006.

SME-CONGRESSO INTERNACIONAL DA CONSTRUÇÃO METÁLICA, 3., 2006, Ouro Preto. **O Teatro de Ouro Preto e sua estrutura metálica**. Ouro Preto: Sociedade Mineira de Engenheiros, 2006. Disponível em: <<http://www.sme.org.br>>. Acesso em: 11 mai. 2006.

TEOBALDO, Izabela Naves Coelho. **Estudo do aço como objeto de reforço estrutural em edificações antigas**. 2004, 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004

ANEXO A

ANEXO A

Caso exemplo – flexão simples – Modelo analítico

Na Figura A.1 apresenta-se, como modelo para o caso exemplo, uma viga de madeira (peroba rosa) bi-apoiada e carregamento distribuído.

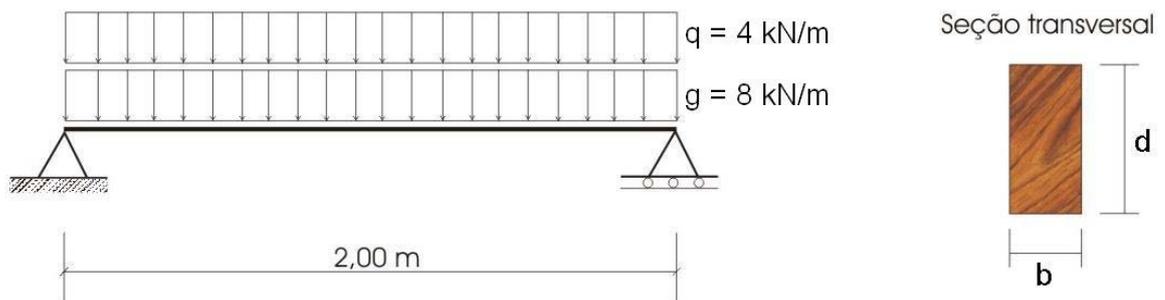


Figura A.1– Modelo de viga com carregamento aplicado analisado.

Para o dimensionamento da seção transversal da viga e verificação da flecha máxima, aplica-se o método da linha elástica, seguindo as indicações da norma NBR 7190:1997.

O módulo de elasticidade da madeira (peroba rosa) é dado $E_m = 9.425.000.000 \frac{N}{m^2}$.

A rotina seguida para o dimensionamento da seção transversal da viga de peroba rosa consiste em obter o carregamento total sobre a viga de madeira. Esse carregamento é encontrado combinando-se os carregamentos devido às ações permanentes e os carregamentos devidos às ações variáveis. Assim, pode-se escrever:

$$Q = g + q \quad (\text{A.1})$$

onde Q é a carga uniformemente distribuída de projeto, proveniente da combinação dos carregamentos (permanentes e variáveis). Para este exemplo resulta em, $Q = 8.000 \text{ N/m} + 4.000 \text{ N/m} = 12.000 \text{ N/m}$

Por meio da carga de projeto e das condições de contorno (apoios), pode-se determinar os esforços solicitantes pelo método da mecânica clássica, sendo o primeiro o momento fletor aplicado sobre a viga, que é dado por:

$$M = \frac{Q \times l^2}{8} = \frac{12.000 \times 2^2}{8} = 6.000 \text{ N.m} \quad (\text{A.2})$$

Sendo M , o momento fletor máximo aplicado à viga de peroba rosa, (N.m); Q a carga de projeto, (N); e l o vão livre da viga entre apoios, (m).

O cálculo da força cortante, provocada pela carga de projeto, que atua sobre a viga, é mostrado na Equação (A.3),

$$V = \frac{Q \times l}{2} = \frac{12.000 \times 2}{2} = 12.000 \text{ N} \quad (\text{A.3})$$

onde V é a força cortante atuante na viga, (N).

Para que se faça eficaz o dimensionamento da seção transversal, é necessário que o momento resistente da viga satisfaça a expressão mostrada na Equação (A.4).

$$M_{resist} \geq M \quad (\text{A.4})$$

Sendo M o momento fletor devido à carga de projeto, (N.m); e M_{resist} é o momento máximo que a viga de madeira resiste. Esse momento resistente da viga de madeira é calculado pela expressão representada na Equação (A.5).

$$M_{resist} = W \times \bar{\sigma}_f \quad (\text{A.5})$$

onde W é o módulo resistente elástico da viga, (m^3), e $\bar{\sigma}_f$ é a tensão admissível da viga de peroba rosa na borda tracionada, ($\bar{\sigma}_f = 135 \text{ kgf/cm}^2 = 13.500.000 \text{ N/m}^2$).

Reescrevendo a expressão para cálculo do momento resistente em função da base (b) e da altura (h) da seção transversal da viga, tem-se:

$$M_{resist} = \frac{b \times d^2}{6} \times \bar{\sigma}_f \quad (\text{A.6})$$

Adotando um valor de 0,1 m para a base da seção transversal da viga de madeira, pode-se dimensionar a altura da mesma por meio da Equação (A.6), encontrando:

$$d = \sqrt{\frac{6 \times M}{b \times \bar{\sigma}}} = \sqrt{\frac{6 \times 6.000}{0,1 \times 13.500.000}} = 0,163 \quad (\text{A.7})$$

Para um melhor dimensionamento, adota-se o valor comercial acima do encontrado. Sendo assim, tem-se: (b) igual a 0,1 m e (d) igual a 0,2 m.

Na verificação da estabilidade, precisa-se conhecer a tensão na borda comprimida, resistida pela viga de madeira, onde essa pode ser obtida por:

$$\lambda' = \frac{L}{b} = \frac{200}{10} = 20 \quad (\text{A.8})$$

onde λ' é o índice de esbeltez da viga de madeira, e um dos fatores responsáveis pela estabilidade lateral. Por meio da razão entre as dimensões da seção transversal da viga de madeira,

$$\frac{d}{b} = \frac{20}{10} = 2 \quad (\text{A.9})$$

encontra-se um coeficiente (k) em função da razão das dimensões da seção transversal, igual a 3,31, conforme mostrado na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Valores de k

d/b	k	d/b	k
1	2,12	11	13
2	3,31	12	15,30
3	4,53	13	17,70
4	5,78	14	19,10
5	7,05	15	20,50
6	8,34	16	21,90
7	9,65	17	23,30
8	10,97	18	24,70
9	12,3	19	26,10
10	13,65	20	27,60

Fonte: MOLITERNO, 1981

Sabendo-se que a falta de travamento, pelo menos nas extremidades da borda comprimida da viga, provoca perda total de estabilidade lateral da viga alta e esbelta. A causa dessa estabilidade lateral é provocada pelas linhas isostáticas de compressão face à esbeltez da peça, cujo efeito é a flambagem lateral por elevado deslocamento. Contudo, pode-se calcular o índice de esbeltez substituindo os valores de k encontrados, pela expressão mostrada na Equação (A.10).

$$\lambda'_0 = \frac{0,39 \times E_m}{K \times \bar{\sigma}_f} = \frac{0,39 \times 9.425.000.000}{3,31 \times 13.500.000} = 82,3 \approx 82 \quad (\text{A.10})$$

onde E_m é o módulo de elasticidade da madeira no sentido paralelo às fibras, (N/m²); e λ'_0 é o índice de esbeltez.

Para que a viga de madeira seja bem dimensionada, ela precisa satisfazer a condição imposta conforme mostrado na Equação (A.11), (caso não seja satisfeita essa condição, é necessário que se trave lateralmente a viga, aumentando sua rigidez transversal).

$$\sigma_{f}^{-} = \frac{4}{3} \times \sigma_{f}^{-} \times \left(1 - \frac{1}{2} * \frac{\lambda'}{\lambda'_0}\right) \leq \sigma_{f}^{-} \quad (\text{A.11})$$

Substituindo os valores na Equação (A.11), tem-se,

$$\sigma_{f}^{-} = \frac{4}{3} \times 13.500.000 \times \left(1 - \frac{1}{2} * \frac{20}{82}\right) = 1.400.000 \text{ N/m}^2$$

Sendo assim, como a tensão admissível pela viga de peroba é superior à solicitada, pode-se dizer que a viga está bem dimensionada para resistir à tensão de tração na borda. Analogamente, observa-se que a viga de madeira resiste bem aos esforços de compressão também,

$$\sigma_t \cong \sigma_c \quad (\text{A.12})$$

$$\sigma_c = \frac{M}{W} \leq \sigma_{f}^{-} \quad (\text{A.13})$$

$$\text{pois, } \sigma_t \cong \sigma_c = \frac{6.000}{0,000666} = 9.009.009 \leq 13.500.000$$

A análise de tensões cisalhantes na viga de madeira, é feita determinando-se a tensão resistente ao cisalhamento da viga de madeira, que é expressa por:

$$\bar{\tau}_{\max} = \frac{3}{2} \times \frac{V}{bd} \quad (\text{A.14})$$

Sendo $\bar{\tau}_{\max}$ a tensão máxima de cisalhamento solicitada pela viga de madeira, (N/m²).

Conforme o método das tensões admissíveis, no dimensionamento de vigas de madeira de madeira, a tensão admissível da peroba que é dada por: $\bar{\tau}_v = 1.200.000 \text{ N/m}^2$, não pode ser inferior à tensão máxima calculada (solicitada), ou seja:

$$\bar{\tau}_{\max} \leq \bar{\tau}_v \quad (\text{A.15})$$

Sendo assim, faz-se: $\bar{\tau}_{\max} = \frac{3}{2} \times \frac{12.000}{0,1 \times 0,2} = 900.000 \text{ N/m}^2$

Verificando-se a condição estabelecida para dimensionamento da viga de madeira para cisalhamento, observa-se que a tensão cisalhante solicitada é inferior à máxima resistida pela viga, satisfazendo assim, a condição estabelecida pela norma.

Para finalizar, determina-se a tensão normal às fibras, provocada pela carga de projeto. Essa tensão é função dos esforços parciais ou totais sobre a face carregada da viga, e essa não pode ser superior à máxima resistida pela viga de peroba rosa, ou seja,

$$\sigma_n = \frac{R}{bd} \leq \bar{\sigma}_n = 2.500.000 \text{ N/m}^2 \quad (\text{A.16})$$

onde R é a reação de apoio da viga, (N); $\bar{\sigma}_n$ é a tensão admissível normal às fibras da madeira da viga, (N/m^2); e σ_n é a tensão normal às fibras calculada, (N/m^2). Sendo assim, tem-se que:

$$\sigma_n = \frac{12.000}{0,1 \times 0,2} = 600.000 \text{ N/m}^2 \leq 2.500.000 \text{ N/m}^2 \quad (\text{A.17})$$

Assim, a condição de resistência da viga de madeira é satisfeita, concluindo-se que ela resiste aos esforços solicitados por ela. Portanto para conclusão de sua eficiência é

necessário calcular ainda a flecha máxima que essa viga possa apresentar quando solicitada.

Outra verificação que se faz no dimensionamento de uma viga de madeira é a verificação da flecha admissível, sendo essa, estabelecida pela NBR 7190:1997, conforme a expressão mostrada na Equação (A.18).

$$f_{adm} = \frac{L}{350} = \frac{200}{350} = 0,57 \text{ cm ou } 0,0057 \text{ m} \quad (\text{A.18})$$

A condição necessária para que a viga de madeira de seção 0,1 x 0,2 m seja aprovada para resistir aos esforços solicitados é que:

$$f \leq f_{adm} \quad (\text{A.19})$$

Dessa forma, pode-se calcular a flecha máxima apresentada pela viga quando solicitada ao carregamento de projeto, que é dada por:

$$f = \frac{5}{384} \times \frac{(Q) \times L^4}{E_m \times I_x} \quad (\text{A.20})$$

onde f é a flecha máxima calculada para a carga de projeto, (m); Q é a carga uniformemente distribuída de projeto, (N); L é o vão livre da viga entre apoios, (m); E_m é o módulo de elasticidade paralelo às fibras da madeira, (N/m²); e I_x é o momento de inércia da seção transversal da viga, (m⁴), dado por:

$$J_x = \frac{b \times d^3}{12} = \frac{0,1 \times 0,2^3}{12} = 0,000067 \text{ m}^4 \quad (\text{A.21})$$

Substituindo-se os valores encontrados na Equação (A.21), pode-se obter a flecha máxima devido ao carregamento de projeto:

$$f = \frac{5}{384} \times \frac{(12.000) \times 2^4}{9.425.000.000 \times 0,000067} = 0,00396 \text{ m} \quad (\text{A.22})$$

Como a flecha máxima calculada é inferior à flecha admissível estabelecida pela norma NBR 7190:1997, conclui-se que a viga está bem dimensionada para resistir às tensões solicitantes, e apresentar uma flecha aceitável e com rigidez adequada.

ANEXO B

ANEXO B

Cálculo do Erro Absoluto

Seja “ N ” um número com valor exato e “ \bar{N} ” um valor aproximado de “ N ”. A diferença entre o valor exato e o valor aproximado é o erro “ εN ”. Ao módulo deste valor, chama-se de erro absoluto de “ εN ”, e dado por:

$$\varepsilon N = \left| N - \bar{N} \right| \quad (\text{B.1})$$

Logo, tem-se uma relação entre os valores do erro absoluto em função de “ N ” e “ \bar{N} ”, podendo-se dizer que:

$$\text{Se } \varepsilon N > 0, \text{ então } \bar{N} \text{ é uma aproximação por defeito de } N. \quad (\text{B.2})$$

$$\text{Se } \varepsilon N < 0, \text{ então } \bar{N} \text{ é uma aproximação por excesso de } N. \quad (\text{B.3})$$

Sendo $N \neq 0$ e \bar{N} uma aproximação, chama-se erro relativo do valor aproximado \bar{N} ao quociente determinado por:

$$r_n = \left| \frac{\varepsilon N}{N} \right| = \left| \frac{(N - \bar{N})}{N} \right| \quad (\text{B.4})$$

onde r_n pode ser expresso em percentagem, $(100 \times r_n)$.