

UNIVERSIDADE DE TRÁS-OS-MONTES E ALTO DOURO

A madeira em estruturas antigas: diagnóstico e metodologias de intervenção estrutural.

Pousada Medieval da Gralheira – Caso de Estudo

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil



Michael Teixeira Andrade

Orientador: Professora Doutora, Maria Eunice da Costa Salavessa

Co-Orientador: Investigador, José António Fonseca Oliveira Correia

Especialista Cooperante: Investigador, Tiago Ilharco de Moura Pinho Dias



Vila Real, 2014

A madeira em estruturas antigas: diagnóstico e metodologias de intervenção estrutural.

Pousada Medieval da Gralheira – Caso de Estudo

Tese apresentada na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para efeito de obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador Científico:

Professora Doutora Maria Eunice da Costa Salavessa

Mestre em Conservação e Reabilitação da Arquitectura e Núcleos Urbanos;

Doutoramento em Ciências de Engenharia

UTAD - Vila Real

Co-Orientador Científico:

Investigador, Mestre José António Fonseca Oliveira Correia

Mestre em Engenharia Civil

Especialização em Construções Metálicas e Mistas

UTAD / IDMEC-FEUP - Porto

Especialista Cooperante:

Investigador, Mestre Tiago Ilharco de Moura Pinho Dias

Mestre em Reabilitação do Património Edificado;

13th International Course on Wood Conservation Technology", ICCROM, Noruega.

FEUP / NCREP - Porto

(...) “ A conservação do património é realizada segundo o projecto de restauro, que inclui a estratégia para a sua conservação a longo prazo. Este “projecto de restauro” deverá basear-se numa série de opções técnicas apropriadas e preparadas num processo cognitivo que integre a recolha de informação e o conhecimento profundo do edifício e ou a sua localização. Este processo inclui o estudo estrutural, análises gráficas e de volumetria bem como a identificação do seu significado histórico e sócio cultural...” (...)

Carta de Cracóvia 2000

À saúde do meu Pai

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof^a Doutora Maria Eunice da Costa Salavessa, que com o seu apoio, motivação, rigor, exigência, amizade e pelas suas sábias palavras e ensinamentos que permitiram aumentar significativamente o meu conhecimento e permitiu, contornar dificuldades surgidas e levar a bom porto este trabalho. Foi e é uma pessoa Extraordinária.

Ao meu co-orientador, Investigador José António Fonseca Oliveira Correia, pelas críticas, opiniões e conselhos partilhados durante os ensaios aos provetes de Madeira.

Ao Especialista Cooperante, Investigador Tiago Ilharco de Moura Pinho Dias pela disponibilidade, empenho, dedicação, amizade, paciência, experiência e boa disposição que demonstra e ainda pelas oportunas trocas de ideias caracterizados por raciocínios simples, que o tornam uma inspiração. A sua forma expedita e prática de resolver problemas que contribuiu consideravelmente para o enriquecimento deste trabalho.

Ao Prof. Luís Miguel Ferreira Pontes Martins pelo entusiasmo que me transmitiu pela vida laboratorial e por todo o conhecimento que dela adveio e ainda pelo apoio, disponibilidade para a realização de ensaios não destrutivos de madeira.

À equipa da NCREP, Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património Lda., pela disponibilidade no fornecimento de informação sobre Inspeção e diagnóstico de Estruturas de madeira, assim como pelos conhecimentos partilhados e disponibilidade constante.

À equipa do departamento técnico da ARKTEC PORTUGAL por toda a ajuda, nomeadamente ao Eng.º Carlos Ribeiro e Eng.º Hugo Pinto.

À minha família, em especial aos meus pais por toda a atenção e apoio.

Ao meu amigo Diogo Martins pelas longas conversas sobre reabilitação de estruturas antigas, e pela troca de experiências ao nível de projecto que muito contribuíram para este trabalho.

Ao meu amigo Manuel Gomes pelo grande conhecimento de estruturas que em trocas de ideias contribuíram para um enriquecimento deste trabalho ao nível de componente estrutural.

À Stéphanie, pela compreensão, apoio, paciência, carinho e, acima de tudo, pelos incentivos constantes, apesar do pouco tempo que lhe dediquei nestes últimos tempos, tornaram a conclusão deste trabalho mais simples.

RESUMO

Esta dissertação pretende fundamentalmente estudar as Estruturas de Madeira em Edifícios Antigos, desde a abordagem à temática da conservação e reabilitação de edifícios antigos, tendo em conta a importância do património histórico, arquitectónico, urbanístico, arqueológico, natural e cultural no sentido de estabelecer directrizes de intervenção adequadas ao contexto cultural em que se insere. Além disso apresenta-se uma perspectiva geral sobre a evolução das estruturas de madeira ao longo dos tempos, desde a pré-história até a actualidade, passando pelas principais épocas e regiões onde esta teve o papel principal. Faz-se uma referência ao material madeira atendendo à sua origem e composição, procurando demonstrar o seu papel e desempenho como material estrutural, assim como os principais tipos de degradação e expôr as fases obrigatórias de inspecção e diagnóstico, procurando encontrar formas simples e expeditas de apoiar a decisão de manutenção/reabilitação ou substituição.

Serão mencionados ainda alguns dos ensaios não destrutivos e destrutivos existentes e que se resumem, na sua maioria, à avaliação da rigidez e da capacidade resistentes dos elementos de madeira. Por fim, apresentam-se metodologias de intervenção estrutural, no que respeita a técnicas de reforço, abordando-se ainda o modo de verificação das estruturas de madeira segundo o Eurocódigo 5.

O caso de estudo desta dissertação envolve um caso concreto de estudo, nomeadamente a “Pousada Medieval da Gralheira”, no concelho de Vila Pouca de Aguiar, que reflecte uma realidade comum a uma infinidade de construções semelhantes dispersas pelas paisagens rurais de Trás-os-Montes.

Grande parte deste património construído vernáculo, encontra-se vulnerável do ponto de vista da preservação da sua integridade, face ao abandonado por parte dos seus proprietários, pois a degradação acentua-se fazendo com que as intervenções de recuperação e restauro se tornem cada vez mais complexas implicando uma componente técnica interdisciplinar altamente especializada. Assim sendo faz-se um enquadramento histórico de edifício estudado “ Pousada Medieval da Gralheira” , caracterização arquitectónica e inspecção e diagnóstico de modo a permitir o levantamento de dados relevantes à futura análise do comportamento estrutural e estado de conservação da estrutura de madeira. Com o intuito de conhecer as características mecânicas, realizou-se uma campanha de ensaios destrutivos e não destrutivos, em algumas vigas do pavimento e cobertura de madeira, cuja oportunidade surgiu pelo facto do edifício em estudo existente ter sido sujeito a uma demolição parcial por parte dos donos de obra. Os ensaios mecânicos realizados em laboratório com provetes isentos de defeitos, que resultaram da madeira retirada do pavimento, foram executados com a finalidade de determinar as propriedades físico-mecânicas da madeira, nomeadamente a massa volúmica, tensão de rotura à flexão na direcção do fio e módulo de elasticidade na direcção do fio. Em simultâneo e paralelamente a estes foram realizados ensaios não destrutivos, com recurso ao Resistógrafo e Humidímetro, de modo a avaliar o estado de conservação da madeira.

A análise do pavimento em madeira foi completada com a realização de um modelo numérico com o objectivo de analisar o comportamento da estrutura em termos de estado de limite de serviço.

São descritas técnicas de reabilitação e reforço de pavimentos de madeira, associando-as a danos ou necessidades específicas, e é feita uma análise crítica comparativa que pode ajudar a definir quais as medidas mais adequadas a cada situação. Com este trabalho pretende-se assim definir modos de actuação e avaliação de estruturas de madeira, procurando formas expeditas de apoio à decisão de intervenção, nomeadamente através de ferramentas que permitam uma avaliação simples e pouco intrusiva, mostrando que existe uma grande diversidade de soluções de reabilitação/reforço.

Palavras-Chave:

Estruturas de madeira em edifícios antigos;
Conservação e reabilitação de edifícios antigos;
Património histórico;
Inspeção e diagnóstico;
Ensaio destrutivo e não destrutivo;
Intervenção Estrutural;
Eurocódigo 5.

ABSTRACT

This dissertation aims to fundamentally study the Wood Structures in old buildings, from the approach of the issue of conservation and rehabilitation of old buildings, taking in the importance of historical, architectural, urbanistic, archaeological, natural and cultural heritage in order to establish guidelines intervention taking into account the culture and the context in which it operates. Also presents an overview of the evolution of timber structures over time, from pre-history to the present, through the major eras and regions where it had the leading role. It is a reference to lumber material given its origin and composition, seeking to demonstrate its role as a structural material and performance, as well as the main types of degradation and view required phases of inspection and diagnosis, trying to find a simple and expeditious supporting decision maintenance / rehabilitation or replacement.

Are also mentioned some existing non-destructive or destructive testing and summarize them, mostly, about the evaluation of rigidity and resistant capacity of the wood elements. Finally methodologies are shown as structural intervention in the case of reinforcement techniques, there is still addressing-mode scan of timber structures according to Eurocode 5.

The case study involves a concrete case study, namely "Pousada Medieval da Gralheira" in Vila Pouca de Aguiar, which reflects a common reality of a multitude of similar buildings scattered throughout the countryside of Trás-os-Montes.

Much of the vernacular built heritage, is vulnerable from the point of view of preserving the integrity, given the abandoned by their owners because the degradation is accentuated making the recovery and restoration interventions become increasingly implying a complex technical and highly specialized interdisciplinary component. Therefore it is a historical framework of the studied building "Pousada Medieval da Gralheira" architectural characterization and inspection and diagnosis to allow raising relevant to future analysis of the structural behavior data and conservation status of the wooden structure. In order to meet the mechanical characteristics, there was a campaign of destructive and non-destructive testing, the pavement and wooden cover, whose opportunity arose because the building in existing study be subject to a partial demolition by the owners of work . The mechanical tests performed on laboratory specimens with no defects that resulted from the removal of the wooden floor, were performed in order to determine the physical and mechanical properties of wood, including the density, bending modulus of rupture in the direction of the wire and modulus of elasticity in the direction of the wire. Simultaneously and in parallel to these non-destructive testing, using the Resistógrafo and Humidímetro in order to assess the state of conservation of wood were performed. The analysis of the wood floor was completed with the completion of a numerical model with the aim of analyzing the behavior of the structure in terms of serviceability limit state.

Rehabilitation techniques and reinforcing wooden floors are described, linking them to damages or specific needs, and a critical comparative analysis that can help to define the most appropriate measures to each situation is made. This work thus aims to define modes of operation and evaluation of wood structures,

seeking expeditious decision support intervention, including through tools that allow a simple and somewhat intrusive evaluation, showing that there is a great diversity of solutions rehabilitation / strengthening.

Key-Words:

Wooden structures in old buildings;

Conservation and rehabilitation of older buildings;

Heritage;

Inspection and diagnosis;

Destructive and non-destructive testing;

Structural intervention;

Eurocode 5.

GLOSSÁRIO DE NOTAÇÃO

Simbologia	Grandeza
km	<i>Quilómetro</i>
kN	<i>Kilo Newton</i>
kPa	<i>Kilo Pascal</i>
MPa	<i>Mega Pascal</i>
GPa	<i>Giga Pascal</i>
W_k	<i>Acção do vento</i>
N_{Ed}	<i>Esforço axial de cálculo</i>
V_{Ed}	<i>Esforço transversal de cálculo</i>
M_{Ed}	<i>Momento flector de cálculo</i>
G	<i>Massa volúmica</i>
V_H	<i>Volume</i>
E	<i>Módulo de elasticidade</i>
I	<i>Momento de Inércia</i>
mm	<i>Milímetro</i>
cm	<i>Centímetro</i>
m	<i>Metro</i>
m_H	<i>Massa</i>
u_{ins}	<i>Deformação instantânea</i>
u_{fin}	<i>Deformação final</i>
ρ	<i>Massa volúmica</i>
σ	<i>Tensão normal</i>
$\sigma_{t,0,d}$	<i>Valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço actuante à tracção</i>
$f_{t,0,d}$	<i>Valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço resistente à tracção</i>
$\sigma_{c,0,d}$	<i>Valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço actuante à compressão</i>

$f_{c,0,d}$	<i>Valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço resistente à compressão</i>
$\sigma_{m,crit}$	<i>Tensão crítica de flexão calculada de acordo com a teoria da estabilidade elástica utilizando o quantilho de 5% para as constantes de rigidez</i>
ν	<i>Coefficiente de Poisson</i>
$\tau_{v,d}$	<i>Valor de cálculo da tensão de corte actuante</i>
$f_{v,d}$	<i>Valor de cálculo da resistência ao corte actuante</i>

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
GLOSÁRIO DE NOTAÇÃO	xi
INDICE GERAL	xiii
INDICE DE FIGURAS	xix
INDICE DE TABELAS	xxiv
INDICE DE GRÁFICOS	xxv
1. INTRODUÇÃO	
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Âmbito e Objectivos	2
1.3 Organização da dissertação	2
2. TEORIA HISTÓRICO-CRÍTICO DA CONSERVAÇÃO E RESTAURO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICO/CRITÉRIOS DE INTERVENÇÃO	
2.1 Introdução	5
2.2 Conceitos relacionados com a conservação do património edificado e urbanístico	6
2.3 Cartas e Convenções internacionais. Filosofia de Intervenção	8
2.4 Problema Actual na Reabilitação de Edifícios Antigos	14
3. AS ESTRUTURAS DE MADEIRA. BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO DA SUA HISTÓRIA	
3.1 Introdução	19
3.2 As Primeiras Utilizações da Madeira. Pré-história	20
3.3 As antigas Civilizações. A Construção em madeira até ao século XIX	23
3.3.1 Civilização Mesopotâmica	23
3.3.2 Civilização Egípcia	24
3.3.3 Civilização Greco-Romana	25
3.3.4 Países Orientais	29
3.3.5 Idade Média	30
3.3.6 Do Renascimento ao século XVII	33
3.3.7 Revolução Industrial	37
3.3.8 As Estruturas de Madeira em Portugal	39
4. INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA. METODOLOGIAS DE INTERVENÇÃO	
4.1.1 Introdução	45
4.2 Constituição da Madeira	46
4.2.1 Introdução	46

4.2.2	Estrutura Celular Típica	48
4.2.2.1	Ultraestrutura	50
4.2.2.2	Microestrutura	51
4.2.2.3	Macroestrutura	51
4.3	Defeitos e degradação da madeira	51
4.3.1	Características do Material	51
4.3.1.1	Nós	51
4.3.1.2	Fendas	52
4.3.1.3	Inclinação do Fio	53
4.3.1.4	Danos de origem biótica	54
4.3.1.5	Fungos Xilófagos	54
4.3.1.6	Insectos Xilófagos	55
4.3.1.7	Insectos Sociais	56
4.3.2	Acção de Agentes Atmosféricos	57
4.3.2.1	Radiação Solar	57
4.3.2.2	Chuva e Humidade	58
4.3.3	Deficiente concepção (ou uso) estrutural	59
4.4	Inspecção dos danos. Análise e tratamento da informação	60
4.4.1	Inspecção dos danos	60
4.4.1.1	Introdução	60
4.4.2	Inspecção Visual	63
4.4.2.1	Introdução	63
4.4.2.2	Classes de qualidade	64
4.4.2.3	Classes de resistência	65
4.4.2.4	Relação entre classes de qualidade e de resistência	67
4.4.2.5	Classificação de madeira antiga. Método baseado na EN338	67
4.4.3	Informação de arquivo do edifício e da informação obtida na inspecção do edifício	69
4.5	Método de avaliação das propriedades da madeira	70
4.5.1	Ensaio não destrutivos	70
4.5.1.1	Introdução	70
4.5.1.2	Martelo e Formão	71
4.5.1.3	Humidímetro	72
4.5.1.4	Resistógrafo	73
4.5.1.5	Pilodyn	74
4.5.1.6	Videoscópico	75
4.5.1.7	Sismógrafos	75

4.5.1.8	Ensaio de Carga	76
4.5.1.9	Georradar	76
4.5.1.10	Dendrocronologia	77
4.5.1.11	Radiografia – Raios X e Raios γ	78
4.5.1.12	Outros factores que influenciam a resistência mecânica da madeira estrutural	78
4.5.2	Ensaio destrutivo	80
4.5.2.1	Ensaio em provetes isentos de defeitos	81
4.5.2.2	Ensaio em provetas de tamanho real	82
4.5.2.3	Comparação entre ensaios com provetes isentos de defeitos e de tamanho real	82
4.5.2.4	Utilização dos resultados dos ensaios in situ e laboratórios	83
4.6	Diagnóstico	84
4.6.1	Introdução	84
4.6.2	Avaliação da Segurança e Modelos Estruturais adequados	85
4.6.3	Avaliação da Possibilidade de intervenção	86
4.7	Metodologia de Intervenção	87
4.7.1	Introdução	87
4.7.2	Recomendações Específicas para Estruturas de Madeira	89
4.7.3	Técnicas de Intervenção Estrutural mais Comuns	90
4.7.3.1	Reparação e substituição pontual usando técnicas antigas	91
4.7.3.2	Reparação e substituição pontual usando ligadores modernos	91
4.7.3.2.1	Introdução de Frechal de Madeira em Cachorros de Pedra	92
4.7.3.2.2	Utilização de Cantoneiras Metálicas	93
4.7.3.2.3	Utilização de Novas Peças de Madeira agrupadas às antigas	93
4.7.3.2.4	Utilização de peças de metal agrupadas às antigas de madeira	94
4.7.3.2.5	Utilização de Empalmes	94
4.7.3.2.6	Fixação de Chapas e Perfis Metálicos	95
4.7.3.2.7	Introdução de Elementos Metálicos no Interior de Secções	96
4.7.3.2.8	Reforço de Apoios Comuns em Pavimentos Contínuos Bi-apoiado	97
4.7.3.3	Substituição integral da estrutura usando madeiras antigas e materiais e técnicas de reforço/ligação modernas ao longo do comprimento dos elementos de madeira	97
4.7.3.3.1	Utilização de Chapas ao longo dos elementos de madeira	98
4.7.3.3.2	Utilização de Cintas metálicas	99
4.7.3.3.3	Utilização de Parafusos	99
4.7.3.3.4	Aumento de secção dos elementos	100
4.7.3.3.5	Divisão de espaçamento entre vigas	100
4.7.3.3.6	Introdução de soalho sobre o existente	101
4.7.3.3.7	Introdução de placas de derivados de madeira tipo OSB	102

4.7.3.3.8	Colocação o de Escoras de Suporte	102
4.7.3.3.9	Utilização de Tirantes Metálicos para Reforço	103
4.7.3.3.10	Introdução de uma lajeta de betão	104
4.7.3.4	Substituição integral por uma nova estrutura moderna	105
4.7.3.4.1	Substituição integral da cobertura	106
5.	AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA ESTRUTURAL DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA	
5.1	Introdução	107
5.2	Propriedade Físicas	108
5.2.1	Massa Volúmica e Densidade Volúmica	108
5.2.2	Teor de Humidade	109
5.2.3	Higroscopicidade	110
5.2.4	Retracção e Inchamento	110
5.3	Propriedades Mecânicas	111
5.3.1	Tracção paralela as Fibras	111
5.3.2	Compressão paralela as Fibras	111
5.3.3	Tracção perpendicular as Fibras	112
5.3.4	Compressão perpendicular as Fibras	113
5.3.5	Flexão	114
5.3.6	Corte	115
5.3.7	Módulo de Elasticidade e Distorção	116
5.4	Verificação da Segurança das Estruturas de Madeira	
5.4.1	EN 1995-1-1:2004 – Eurocódigo 5. Generalidades	116
5.4.2	Bases de cálculo de projecto de Estruturas de Madeira	117
5.4.3	Estados Limites	118
5.4.3.1	Estado Limite Último (ELU)	118
5.4.3.1.1	Tracção e Compressão	118
5.4.3.1.2	Flexão. Cálculo da tensão resistente	119
5.4.3.1.3	Capacidade resistente da secção. Flexão simples e desviada	120
5.4.3.1.4	Instabilidade lateral – torsional (Bambeamento)	123
5.4.3.1.5	Corte	123
5.4.3.2	Estado Limite de Serviço ou utilização (ELS)	125
5.4.3.2.1	Combinação de Acções	125
5.4.3.2.2	Deformação Final	126
5.4.3.2.3	Flechas Máximas Admissíveis	127
6.	CARACTERIZAÇÃO, INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO. ANÁLISE ESTRUTURAL E METODOLOGIA DE INTERVENÇÃO. “POUSADA MEDIEVAL DA GRALHEIRA” – CASO DE ESTUDO	
6.1	Introdução	129

6.2 Os Caminhos de Santiago. Enquadramento Histórico	130
6.3 Caracterização do Edifício – Caso de Estudo	132
6.3.1 Introdução	133
6.3.2 Caracterização arquitectónica	137
6.3.3 Caracterização estrutural	138
6.3.3.1 Fundações	139
6.3.3.2 Paredes Exteriores	140
6.3.3.3 Sobrados	141
6.3.3.4 Pavimentos e tectos	142
6.3.3.5 Coberturas	143
6.4 Funcionamento Estrutural	145
6.5 Estado de Conservação/Danos Observados	149
6.6 Ensaaios in situ não destrutivos	149
6.6.1 Introdução	149
6.6.2 Técnicas de inspecção tradicionais	150
6.6.3 Resistógrafo	151
6.6.3.1 Equipamento utilizado	151
6.6.3.2 Resultados obtidos	152
6.6.4 Humidímetro	156
6.6.4.1 Equipamento utilizado	156
6.6.4.2 Resultados obtidos	157
6.7 Identificação da Espécie da madeira	159
6.8 Ensaaios laboratoriais em provetes isentos de defeitos	160
6.8.1 Introdução	160
6.8.2 Determinação da massa volúmica e teor em água	162
6.8.3 Ensaaios de flexão	162
6.8.3.1 Esquema de ensaio	162
6.8.3.2 Resultados obtidos	163
6.8.3.3 Modos de rotura dos provetes submetidos à flexão	164
6.8.3.4 Cálculo do valor da resistência à flexão e módulo de elasticidade	165
6.9 Análise dos resultados dos ensaios. Valores de cálculo a adoptar. Norma EN338	165
6.10 Modelação numérica	
6.10.1 Introdução	167
6.10.2 Modelo de cálculo estrutural	168
6.10.3 Comparação do modelo numérico	169
6.10.4 Comparação das deformações obtidas numericamente com as verificadas in situ. Análise de resultados	173

6.11 Metodologia de intervenção de estrutural	
6.11.1 Introdução	177
6.11.2 Proposta de intervenção estrutural	178
6.11.3 Fichas com soluções tipo de reabilitação de estruturas de madeira	178
6.11.3.1 Ficha de diagnóstico FD01 – Pavimentos de madeira	178
6.11.3.2 Fichas de diagnóstico FD02 – Cobertura de Madeira	182
6.11.3.3 Ficha de diagnóstico FD03 – Humidade em paredes exteriores	185
7. CONCLUSÃO	
7.1 Principais resultados obtidos	191
7.2 Proposta de desenvolvimento de trabalhos futuros	191
8. Referências Bibliográficas	195

ANEXOS

Anexo A1 – Plantas e cortes do edifício

Anexo A2 - Plantas Estruturais e mapeamento construtivo

Anexo A3 - Estado de Conservação

Anexo A4 - Ensaaios não destrutivos

Anexo A5 – Carta de Foro de Gralheira

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exposição da metodologia das recomendações ICOMOS	14
Figura 2 - Edifício situado na rua dos Douradores, Lisboa	16
Figura 3 - Fachadas de edifícios em Lisboa. Esq.: Rua do comércio; Dir: Avenida Elias Garcia	17
Figura 4 - Avenida Visconde Valmor, nº40, Lisboa	18
Figura 5 - Auxílio de alavanca de madeira	20
Figura 6 - Transporte de pedra pesada sobre troncos rolantes	21
Figura 7 - Habitações do Paleolítico: Cabana pré-histórica descobertas em Terra Amata, no sul de França	21
Figura 8 - Possível de evolução das habitações de madeira no período Neolítico: Esq: Solução inicial, com as fundações em contacto com o solo; Centro: Solução posterior, onde a madeira era assente em fundações de pedra, evitando contacto com o solo; Dir: Aldeia Neolítica	22
Figura 9 - Casa nobre de Ur do século XX a.c. Esq: principais divisões de uma casa tipo, numa planta de cidade; Dir: pátio (reconstituição)	23
Figura 10 - Apresentação dos artesãos no antigo Egipto	25
Figura 11- Estruturas de madeira na idade do Bronze	26
Figura 12 - Ponte de Trajano sobre o Rio Danúbio, segundo Rondelet, 1805, Tomo 3	28
Figura 13 - Esq: J. RONDELET, J. Corte da basílica de St Paulo Fora-de- Muros, mostrando a carpintaria, antes de ser destruída pelo incêndio de 1805 ; Dir: HITTORFF, J.I. Aguarela de interior de uma basílica antiga restituída, Museu d'Orsay, 1831	29
Figura 14 - Coberturas de edifícios chineses: (a) evolução ao longo das dinastias; (b) representação da sala principal de Fokuang Shu (857 d.C); (c) Evolução da complexidade desde o sistema primitivo até ao mais elaborado	30
Figura 15 - Elementos de um edifício de arquitectura Gótica: Esq: Westminster Hall, London, 1397; Centro: Abóbadas de arestas, nervuradas, colunas, arco quebrado e contrafortes; Dir: Notre Dame de Paris	31
Figura 16 - Coberturas de madeira em edifícios de arquitectura Gótica: Convento San Esteban, Salamanca	32
Figura 17 - Estruturas Medievais: Esq: Estrutura – tipo edifício construído em sistema half-timbered; Centro: Sistema hammer beam; Dir: Asna com dupla linha e Asnas de nível e de aduelas de eixo curvilíneo (ou vigas)	33
Figura 18 - Edifício Villa La Rotonda, de Palladio	34
Figura 19 - Ponte sobre o Rio Cismone, Invenção de Andrea Palladio	35
Figura 20 – Teatro Sheldonian em Oxford, asna de cobertura de Wren	35
Figura 21 - Soluções diferentes de asnas de tesoura adoptadas no Reino Unido e na América Colonial; Esq: soluções inglesas; Dir: soluções americanas	36
Figura 22 - As primeiras estruturas de laminados de madeira: pontes, desenvolvidas por Wiebeking (em cima, à esquerda); Coberturas de escolas de equitação, por Emy (direita), e viadutos ferroviários de Green (em baixo à Esquerda)	38
Figura 23– Gaiola Tridimensional	39
Figura 24 - Esqueleto ou gaiola das paredes exteriores de um edifício	40
Figura 25 - Parede divisória em Frontal de madeira	41
Figura 26 - Parede divisória em Tabique	42

Figura 27 - Asnas mais comuns em Portugal: Esq: asna simples; Dir: asna composta	43
Figura 28 - Ligações das peças das asnas: Esq: ensamblagens; Dir: ferragens	43
Figura 29 - Principais categorias de árvores: Esq: Folhosas, Dir: Resinosas	46
Figura 30 - Secção Transversal de um tronco de árvore	47
Figura 31 - Estrutura celular típica das Resinosas (Esq) e Folhosas (Dir)	48
Figura 32 - Corte Transversal do Tronco	49
Figura 33 - Organização da parede celular	50
Figura 34 - Presença de nós em vigas de pavimento da Pousada Medieval da Gralheira	52
Figura 35 - Presença de fendas de secagem	53
Figura 36 – Esquerda: Carpintaria, Alembert, séc. XVIII; Direita: Tamanhos e tipos de troncos de carvalho utilizados na construção	54
Figura 37 - Presença de fungo de podridão cúbica, Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Porto 2007	55
Figura 38 - Esquerda: Presença de ataques de insectos Xilófagos no Edifício Rua António Carneiro, Porto 2007, Direita: Largo Domingos, Porto 2006	56
Figura 39 - Esq: Presença de Térmitas, Igreja Stª Clara, Porto; Dir: Igreja de Valongo	56
Figura 40 - Esq: Presença de térmitas, Midorino, Tsukuba, Japão 2006, Dir: Ninhos de térmitas vazios	57
Figura 41 - Os raios ultravioleta decompõem lenhina e a madeira fica cinzenta, o sol provoca abertura de fendas, a humidade aloja-se nas fendas e acelera os ataques bióticos	58
Figura 42 - Deformação excessiva do pavimento de madeira	59
Figura 43 - Intervenções posteriores desadequadas	59
Figura 44 - Intervenções posteriores desadequadas	61
Figura 45 - Verificação das vigas de suporte do pavimento junto ao apoio	61
Figura 46 - Verificação das vigas de suporte do pavimento junto ao apoio	62
Figura 47 - Atribuição de classes de resistência a madeiras em serviço	68
Figura 48 - Pesquisa histórica do edifício	70
Figura 49 - Avaliação da viga de madeira com o martelo (esq.) e com o formão (dir.)	71
Figura 50 - Avaliação da integridade de viga de madeira com humidímetro	72
Figura 51 - Resultados gráficos obtidos do ensaio com o resistógrafo	73
Figura 52 - Resistógrafo, resultado de perfil de resistência à perfuração	74
Figura 53 - Avaliação da integridade de viga de madeira com Pylodyn	74
Figura 54 - Avaliação da integridade de viga de madeira com Videoscópio	75
Figura 55 - Avaliação do pavimento de madeira com sismógrafo	75
Figura 56 - Avaliação da integridade do pavimento de madeira com Ensaio de carga	76
Figura 57 – Secções dendrocronológicas, de carvalho; á direita: estrutura do século XIII com anéis de espessura extremamente variável em Courtesy Walter Horn	77
Figura 58 - Próteses de topo com elementos de madeira	90
Figura 59 - Ligações por samblagem em elementos de madeira	90

Figura 60 - Fixação de elementos às paredes para apoio do vigamento – Freicha de madeira assente em cachorros de pedra fixados à parede	92
Figura 61 – Fixação de elementos às paredes para o apoio do vigamento – cantoneira metálica	93
Figura 62 - Fixação de novas peças de madeira aos elementos degradados	93
Figura 63 - Utilização de peças metálicas agrupadas às vigas de madeira existentes num edifício na Praça do Príncipe Real 1-Lisboa	94
Figura 64 - Exemplo de uma ligação tipo empalme – Pormenor de projecto	94
Figura 65 - Exemplo de uma ligação tipo empalme	95
Figura 66 - Exemplo de uma ligação com fixação de chapas metálicas do convento Corpus Christi, Gaia, 2008	95
Figura 67 – Chapa metálica para reforço	96
Figura 68 - Elemento metálico inserido na peça de madeira como reforço	96
Figura 69 - Reforço de ligação entre duas vigas com reforço	97
Figura 70 - Reforço com chapa	98
Figura 71 - Reforço com chapa	98
Figura 72- Reforço com cintas metálicas de reforço ao longo de um elemento de madeira	99
Figura 73 - Reforço com parafusos	99
Figura 74 - Reforço por aumento de secção	100
Figura 75 - Divisão de espaçamento entre vigas	101
Figura 76 - Aplicação de soalho duplo e ligação do mesmo as paredes	101
Figura 77 - Introdução de peças metálicas sobre as tábuas a liga-las	101
Figura 78 - Introdução de placas de OSB	102
Figura 79 - Introdução de escoras de modo a criar pontos de apoio intermédios	103
Figura 80 - Introdução de tirantes metálicos para reforço	104
Figura 81 - Colocação de lajeta de betão sobre pavimento em madeira	104
Figura 82 - Substituição da cobertura por elementos compatíveis	106
Figura 83 - Efeito favorável das florestas	108
Figura 84 - Tracção paralela às fibras	111
Figura 85 - Compressão paralela às fibras	112
Figura 86 - Perpendicular às fibras	113
Figura 87 - Compressão Perpendicular às fibras	114
Figura 88 – Flexão	115
Figura 89 - Corte e torção	115
Figura 90 - Curva tensão– extensão, em madeira isenta de defeitos, na direcção das fibras (contínuo) e na direcção perpendicular às fibras (tracejado)	118
Figura 91 - Viga padrão (a) e o fenómeno de Bامbeamento (b)	123
Figura 92 - Esq: Tensões tangenciais de corte. Centro: Tensões tangenciais de deslizamento longitudinal, Dir: Tensões tangenciais de deslizamento transversal	124
Figura 93- Tensões tangenciais de corte e de deslizamento	124

Figura 94 - Caminho Português interior	130
Figura 95 - Traçado do Caminho Português interior	131
Figura 96 - Caminho de Santiago, perto da aldeia de Gralheira	132
Figura 97 - Levantamento topográfico do edifício	133
Figura 98 – Aspectos exteriores e interiores do edifício	134
Figura 99 - Levantamento arquitectónico do edifício: plantas de apresentação dos pisos e cortes	135
Figura 100 - Mapeamento construtivo	137
Figura 101- Plantas do Piso Térreo, planta estrutural do piso 0 e cobertura	138
Figura 102 - Fundações contínuas das paredes de alvenaria de pedra	139
Figura 103 - Parede Exterior de Alvenaria de Pedra	140
Figura 104 - Sobrado de madeira apoiado em paredes de alvenaria de pedra	141
Figura 105 - Soalho	141
Figura 106 - Tecto tipo “Saia Camisa”	142
Figura 107 - Estrutura de madeira na cobertura	143
Figura 108 - Estrutura de madeira: Plantas Estruturais	144
Figura 109 - Vigamento do pavimento de madeira	145
Figura 110 - Apoio da asna de madeira em parede de pedra e varas assentes em vigas de madeira	145
Figura 111 - Levantamento de Danos na planta da Cave	146
Figura 112 – Esq: Fissura forte junto ao apoio das escadas interiores; Dir: Humidade nos elementos de madeira do pavimento e fundações	147
Figura 113 - Levantamento de Danos na planta do piso	147
Figura 114 - Esq: Inexistência de soalho; Dir: Humidade na cobertura	148
Figura 115 - Esq: Deformação excessiva do pavimento de madeira; Dir: Degradação do apoio da viga	148
Figura 116 - Esq: Fungos e Podridão branca; Dir: Degradação do apoio da viga de cobertura	149
Figura 117 - Utilização de martelo na avaliação de danos	150
Figura 118 - Utilização de Resistógrafo	151
Figura 119 - Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios com o Resistógrafo	152
Figura 120 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R1	153
Figura 121 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R2	153
Figura 122 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R3	153
Figura 123 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R4	154
Figura 124 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R5	154
Figura 125 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R6	155
Figura 126 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R7	155
Figura 127 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R8	155
Figura 128 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R9	156
Figura 129 - Descrição do Humidímetro e modo de funcionamento	156

Figura 130 - Inspeção de vigas do pavimento de madeira	157
Figura 131 - Planta Estrutural com as vigas principais	158
Figura 132 - Apresentação dos equipamentos utilizados na determinação da massa volúmica e teor de humidade, Esq: Estufa, Centro: Balança digital, Dir: Provetes	161
Figura 133 - Ensaio de flexão realizados, segundo a norma NP618, 1973	163
Figura 134 - Rotura de flexão dos provetes ensaiados segundo a norma NP619, 1973	164
Figura 135 – Elementos de madeira que serviram para realização de provetes NP619, 1973	166
Figura 136 – Modelo numérico do pavimento de Madeira (fonte; Andrade, M, 2013)	166
Figura 137 – Modelos numéricos: Esq: Autodek Robot Analysis 2014; Dir: Arlktec Tricalc 8.0	169
Figura 138 – Gráficos de momentos flectores da estrutura do pavimento (Global)	170
Figura 139 – Gráficos de momentos da barra do pavimento com maior momento flector	171
Figura 140 – Gráficos de momentos flectores da estrutura do pavimento (Global)	172
Figura 141 – Deformação real da viga de madeira em análise	173
Figura 142 – Gráficos de deslocamentos global da estrutura do pavimento	174
Figura 143 – Entrega da viga de madeira na parede de alvenaria	174
Figura 144 – Gráficos de deslocamentos da Barra isolada com maior deformação	174
Figura 145 – Localização das patologias e identificação das mesmas – Pavimento	179
Figura 146 – Corte e remoção da madeira deteiorizada após escoramento	181
Figura 147 – Injecção de cola epoxídica nos furos para instalação dos varões	181
Figura 148 – Injecção de calda epoxídica nos entalhes das próteses	181
Figura 149 – Localização das patologias e identificação das mesmas - Cobertura	183
Figura 150 – Introdução de cabos de aço com esticadores a ligar as pernas das asnas - Cobertura	185
Figura 151 – Localização das patologias e identificação das mesmas - Cobertura	185
Figura 152– Protecção da fundação com drenagem e impermeabilização	187
Figura 153 - Barreira horizontal com os furos a serem executados a 15cm da cota de soleira	188
Figura 154 – Constituição de Pavimento Térreo	189

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1: Propriedades físicas e mecânicas de madeira folhosa para estruturas (resinosas)	66
Tabela 4.2: Propriedades físicas e mecânicas de madeira folhosa para estruturas (folhosas)	66
Tabela 4.3: Relação entre classes de qualidade e classes de resistência	67
Tabela 4.4: Classes de resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira	69
Tabela 5.1: Valores de K_{mod} para madeira maciça	126
Tabela 5.2: Valores de k_{def} para madeira maciça	127
Tabela 6.1: Registo de informação para o piso e cobertura com o Humidímetro	158
Tabela 6.2: Medições de Massa Húmida, Seca e Humidade relativa	161
Tabela 6.3: Resultados dos ensaios provetes isentos de defeitos e norma EN338	167
Tabela 6.4: Comparação entre os dois modelos de Cálculo: Modelo 01 e Modelo 02	173
Tabela 6.5: Valores de k_{def} para madeira maciça	175
Tabela 6.6: Combinação rara de ações, aplicando os coeficientes K_{def}	175
Tabela 6.7: Comparação entre deformação final variando as condições de apoio	177

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 6.1: Medições de massa húmida, seca e humidade relativa	162
Gráfico 6.2: Força-deslocamento de flexão	164

1



INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A madeira, como um material de eleição pela sua abundância, com boas características mecânicas e durabilidade, especialmente quando conservada correctamente, foi desde sempre um dos materiais mais utilizados pelo homem desde há séculos, com aplicações de enorme diversidade e variedade por todo o Mundo e que ainda hoje se mantêm em bom estado de conservação. A razão principal pela qual a madeira é apresentada como um material de construção de excelência é ser amiga do ambiente, sendo dos únicos materiais de construção renovável.

Porém, apesar destas características, têm-se averiguado que, ao longo do tempo, e por diversas razões, as estruturas de madeira foram desaparecendo dando lugar a elementos estruturais constituídos por outros materiais, resultado de intervenções pouco atentas às preexistências. Contudo, grande parte das vezes, é fruto do desconhecimento das potencialidade e qualidade da madeira, acaba por resultar em perdas irremediáveis para a riqueza patrimonial dos países, devendo por isso ser feito um esforço efectivo e contínuo para a contrariar.

A reabilitação e conservação de edifícios antigos é, nos dias de hoje, cada vez mais, um tema de interesse geral, assumindo um papel importante na renovação dos centros históricos de cidades. Assim, é

fundamental solicitar esforços para preservar o património arquitectónico, contrariando, por um lado, a degradação do património edificado e por outro, o seu abandono. Assim, as patologias das estruturas de madeira e respectivas soluções de intervenção assumem um papel importante no meio técnico da reabilitação de edifícios.

A experiência retirada ao longo dos últimos anos de trabalho no NCREP (Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património) na análise de estruturas antigas de madeira, acaba por ser uma das bases fundamentais desta dissertação. A análise de estudos existentes, nomeadamente teses de mestrado e de doutoramento, assim como de normas, regulamentos e outras publicações, tanto de carácter científico como de carácter mais geral, foram também instrumentos essenciais de para a elaboração desta dissertação.

1.2 ÂMBITO E OBJECTIVOS

A presente dissertação, com o título *“A madeira em estruturas antigas: diagnóstico e metodologias de intervenção. Pousada Medieval da Gralheira – Caso de Estudo”*, focará a análise estrutural de estruturas antigas de madeira de castanho, abordando as essenciais fases de inspecção, diagnóstico e metodologias de intervenção estrutural.

Assim, esta dissertação tem como principal objectivo demonstrar a viabilidade da preservação/reabilitação dos elementos estruturais das coberturas e pavimentos em madeira de castanho, definindo metodologias de inspecção de diagnóstico que permitam avaliar de uma forma expedita a sua segurança.

De forma a apoiar algumas das conclusões retiradas sobre o estado de conservação da estrutura de madeira, e de forma a avaliar a mesma, faz-se-á a análise de ensaios realizados a elementos estruturais de pavimentos e cobertura de madeira: ensaios destrutivos (ensaios laboratoriais) e não destrutivos (Resistografo e Humidímetro).

A análise do pavimento em madeira foi completada com a realização de um modelo numérico com o objectivo de analisar o comportamento da estrutura em termos de estado de limite de serviço. São descritas técnicas de reabilitação e reforço de pavimentos de madeira, associando-as a danos ou necessidades específicas, e é feita uma análise crítica comparativa que pode ajudar a definir quais as medidas mais adequadas a cada situação.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para além deste capítulo introdutório, no qual se faz uma breve apresentação do trabalho realizado e onde resumidamente se apresenta o seu conteúdo, a tese encontra-se organizada noutros 6 capítulos.

No Capítulo 2 far-se-á uma abordagem à temática da conservação e reabilitação de edifícios antigos, procurando-se avaliar o reconhecimento da importância do património histórico, arquitectónico, urbanístico, arqueológico, natural e cultural, tornando-se uma responsabilidade dos governos e autoridades locais, para além de ser um direito das comunidades, intervir directamente no no património arquitectónico, que é um bem não renovável, no respeito pelas tradições e pelo passado cultural que são expressão concreta da memória dessas comunidades.

Nesse sentido, foram estudadas diferentes doutrinas, cartas, recomendações e convenções para a protecção e preservação do património cultural construído. O património cultural é um testemunho da identidade das diferentes comunidades humanas, que assume um valor incalculável servindo de memória e referência cultural e identitária aos vindouros. A temática da conservação do património tem sido uma das prioridades comunitárias de todos os países europeus, por razões de ordem social, económica, histórica, cultural, ambiental e de sustentabilidade.

No Capítulo 3 far-se-á uma perspectiva geral sobre a evolução das estruturas de madeira ao longo dos tempos, desde a pré-história até à actualidade, passando pelas principais épocas e regiões onde esta teve um papel crucial.

No Capítulo 4, apresentar-se-á uma referência ao material madeira atendendo à sua origem e composição, procurando demonstrar o seu papel e desempenho como material estrutural, assim como os principais tipos de degradação e exhibir as fases obrigatórias de inspecção e diagnóstico, procurando encontrar formas simples e expeditas de apoiar a decisão de manutenção/reabilitação ou substituição. Serão mencionados ainda alguns dos ensaios não destrutivos e destrutivos existentes e que se resumem, na sua maioria, à avaliação da rigidez e da capacidade resistentes dos elementos de madeira. Por fim apresentam-se metodologias de intervenção estrutural, no que respeita a técnicas de reforço.

No Capítulo 5, abordar-se-á a forma de verificação, segundo o Eurocódigo 5 das estruturas de madeira.

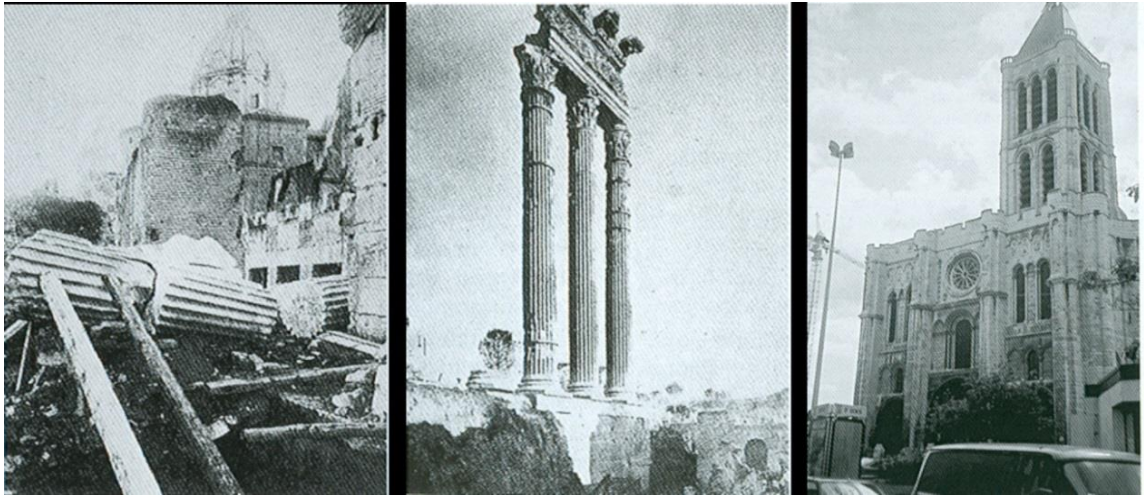
No Capítulo 6 apresentar-se-á o caso de estudo desta dissertação, que envolve um caso concreto de estudo, nomeadamente “Pousada Medieval da Gralheira” em Vila Pouca de Aguiar, que reflecte uma realidade comum a uma infinidade de construções semelhantes dispersas pelas paisagens rurais de Trás-os-Montes. Assim sendo faz-se um enquadramento histórico de edifício estudado “ Pousada Medieval da Gralheira”, caracterização arquitectónica e inspecção e diagnóstico de modo a permitir o levantamento de

dados relevantes à futura análise do comportamento estrutural e estado de conservação das estruturas de madeira. Com o intuito de conhecer as características mecânicas, realizou-se uma campanha de ensaios destrutivos e não destrutivos, no madeiramento do pavimento e da cobertura, cuja oportunidade surgiu pelo facto do edifício em estudo existente ter sido sujeito a uma demolição parcial por parte dos donos de obra. Os ensaios mecânicos realizados em laboratório com provetes isentos de defeitos, que resultaram da madeira retirada do pavimento, foram executados com a finalidade de determinar as propriedades físico-mecânicas da madeira, nomeadamente a massa volúmica, tensão de rotura à flexão na direcção do fio e módulo de elasticidade na direcção do fio. Em simultâneo e paralelamente a estes foram realizados ensaios não destrutivos, com recurso ao Resistógrafo e Humidímetro, de modo a avaliar o estado de conservação da madeira. A análise do pavimento em madeira foi completada com a realização de um modelo numérico com o objectivo de analisar o comportamento da estrutura em termos de estado de limite de serviço.

São apresentadas técnicas de reabilitação e reforço de pavimentos de madeira, associando-as a danos ou necessidades específicas, e é feita uma análise crítica comparativa que pode ajudar a definir quais as medidas mais adequadas a cada situação.

Finalmente, no Capítulo 7, apresentar-se-ão as principais conclusões referidas ao longo desta dissertação e serão feitas algumas sugestões para futuros estudos e trabalhos.

2



TEORIA HISTÓRICO-CRÍTICA DA CONSERVAÇÃO E RESTAURO DE EDIFÍCIOS HISTÓRICOS / CRITÉRIOS DE INTERVENÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Ao longo da última centúria, o património histórico, construído em contexto urbano, foi encarado pela nossa sociedade com desprezo e como um impedimento ao progresso. Esta realidade é paradoxalmente inversa ao crescimento e desenvolvimento das urbes e do mercado da construção (Património, 2012).

Por vezes, o adjectivo “velho” significa qualidade e carácter: veja-se o caso do “Porto Velho”, mas é raro, normalmente “velho” surge conotado com uma ideia de “decadência” ou de “degradação”. É o que acontece quando se trata de edifícios. Ao conceito de “velho” justapõe-se naturalmente o de “antigo”: descrever um certo edifício como “antigo”, pressupõe que se fez ou tenciona fazer algo, pelo menos para travar o seu processo de degradação, isto é, conservar ou preservar.

Desejavelmente, até, procura-se restituir tal edifício a um estado semelhante ao que apresentava quando foi construído, promovendo o seu restauro. Nos tempos mais recentes tem vindo a criar raízes um

novo movimento, que valoriza a manutenção da concepção original dos edifícios promovendo intervenções de reabilitação “filosóficas” (Coias, 2009).

É hoje ponto assente que a salvaguarda de um monumento ou de um edifício histórico passa pela manutenção do seu valor tecnológico, isto é, pela preservação dos materiais e técnicas construtivas utilizadas, e por extensão, do funcionamento estrutural original.

De acordo com este conceito, é possível dotar os edifícios antigos não só com as condições de habitabilidade e conforto, assim como as condições de segurança, segundo os padrões actuais, designadamente face ao risco sísmico, que os tornem atraentes para uma clientela exigente e sensibilizada para a importância da salvaguarda do valor histórico da cidade e do património construído (Cóias, 2007).

Neste capítulo faz-se uma abordagem à temática da conservação e reabilitação de edifícios antigos, procurando-se avaliar o reconhecimento da importância do património histórico, arquitectónico, urbanístico, arqueológico, natural e cultural, que fez com que ao longo dos anos surgissem vários tratados a nível internacional, com o objectivo de estabelecer directrizes e de legislar as intervenções, cabendo a cada Estado a responsabilidade do seu cumprimento tendo em conta a cultura e o contexto em que se insere.

Assim, foram estudadas diferentes doutrinas, cartas, recomendações e convenções para a protecção e preservação do património cultural construído.

2.2 CONCEITOS RELACIONADOS COM A CONSERVAÇÃO DO PATRIMÓNIO EDIFICADO E URBANÍSTICO

Os conceitos e as doutrinas sobre o património cultural evoluíram extraordinariamente ao longo deste século e não permanecerão, seguramente, imutáveis.

Nos últimos tempos tem-se assistido a um crescente interesse pela identificação, preservação e divulgação do património arquitectónico. Este interesse, centrado inicialmente na preservação dos monumentos de maior significado histórico, alargando-se posteriormente aos centros históricos e, mais recentemente, aos ambientes construído e paisagístico, numa visão globalizante dos problemas.

Ao abordar o tema *Teoria Histórico-Crítica do Restauro Arquitectónico e da Reabilitação de Núcleos Urbanos* torna-se necessária a definição de conceitos subordinados ao tema.

Património Cultural, conjunto de materiais ou objectos, que associados a tradições culturais, pelo seu valor próprio, devem ser considerados de interesse relevante e abrange duas categorias distintas, tais como obras de arte móveis (livros manuscritos, objectos artísticos e arqueológicos) e obras de arte imóveis (monumentos arquitectónicos, históricos, edifícios de interesse histórico).

Monumento, estrutura construída por motivos simbólicos ou comemorativos, podendo representar testemunho da história ou da cultura, mesmo sendo modesta, possa representar testemunho, lembrando a memória de um acontecimento ou personagem do passado.

Existem dois tipos de monumentos, monumentos mortos (testemunhos de civilizações passadas sem utilidade funcional) e monumentos vivos que mantêm a sua função inicial. Os monumentos são construídos com um duplo propósito de comemorar um acontecimento, ou homenagear uma personagem, com um significado importante para uma determinada colectividade.

Conservação, conjunto de medidas que se adoptam no sentido de aumentar a durabilidade da construção, prevenindo-se assim a degradação e conseqüente ruína, englobando a realização de operações de manutenção associadas essenciais ao correto funcionamento de todas as partes e elementos construtivos.

A *conservação integrada* estabelece responsabilidades aos poderes locais, assim como aos cidadãos, e implica medidas legislativas e administrativas para aplicação de métodos e técnicas e aptidões de modo a manter ou valorizar a estrutura histórica, cultural e arquitectónica.

Restauro, acções especializadas e coordenadas, no sentido de protecção e manutenção do património edificado, recuperando as características próprias dos materiais e a forma original da construção de acordo com a imagem que tinha em determinada época, respeitando assim as características específicas, formais e intrínsecas.

Manutenção, conjunto de procedimentos, de forma a minimizar a deteriorização dos elementos construtivos a longo prazo, que realizados periodicamente evitam operações profundas de reabilitação. Desta forma, a estrutura existente continua a desempenhar a funcionalidade para a qual foi materializada. Esta acção tem cariz de tratamento preventivo (Salavessa, Novembro 2005).

Reparação, conjunto de procedimentos correctivos, de forma a manter a funcionalidade local ou global da estrutura, face à deteriorização dos elementos construtivos. Esta abrange condicionamentos de resistência, estabilidade, durabilidade e funcionalidade. Deve-se, assim, manter os elementos construtivos existentes, evitando ao máximo agregar elementos alheios à obra original.

Reconstrução, representa um caso particular da reparação, orientada para a substituição total ou parcial, de um elemento que desapareceu, ou está destruído, ou foi mesmo intencionalmente destruído ou demolido, onde inclui posteriormente uma construção nova sem preocupações de coerência com a obra original.

Anastilose, técnica reconstrutora/restauradora, que é aplicável a subconjuntos, plasticamente muito característicos e de limitada dimensão, com procura, recuperação e pré-montagem a seco, de elementos

originais, que se encontram junto da construção, ou muito próximos da *mesma*, fazendo a reprodução de alguns desses elementos a partir das peças originais.

Reabilitação, ações de intervenção necessárias e suficientes para dotar de condições de segurança, funcionalidade e conforto, respeitando a sua arquitectura, tipologia e sistema construtivo. Inclui medidas coordenadas e orientadas para uso novo ou modernização do mesmo, com uma melhoria a níveis construtivos, ambientais e funcionais.

Deste conceito, podemos destacar três pontos fundamentais, tais como *Reabilitação urbana*, *Revitalização urbana* e *Renovação urbana*.

Assim, *Reabilitação urbana* é uma nova política urbana, que aponta a valorização sócio-económica, ambiental e funcional de um núcleo populacional e integra estratégias de intervenção múltiplas (parque edificado, equipamento comunitário, espaços livres).

Revitalização urbana engloba operações de valorização de áreas urbanas degradadas, de centros históricos ou de valor arquitectónico, para relacionar intervenções pontuais de recuperação de edifícios com intervenções abrangentes de reabilitação de estruturas sociais e económicas e culturais.

Renovação urbana é a intervenção em área urbana degradada de valor patrimonial reduzido, com demolição e substituição de estruturas morfológicas e tipológicas por um novo modelo urbano, com novas edificações, de tipologia arquitectónica contemporânea e com nova estrutura funcional (Salavessa, Novembro 2005).

2.3 CARTAS E CONVENÇÕES INTERNACIONAIS. FILOSOFIA DE INTERVENÇÃO

A “Teoria da Conservação” inicialmente formulada por Camillo Boito (1826 – 1914) e posteriormente por Cesare Brandi (1906 – 1988) deu maior ênfase na intervenção mínima e na salvaguarda dos materiais originais.

É importante, a manutenção dos materiais e funcionamento estrutural, não só nos monumentos e edifícios históricos, mas também em edifícios antigos correntes – aqueles que constituem património arquitectónico relevante, sobre os quais justifica-se uma abordagem idêntica; deste modo, reduz-se o impacto da intervenção de reabilitação quer do ponto de vista ambiental, através da redução das quantidades de entulhos e resíduos produzidos, e da quantidade de materiais novos consumidos.

Os seguintes excertos situam a reabilitação estrutural dos edifícios dos centros históricos no contexto das convenções internacionais que visam a salvaguarda do património arquitectónico e ajudam a compreender a responsabilidade dos intervenientes no processo da sua reabilitação (Cóias, 2007):

A **Carta de Atenas sobre o Restauro de Monumentos Históricos** (Serviço Internacional de Museus da Sociedade das Nações, Atenas, Grécia, Outubro de 1931), tese redigida por Le Corbusier, resume-se a quatro conceitos fundamentais: “habitar, trabalhar, recrear-se, circular”; no que diz respeito ao capítulo referente ao património histórico, o documento refere que:

“Caso o restauro seja indispensável, em consequência de degradação ou de destruição, a Conferência recomenda o respeito pela obra histórica ou artística do passado, sem eliminar o estilo de nenhuma época”, “ A conferência recomenda que se mantenha o uso dos monumentos, afetando-os a funções que respeitem o seu carácter histórico ou artístico, de modo a assegurar a continuidade da sua vida”.

Na **Carta de Veneza sobre Conservação e o Restauro de Monumentos e Sítios** (ICOMOS, Veneza, Itália, Maio de 1964), é afirmado que o sítio rural ou urbano testemunho de uma civilização particular é monumento histórico aplicando-se mesmo a obras modestas a que o tempo transmitiu significado cultural. O documento refere que:

“Os monumentos de um povo, portadores de uma mensagem do passado, são um testemunho vivo das suas tradições seculares. A humanidade tem vindo progressivamente a tomar maior consciência da unidade dos valores humanos e a considerar os monumentos antigos como herança comum, assumindo colectivamente a responsabilidade da sua salvaguarda para as gerações futuras e aspirando a transmiti-los com toda a sua riqueza e autenticidade”.

Na **Carta para a Protecção dos bens culturais em caso de Conflito Armado** (UNESCO, Haia, Países Baixos 14 de Maio de 1954) (Appleton, 2003), esta convenção, visa salvaguardar e assegurar o respeito pelos bens móveis ou imóveis que representam uma grande importância para o património cultural dos povos, qualquer que seja a sua origem. A carta afirma:

“as leis e costumes da guerra em terra, que instituiu pela primeira vez um embrião de protecção internacional para os edifícios consagrados às artes e às ciências, bem como para os monumentos históricos, visa esta Convenção salvaguardar e assegurar o respeito pelos móveis e imóveis que representem uma grande importância para o património cultural dos povos, qualquer que seja a sua origem ou o seu proprietário”, “ O respeito pelos bens protegidos impõe-se tanto ao Estado onde eles se encontrem como os seus adversários”, “ Elas comprometem-se, além disso ,a proibir e prevenir qualquer ato de roubo, pilhagem, desvio ou vandalismo em relação a bens culturais. Está prevista uma protecção essencial para aqueles bens de grande importância, assim como para os abrigos destinados a protegê-los”.

Na **Convenção para a protecção do Património Mundial, Cultural e Natural** (UNESCO, Paris, França, Novembro de 1972) (Appleton, 2003), esta convenção faz referência à ameaça de destruição ao património cultural e natural. A carta afirma:

“o património cultural e o património natural estão cada vez mais ameaçados de destruição, não apenas pelas causas tradicionais de degradação, mas também pela evolução da vida social e económica que as agrava através de fenómenos de alteração ou de destruição ainda mais importantes”.

Na **Carta Europeia do Património Architectónico** (Conselho da Europa, Estrasburgo, França, Outubro de 1975) (Appleton, 2003), destaca particularmente a importância não só da preservação dos monumentos, mais importantes, mas também do conjunto de construções mais modestas com interesse cultural e científico. O documento refere:

“Foram desenvolvidos esforços consideráveis em todos os países europeus para sensibilizar o público para insubstituíveis valores culturais, sociais e económicos dos monumentos, conjuntos e sítios históricos, no meio urbano e rural”.

O **Documento de Nara** é concebido no espírito da Carta de Veneza, 1964 no que respeita a salvaguarda da autenticidade constituindo o seu prolongamento como resposta à expansão do interesse e preocupações para o património cultural no nosso mundo contemporâneo.

Contrariamente às forças da globalização e da homogeneização a procura de uma identidade cultural, por vezes, exprime-se ligada a um nacionalismo agressivo e à supressão de culturas minoritárias, revelando-se uma contribuição essencial na formulação do conceito de autenticidade na prática da conservação e que consiste em clarificar e pôr em destaque a memória colectiva da humanidade.

A segurança e o conforto são, também, a linha preconizada por esta carta, quando estabelece que *“As normas usuais de construção e de segurança dos edifícios não deverão aplicar-se de forma automática ao património arquitectónico. As medidas e as normas deverão ser postas em prática graças a regras de eficácia, que resultem de uma escolha flexível e otimizada de medidas organizacionais, técnicas e estruturais”*.

Na **Carta Internacional do Turismo Cultural** (ICOMOS, Cidade do México, Outubro 1999) (Appleton, 2003), destaca que o património natural e cultural pertence a toda a humanidade, sabendo que cada um de nós possui direitos e deveres relativamente à compreensão, conservação destes valores universais e apreciação destes. Na carta afirma:

«O património natural e cultural pertence a toda a humanidade. Cada um de nós tem o direito e a responsabilidade de compreender, apreciar e conservar os seus valores universais.»; «O património

específico e a memória colectiva de cada comunidade e de cada local são insubstituíveis e constituem um pilar fundamental para um desenvolvimento actual e futuro.»

Na **Recomendação sobre a Salvaguarda dos conjuntos históricos e da sua função na vida contemporânea** (UNESCO, Nairobi, Quénia, Novembro de 1976) (Appleton, 2003), nesta convenção é notório o valor dado aos conjuntos históricos que fazem parte do ambiente quotidiano dos seres humanos, considerando que os conjuntos históricos têm constituído através dos tempos, os testemunhos de riqueza e diversidade mais tangíveis das criações culturais, religiosas e sociais da sociedade. A carta destaca:

“Considerando que os conjuntos históricos fazem parte da vida quotidiana dos seres humanos em todos os lugares, constituindo a presença viva do passado que os moldou”, “por isso mesmo, adquirem um valor e uma dimensão humana suplementares”.

Na **Convenção para a Salvaguarda do Património Architectónico da Europa** (Conselho da Europa, Granada, Outubro de 1982) (Appleton, 2003), é dito que:

“Uma união mais estreita entre os seus membros, nomeadamente a fim de salvaguardar e promover os ideais e princípios que constituem o seu património comum”, “O património architectónico constitui uma expressão insubstituível da riqueza e da diversidade do património cultural da Europa, um testemunho inestimável do nosso passado e um bem comum a todos os europeus”.

Na **Carta de Washington sobre a Salvaguarda das Cidade Históricas** (*Washington, Outubro 1987*) (Appleton, 2003), esta carta refere-se a conjuntos urbanos históricos, independentemente da dimensão, incluindo as cidades, vilas e centros históricos com envolvente natural construída pelo homem, aos quais constituem uma expressão dos valores próprios das civilizações urbanas tradicionais. Nesta é dito:

“Os valores a preservar são de carácter histórico da cidade e o conjunto dos elementos materiais e espirituais que a sua imagem exprime, em particular, a forma e o aspeto dos edifícios (exterior e interior), tal como definidos pela sua estrutura, volume, estilo, escala... Os atentados contra esses valores comprometem a autenticidade da cidade histórica.”

Na **Carta de Lisboa sobre a Reabilitação Urbana Integrada** (1º Encontro Luso- Brasileiro de Reabilitação Urbana, Lisboa, Outubro de 1995) (Appleton, 2003), e tem como finalidade:

“(...) para além de foliar uma linguagem comum, com as necessárias adaptações nacionais, o estabelecimento dos grandes princípios que deverão nortear as intervenções, bem como dos caminhos para a sua aplicação. A Reabilitação Urbana utiliza técnicas variadas, cuja definição e objecto de análise é aceite, nomeadamente: Renovação Urbana, Reabilitação Urbana, Revitalização Urbana, Requalificação urbana, Reabilitação de um Edifício, Restauro de um Edifício, Reconstrução de um edifício, Renovação de um edifício, Conservação de um edifício, Manutenção de um Edifício”.

Na **Carta sobre o Património Construído Vernáculo** (ICOMOS, Cidade do México, 23 de Outubro de 1999) (Appleton, 2003), são referidas características das construções (métodos tradicionais de construção) e princípios de conservação expressivos de cada região e reflecte uma identidade cultural e histórica, orientações práticas quanto a investigação e documentação, a relação com a paisagem, substituição de elementos e materiais arquitectónicos, adaptação e reutilização de construções e critérios sobre alterações e formação técnica e de ofícios inerentes à construção vernácula.

“O património construído vernáculo é importante, é a expressão fundamental da cultura de uma comunidade, da sua relação com o território e, ao mesmo tempo, a expressão da diversidade cultural do mundo”, “As construções vernáculas apresentam as seguintes características: um modo de construir partilhado pela comunidade, um carácter vincadamente local ou regional em resposta ao meio envolvente, uma coerência de estilo, de forma e de aparência, ou utilização de tipos de construção tradicionalmente estabelecidos, uma sab (Vitruvius, 1860)edoria tradicional na composição e na construção transmitida de modo informal, uma resposta eficaz aos constrangimentos funcionais, sociais e ambientais, uma aplicação eficaz das técnicas e ofícios tradicionais de construção”.

Na **Carta de Cracóvia** (Appleton, 2003), surge em 2000, com uma filosofia dentro do espírito da Carta de Veneza, onde aborda os princípios de conservação e restauro do património construído, refere-se a manutenção e a reparação, o património arqueológico, os edifícios históricos e monumentos, a decoração arquitectónica, desde esculturas e elementos artísticos.

Esta carta salienta métodos, diferentes tipos de património construído, nomeadamente, edifícios com valor histórico, desde aldeias históricas e paisagens, incluindo definições sobre o património, monumento, autenticidade, identidade, conservação e restauro. A carta afirma:

“Os edifícios que constituem as áreas históricas podendo não ter eles próprios valor arquitectónico especial, devem ser salvaguardados como elementos do conjunto pela sua unidade orgânica, dimensões particulares e características insubstituíveis na unidade orgânica da cidade. O Projecto de restauro das áreas históricas contempla os edifícios da estrutura urbana na sua dupla função, os elementos que definem a sua forma urbana e os valores espaciais internos que são uma parte essencial do edifício”.

No caso de edifícios antigos ou monumentos, as soluções envolvendo alterações estruturais profundas são portanto de excluir. Devem por isso preencher os requisitos de salvaguarda aplicando os seguintes critérios:

Eficácia: a intervenção deve ser eficaz, e a sua eficácia deve ser demonstrada por provas qualitativas e quantitativas.

Compatibilidade: A intervenção deve ser compatível com a estrutura original e os seus materiais, do ponto de vista químico, mecânico, tecnológico e arquitectónico.

Durabilidade: A intervenção deve ser realizada usando materiais e técnicas cuja durabilidade seja comprovadamente comparável com a dos outros materiais do edifício. É aceitável uma intervenção menos durável, se se prevê uma substituição periódica.

Reversibilidade: A intervenção deve ser tão reversível quanto possível, para que possa ser removida, se uma decisão diferente for tomada no futuro.

A estes critérios ainda se pode juntar:

Eficiência: A intervenção deve ser feita com o menor consumo possível de recursos, e sempre que possível, com menor custo.

A prioridade da salvaguarda da *autenticidade* do monumento sobre o respeito pelas prescrições regulamentares, é de resto a linha seguida pela normativa italiana, que distingue dois graus de intervenção em património arquitectónico:

- *Intervenção de melhoria:* execução de uma ou mais obras envolvendo apenas os elementos estruturais do edifício com o objetivo de conseguir um maior grau de segurança sem, no entanto, lhe modificar de maneira substancial o comportamento global.
- *Intervenção de adequação:* torna o edifício apto para resistir às ações sísmicas previstas na regulamentação.

De acordo com o princípio da “intervenção mínima”, consagrado nas **Recomendações ISCARSAH** (ICOMOS), refere:

“(…) O valor de cada construção histórica não está apenas na aparência de elementos isolados, mas também na integridade de todos os seus componentes como um produto único da tecnologia de construção específica do seu tempo e do seu local. Desta forma, a remoção das estruturas internas mantendo apenas as fachadas não se adequa aos critérios de conservação.”

“(…) Qualquer intervenção deve, até onde for possível, respeitar a concepção e as técnicas de construção originais, bem como o valor histórico da estrutura e da evidência histórica que representa.”

Isto é, as intervenções nos edifícios antigos dos centros históricos devem cingir-se ao primeiro grau, em que devem manter o funcionamento estrutural original, podendo, se necessário, introduzir elementos de reforço que não alterem e que possam ser removidos, sem danificar o edifício.

As intervenções do segundo grau só são aceitáveis em edifícios que, embora antigos, não apresentem valor relevante enquanto património arquitectónico nem se encontrem incluídos em zonas classificadas como de interesse cultural.

Nestas situações, nestes casos, uma intervenção pouco intrusiva, respeitadora dos critérios acima descritos, pode ser economicamente mais interessante do que uma intervenção baseada na utilização excessiva de betão ou de aço (ICOMOS, 2004).

2.4 PROBLEMA ACTUAL NA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

“O património arquitectónico representa um bem valioso considerando os aspectos culturais e também económicos”. (ICOMOS, 2004)

“A consciência tardia da importância da Herança Cultural leva a que, apesar dos investimentos consideráveis nesta área, os quais têm resultado num desenvolvimento técnico-científico notável, a compreensão exacta da realidade das construções antigas, bem como, a sua reabilitação adequada sejam ainda desafios muito importantes (...)” (ICOMOS, 2004)

“As construções degradam-se com o tempo pelo que a conservação e o restauro do património são uma forma de desenvolvimento sustentável. Por outro lado, a sociedade civil actual exige a protecção do património de valor cultural e a sua transferência para as gerações vindouras, pelo que a conservação e restauro do património é também uma forma de cultura.” (ICOMOS, 2004)

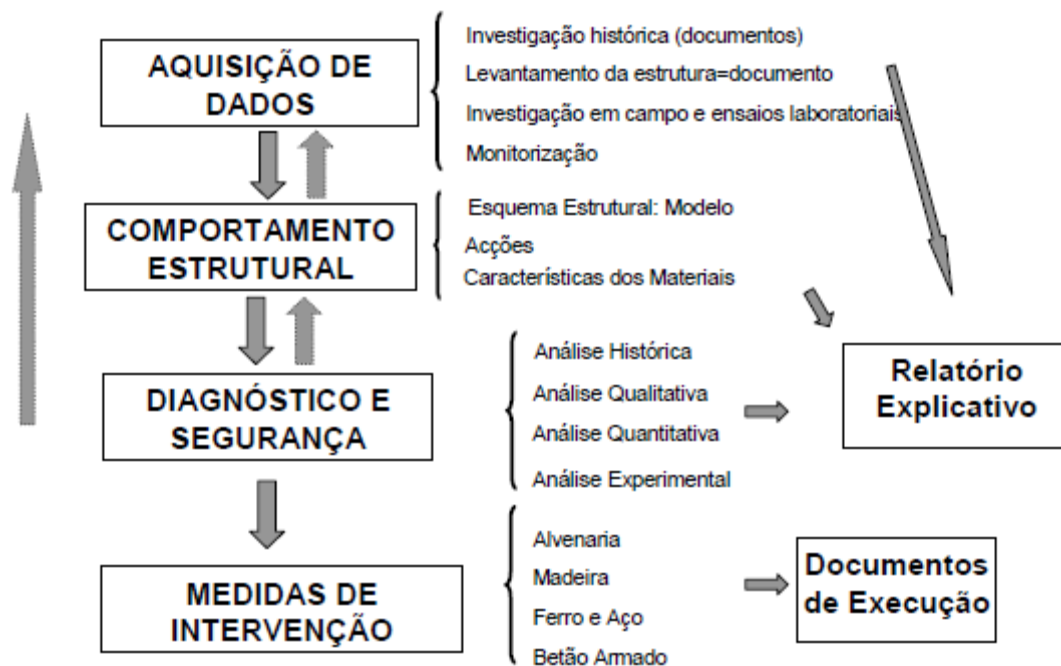


Figura 1 – Exposição da metodologia das recomendações ICOMOS (fonte: Lourenço.P,2007)

As intervenções de reabilitação de edifícios antigos revestem-se de uma enorme especificidade e um nível de complexidade muito superior à construção corrente, exigindo uma adequada consciencialização e formação dos diversos agentes envolvidos.

É necessária uma rigorosa definição ao nível metodológico, estratégico, operacional e tecnológico, devido à sua complexidade geométrica, intrínseca, heterogeneidade e variabilidade das propriedades dos materiais tradicionais. Existe, um escasso conhecimento sobre técnicas construtivas originais, difícil caracterização das acções e uma quase inexistência de normas ou instruções específicas que salvaguarde os técnicos.

O património edificado, nomeadamente os edifícios antigos, são muito importantes para a história das cidades e dos seus habitantes, mostrando a sua adaptabilidade e forma de viver. Este conceito tão valioso que é o património arquitectónico e histórico é visto como um elemento essencial e um valor inquestionável para a compreensão da nossa história e origens.

Pelas rápidas mudanças que a nossa sociedade vive é hoje consensual que a reabilitação é necessária, devendo ser encarada como uma necessidade, uma oportunidade e um caminho para a sustentabilidade.

Admite-se, do ponto de vista económico e de sustentabilidade ambiental, que prolongar a vida útil dos edifícios tanto quanto for possível e a degradação natural destes o permita, seja a opção mais correcta. Porém, a questão em torno do conceito de património, e em particular dos seus limites, é bastante complexa, podendo tomar diversas interpretações.

Deste modo, no contexto referido, e com base no invocado pela Carta de Cracóvia (Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico do ICOMOS, 2004)

“...Os edifícios que compõem as zonas históricas podem não apresentar por si um valor arquitectónico especial, mas devem ser salvaguardados como elementos do conjunto, pela sua unidade orgânica, dimensões particulares e características técnicas, espaciais, decorativas e cromáticas, insubstituíveis dentro da unidade orgânica da cidade”.

Quer isto dizer, reabilitar um edifício independentemente do seu valor patrimonial, significa devolver a cidade ao cidadão. É um factor de desenvolvimento, de modernidade, de equilíbrio socio-económico e cultural e como tal, deve-se ponderar como actuar, quando actuar, como prevenir, no fundo que atitude se deve ter em relação ao património edificado.

Hoje compreende-se, a necessidade de actuar e promover uma manutenção antecipada, tentando minimizar as situações que, por não terem sido previamente acauteladas levam a que os trabalhos de reabilitação venham a ter um peso económico excessivo.

A Carta de Veneza sobre Conservação e o Restauro de Monumentos e Sítios (Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico do ICOMOS, 2004), por sua vez defende a necessidade de transmitir com toda a autenticidade, as obras monumentais.

De acordo com esta Carta, as construções de carácter monumental, ou que se distinguem pela sua singularidade, a autenticidade tem uma importância relevante e deve ser assegurada, e por isso, devem ser objecto de conservação ou mesmo de restauro.

Por conseguinte, o respeito integral pela autenticidade deve ser aplicado, sobretudo a vestígios e ruínas arqueológicas. No património corrente, o conceito de autenticidade não é um valor absoluto, devendo a intervenção manter o essencial da sua imagem (de maneira autêntica) exterior e interior.

A Carta de Atenas (1933) (Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico Do ICOMOS, 2004), fornecia algumas orientações de reabilitação, definindo os monumentos a preservar, referindo inclusivamente alguns conjuntos pitorescos que, pela sua originalidade, deveriam também ser preservados. É precisamente em relação a este ponto que se verifica o primeiro problema no actual processo de reabilitação do património onde surgem normalmente as opções:

- Reabilitar? Reconstruir? Não intervir?



Figura 2 - Edifício situado na rua dos Douradores, Lisboa (fonte: NCREP, 2013)

Muitas vezes, projectos designados de “reabilitação” são na realidade projectos de reconstrução integral do interior (construção nova), mantendo unicamente as paredes exteriores resistentes, (Figura 3), à

esquerda (Esq.), mas só uma reabilitação adaptativa e pouco intrusiva pode conduzir a um resultado equilibrado; pelo contrário os monumentos são normalmente alvo de alguma intervenção por parte das entidades tutelares do património.

As fachadas são elementos importantes e valiosos pois caracterizam uma época construtiva de um edifício, funcionando como elementos de ligação com o exterior. No entanto, quando o sentido de conjunto que lhes conferia valor desaparece, acabam por se tornar simples, perdendo uma boa parte da importância cultural que tinham antes da intervenção, (Figura 3), à direita (Dir.).

A opção pela demolição do interior dos edifícios é claramente criticada pelo Comité Científico Internacional para a Análise e Restauro de Estruturas do Património Arquitectónico do ICOMOS, que apresenta no documento “Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico” (ICOMOS; 2004) as seguintes considerações:



Figura 3 - Fachadas de edifícios. Esq.: Rua do comércio, Lisboa; Dir: Avenida Elias Garcia, Lisboa (foto: Andrade, M. 2013)

“O valor de cada construção histórica não está apenas na aparência de elementos isolados, mas também na integridade de todos os seus componentes como um produto único da tecnologia de construção específica do seu tempo e do seu local. Desta forma, a remoção de estruturas internas mantendo apenas as fachadas não se adequa aos critérios de conservação (...) Qualquer intervenção numa estrutura histórica tem de ser considerada no contexto do restauro e conservação da totalidade da construção” (ICOMOS, 2004).

Um projecto de reabilitação deve entender o edifício como um todo e não como o somatório de partes, onde algumas consideradas como maior valor se procuram manter. É certo que se têm perdido as práticas e técnicas antigas de construção e que é difícil encontrar mão-de-obra qualificada, dificultando a prática de acções de manutenção e reabilitação. Em muitas situações são os estudos económicos, provavelmente pouco fundamentados, que apontam no sentido da demolição e reconstrução.

Noutras, simplesmente se aceita que o edifício não possui capacidade resistente para cumprir a função a que se destina porque é antigo e/ ou não se domina esta prática construtiva, quando na maior parte

das vezes um diagnóstico rigoroso permite concluir não só sobre o estado da estrutura, como pela qualidade dos materiais que o compõem recomendando a sua reabilitação. Aliás, a grande percentagem de edifícios antigos degradados resulta não de uma fraca qualidade construtiva, ou dos materiais utilizados, mas do abandono e falta de manutenção adequada.



Figura 4 - Avenida Visconde Valmor, nº40, Lisboa (fonte: Andrade, 2013)

Também a publicação “Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico” do ICOMOS aponta para a manutenção e salvaguarda das estruturas e elementos de construção sempre que apresente capacidade resistente para a função a que se destinam. Por outro lado, a implementação de medidas demasiado intrusivas, como é o caso da substituição da estrutura dos pisos e cobertura de madeira por lajes de betão armado, que aumentam a carga ou alteram a funcionalidade estrutural do edifício, constituem um factor de instabilidade, sendo elas próprias indutoras de danos nos elementos construtivos, obrigando, à implementação de medidas de reforço noutros elementos estruturais, nomeadamente em paredes e fundações.

A intervenção em edifícios antigos deve, portanto, decorrer após a realização de um conjunto de acções que justifiquem, de forma sustentada, a necessidade e a dimensão dessa intervenção (estudo de diagnóstico), concretizada no projecto de execução de reabilitação. O conhecimento e o respeito pelo objecto alvo de intervenção são fundamentais e devem intervir na decisão dos procedimentos e técnicas a adoptar em qualquer projecto de reabilitação.

3



AS ESTRUTURAS DE MADEIRA. BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO DA SUA HISTÓRIA

3.1 INTRODUÇÃO

A madeira foi sempre apreciada pelo homem, não só pelas suas características mas também devido à sua disponibilidade e apetência para a construção de edifícios, embarcações, mobiliário e diversos utensílios. A utilização da madeira está presente em muito do património arquitectónico nacional e mesmo mundial, remontando aos tempos da pré-história sendo dos materiais mais utilizados na construção, além de edifícios habitacionais.

A madeira, desde os primeiros abrigos artificiais até as mais modernas construções, pelo seu baixo peso próprio, e também pelo seu bom comportamento à flexão desempenhou algumas funções que o tornaram num material de eleição. Este resulta do crescimento das árvores, sendo que as espécies com troncos mais longos e de eixo rectilíneo se consideram de utilidade reconhecida no processo construtivo.

Os elementos de madeira podem ter vários tipos de aplicação, como elementos verticais, servindo como suporte de cargas provenientes das superestrutura, ou como elementos horizontais, para esforços de flexão, já que ao contrário da alvenaria, a madeira permite esforços de tracção e flexão significativos. Até ao

século XIX, a madeira era o único material que permitia uma sistemática e fácil construção de estruturas porticadas (Fitchen, 1986).

No capítulo faz-se uma perspectiva geral sobre a evolução das estruturas de madeira ao longo dos tempos, desde a pré-história até à actualidade, passando pelas principais épocas e regiões onde esta teve um papel crucial.

3.2 AS PRIMEIRAS UTILIZAÇÕES DA MADEIRA. PRÉ-HISTÓRIA

Aliada à sua trabalhabilidade, a abundância da madeira, levou a que este material se tornasse muito presente nos utensílios e ferramentas diárias que acompanharam o homem no seu desenvolvimento ao longo do período da Pré-história.

Sem qualquer tipo de cuidado ou ajuste a madeira começou inicialmente a ser usada com técnicas grosseiras, em que se partiam ramos de árvores e estas serviam de alavanca para auxiliar o movimento de pedras, (figura 5), ou mesmo para defesa contra animais selvagens, servindo como arma para caçar. As utilizações da madeira, foram inicialmente condicionadas pelas ferramentas que o Homem dispunha naquela altura, por isso apenas era utilizada madeira de árvores de pequenas dimensões.

Com a evolução dos tempos, desenvolveram-se técnicas com que a madeira era cortada e trabalhada, permitindo assim que fossem cortadas árvores com maiores dimensões.



Figura 5 - Auxílio de alavanca de madeira (Fonte: Rodrigues, Adriano, 2006)

Esta técnica antecedeu o aparecimento da roda, quando a necessidade de se transportar objectos mais pesados para distâncias cada vez maiores, aguçou o engenho do Homem que, encontrou, assim, o método de deslizar troncos sobre pedras, (Figura 6).

Quanto aos meios de elevação em desenvolvimento, já na Pré-História eram utilizadas vigas e pilares de madeira para a construção de abrigos, primeiramente de forma temporária, através de abrigos artificiais sazonais, provavelmente utilizados como acampamento por caçadores.

Estas estruturas artificiais eram forradas a colmo, folhas e terra. Isto fez com que o Homem tivesse oportunidade de abandonar as cavernas para habitar outros locais que seriam propícios para a sobrevivência. Com o desenvolvimento destas técnicas, construíram-se cabanas com uma estrutura de suporte constituída por ramos e canas, e com uma cobertura revestida de folhas e argila, peles de animais e mesmo colmo (Rodrigues, 2006).

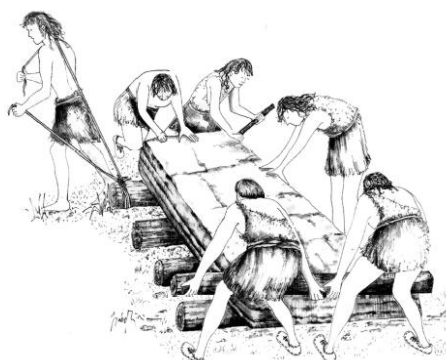


Figura 6 - Transporte de pedra pesada sobre troncos rolantes (Fonte: Rodrigues, A., 2006)

As primeiras estruturas deste género documentadas são as de Terra Amata que foram descobertas no sul de França, 1966, (Figura 7), rodeadas exteriormente por pedras de grandes dimensões. Nestas estruturas artificiais eram utilizados ramos de árvores.



Figura 7 - Habitações do Paleolítico: Esboço de Cabana pré-histórica descobertas em Terra Amata, no sul de França (fonte: Cachim, P., 2007)

Estas estruturas tinham como função proteger os caçadores, eram utilizadas por uma média de quinze indivíduos, com dimensões de 8 a 15 metros de comprimento e 4 a 6 metros de altura, tendo uma forma em planta oval. No interior destas, existiam colunas de madeira dispostas ao longo do seu eixo para suportar a cobertura.

O interior era organizado com zonas para diferentes funções, sendo o centro para uma fogueira pois estaria protegida dos ventos, e em redor desta o grupo dormia, havendo também espaços exteriores para cozinhar e mesmo trabalhar (Cachim, 2007).

Com as alterações climáticas, há cerca de 10 000 anos atrás, fizeram com que o Homem vivesse de forma sedentária através da criação de animais, agricultura e caça.

Esta época, designada de Neolítico (a nova idade da pedra), fez com que o Homem tivesse possibilidade de se estabelecer numa determinada zona, sem necessidade contínua de migrar, sendo crucial para o progresso de desenvolver as suas próprias habitações, pois a permanência no mesmo local permitia uma construção meditada e ao mesmo tempo cuidada e duradoura.

Estas pequenas casas individuais de barro e madeira, onde os colonos viviam, eram construídas com pilares cravados no solo e unidos no topo por pequenos troncos que serviam de apoio ao telhado, evoluindo mais tarde para soluções duradouras, onde era evitado o contacto da madeira com o solo, (Figura 8).

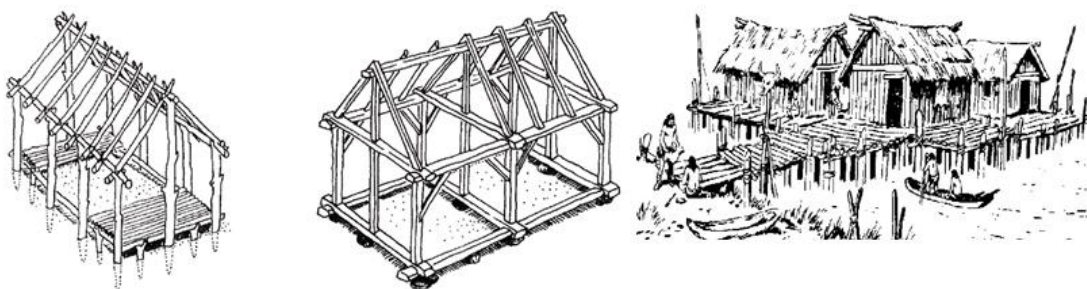


Figura 8 - Possível de evolução das habitações de madeira no período Neolítico: Esq: Solução inicial, com as fundações em contacto com o solo; Centro: Solução posterior, onde a madeira era assente em fundações de pedra, evitando contato com o solo; Dir: Aldeia Neolítica (fonte: Cachim, Paulo, 2007)

Existem registos comunitários de grandes dimensões no período Neolítico, como os de Sittart (Holanda), onde foram encontrados vestígios de fundações de madeira em edifícios que tinham até 80 metros de comprimentos.

Também em Woodhenge, nos arredores de Stonehenge, foram usados postes de madeira para construir uma estrutura em que tudo semelhante à de Stonehenge, local onde também existiam suspeitas de que originalmente teria sido construído com troncos de madeira, onde posteriormente foram substituídos por elementos de pedra que resistem até à actualidade (Kostof, 1996).

No fim do Neolítico, o Homem encontrava-se no estágio de desenvolvimento actual e, no médio Oriente, surgem as primeiras grandes civilizações.

3.3 AS ANTIGAS CIVILIZAÇÕES. A CONSTRUÇÃO EM MADEIRA ATÉ AO SÉCULO XIX

O aparecimento das primeiras grandes civilizações há mais ou menos 6 000 anos marca o início do período em que o homem atingiu o estado evolutivo atual, começando-se a organizar em comunidades, em diversas regiões do mundo.

A construção de edifícios e cidades de grandes dimensões e complexidades, foram o fruto destas civilizações, que seriam improváveis de realizar num cenário de atuação dispersa de pequenos grupos de indivíduos.

3.3.1 Civilização Mesopotâmica

O povo Sumério, a mais antiga das civilizações, foi o primeiro a habitar a região da Mesopotâmia, território situado entre as montanhas que rodeiam o actual Irão e o deserto arábico, desde o Golfo Pérsico até à Arménia. A esta civilização é atribuída algumas das principais novidades de evolução da história da humanidade, tais como a escrita, a roda e a astronomia (Muler, 1999)

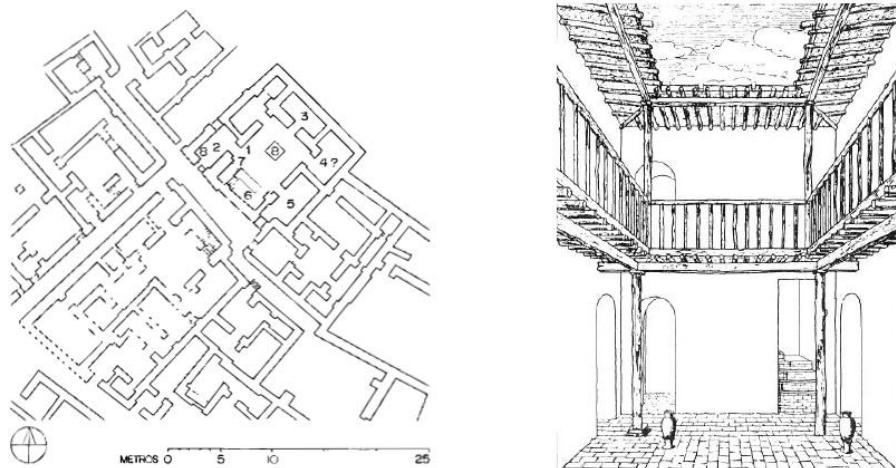


Figura 9 - Casa nobre de Ur do século XX a.c. Esq: principais divisões de uma casa tipo, numa planta de cidade; Dir: pátio (reconstituição) (fonte: Kostof, 1996)

A civilização Mesopotâmia desenvolveu-se durante cerca de dois mil anos até à sua conquista no ano 311 a.C., por Alexandre Magno (império Grego). Dada a falta de minérios e madeira nesta região, a maioria das casas eram construídas recorrendo a tijolos de adobe feitos com a argila extraída das zonas aluvionares dos rios Eufrates e Tigre, que eram colocados sem qualquer tipo de argamassa. Os construtores colocavam alguns tijolos de travamento, dada a instabilidade destas estruturas procedendo depois ao

preenchimento das lacunas com lama, engaço, cana e joio. A madeira, pedra e ferro tinham de ser importados (Kostof, 1996).

Os Zigurates são os edifícios mais famosos da Mesopotâmica, constituídos por várias plataformas sobrepostas, com um templo no topo. Estes edifícios ocupavam um lugar superior não só em termos arquitectónicos mas também em termos sociais, servindo para administrar a cidade, que recebia os bens produzidos e os dividia por toda a comunidade.

Também os construtores, artesãos e pescadores entregavam parte do seu trabalho ao templo, sendo portanto este espaço o centro económico, militar e religioso da cidade (Kostof, 1996).

Com o passar dos anos e dos povos dominantes desta região, foi-se dando um aperfeiçoamento das habitações e a edificação de cidades-templo, sendo as mais famosas Ur, Uruk, Kish, Babilónia, Assur e Kalah. Surge ainda o famoso Regulamento de Hammurabi (1792 a.C.– 1750 a.C.), considerado o primeiro regulamento de construção da humanidade.

Desde o século XX a.C., já se construíam casas com noções geométricas claras, nomeadamente a verticalidade das paredes e muralhas e os ângulos retos entre paramentos (Muler, 1999)

Kostof [1996] apresenta uma reconstituição das habitações nobres encontradas num povoado nas imediações da Ur, onde dominavam as edificações de dois pisos. O piso inferior era utilizado para serviços e convidados, enquanto o superior servia para os aposentos familiares. A planta-tipo continha um pátio amplo para recepção dos convidados, a cozinha, a casa de banho e uma escada que dava acesso ao piso superior, (Figura 9).

O pátio era ladrilhado e comportava as colunas de madeira que suportavam um passadiço superior, também em madeira, que dava acesso às várias divisões do piso superior. A cobertura sobressaía ligeiramente das paredes para as proteger da chuva, existindo também caleiras que conduziam a água desde a cobertura até ao subsolo. O mobiliário existente era semelhante ao actualmente encontrado nas casas árabes do Médio Oriente (Kostof, 1996).

3.3.2 Civilização Egípcia

A civilização Egípcia foi-se desenvolvendo a oeste Mesopotâmia, junto das margens do rio Nilo, desde a segunda catarata até à sua foz. O Nilo era o que transmitia movimento nesta civilização, que vivia praticamente da agricultura propiciada pelas cheias periódicas que sofria.

As matérias-primas comercializadas no Egito eram papel, o ouro, o cobre e cereais, sendo a madeira importada da Líbia actual, por ser um recurso escasso na região (Kostof, 1996).



Figura 10 - Apresentação dos artesãos no antigo Egipto (fonte: <http://antigoegito.org>)

As grandes obras de arquitectura eram da responsabilidade estatal, sendo uma sociedade dominada pelo faraó, tendo os edifícios seculares menor relevância. Estas construções eram demarcadas pelos materiais adobe e, juncos de madeira de modo a realçar o seu carácter passageiro, enquanto que os cemitérios e túmulos, eram constituídos por pedra natural, símbolo de eternidade (Muler, 1999). Esta civilização surgiu com aplicações muito variadas e optimizadas da madeira, aplicando-a a inúmeras funções, como peças de mobiliário (mesas, armários, cadeiras, camas, entre outros), embarcações, objectos decorativos, baús, túmulos, entre outras coisas. Existia um predomínio de carpinteiros, pois estes eram hábeis em trabalhar a madeira, (Figura 10).

Na generalidade, a madeira utilizada provinha dos países do Mediterrâneo Ocidental, em que as espécies mais procuradas eram os Cipreste, Carvalho, Pinho e Salgueiro e o Cedro, sendo este último muito utilizado no maior número de objectos.

3.3.3 Civilização Greco-Romana

A civilização Grega apareceu cerca do ano 1000 a.C, acabando por se unir com o Império Romano cerca de 750 anos depois. A civilização Romana obteve maior importância com as conquistas um pouco por toda a Europa e norte de África pelos seus imperadores. No que se refere a Termos Arquitectónicos, existiam várias circunstâncias que limitavam as técnicas construtivas da Arquitectura Clássica Grega. Uma prende-se com a modificação dos materiais usados na cobertura, no que toca a substituição de materiais leves com folhagem e ramos de árvores, por telhas de terracota, que exigiam uma estrutura mais sólida com vigas de madeira.

Com a descoberta do cimento como material de construção durante o século II d.C., e o uso de tijolos cozidos em fachadas, a atenção dos arquitectos direccionou-se das fachadas exteriores para as paredes interiores (Tomlinson, 1995).

Os Romanos utilizavam o sistema de paredes *opus craticium*, que consistia em paredes com uma estrutura de madeira, preenchida por alvenaria disposta de forma irregular, aligeirada com argamassa de pedaços de cerâmica numa pasta de palha e argila. Do *opus craticium* restam muito poucos vestígios, devido à natureza perecível dos materiais que constituem a sua estrutura. Até hoje os únicos exemplares que perduraram foram os de Pompeia e Herculano (Salavessa, 2011). Os modelos rurais são constituídos por um embasamento em alvenaria de pedra, onde assenta uma estrutura de madeira, constituída por prumos verticais, escoras diagonais e travessas horizontais de madeira e panos de enchimento em madeira ou argila. Em Pompeia e Herculano, os edifícios de vários pisos têm, ao nível do rés-do-chão, paredes de 0,40m a 0,50m de espessura, em alvenaria ou cantaria de pedra e, as paredes dos pisos superiores, de espessura máxima de 0,20m, são panos formados por um esqueleto em madeira preenchida por alvenaria em *opus incertum*, com as pedras ligadas por argamassa; as divisórias interiores eram de igual constituição; por vezes, projetavam-se varandas sobre a rua, construídas, também, em pano de madeira, avançadas em consola ou apoiadas sobre pontaletes diagonais ou colunas de madeira (Salavessa, 2011).

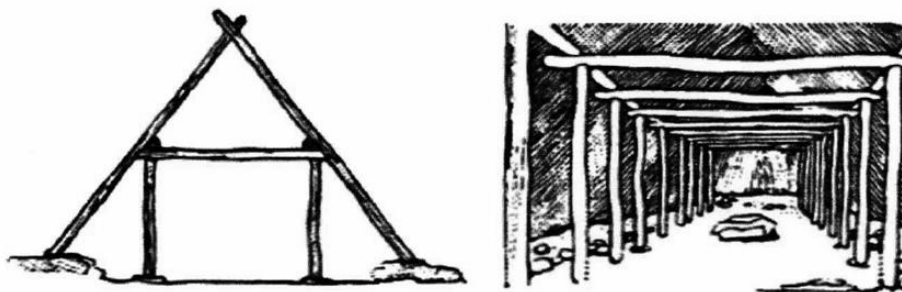


Figura 11- Estruturas de madeira na idade do Bronze (fonte: Coutinho, Joana, 1999)

Um testemunho da construção Greco - Romana pode ser obtida no famoso livro *De Architectura*, um tratado sobre a arquitectura composto por dez livros, redigido pelo romano Marcus Vitruvius Pollio no século I a.C. Os primeiros templos gregos foram construídos por altura da Idade do Bronze, onde as estruturas vindas da Pré-História adquirem uma nova complexidade, aumentando o vão livre interior e, exigindo assim um apoio intermédio, de um pórtico interior (Gwilt. J, 1860).

A civilização grega demonstrava já, conhecer o arco, mas deu maior importância às estruturas porticadas, sendo esta constituída por dois pilares de madeira sobre os quais assentava uma peça horizontal designada por contra nível. Estas estruturas eram espaçadas de poucos metros e, entre elas, existiam madres de madeira para travamento, dispostas perpendicularmente aos troncos inclinados, (Figura 11).

Vitrúvio, relata na sua obra que existiam cinco tipos de templos, diferenciados entre si pelo espaçamento entre colunas, sendo nos templos onde essa distância era superior a 4 vezes o seu diâmetro, designados por *Aeroestyllos*, e dever-se-ia usar madeira nas arquitraves (*trabes*), enquanto para distâncias menores, usava-se a pedra ou mármore para esse efeito (Gwilt. J, 1860).

No que respeita às coberturas, *Vitrúvio* refere quais os cuidados a ter na sua execução, nomeadamente na necessidade de prover uma estrutura mais complexa no caso de coberturas com vãos grandes. Assim para vãos significativos, a estrutura asna simples era composta por linha (*trabstrum*), pernas (*cantherii*), pendural (*columna*) e diagonais (*capreoli*), bem como fileira (*columen*) e madres (*templa*), como estrutura de apoio às varas (*asseres*), onde se colocavam as telhas. É admirável, a qualidade e monumentalidade das construções de madeira Romanas, incluindo a construção de navios, maquinaria e armas de guerra. Os Romanos construíram fortalezas de toros de madeira com torres nas fronteiras das províncias, celeiros enormes, pontes sobre o Reno e o Danúbio, e numerosos edifícios públicos de grande vão e com pátios abertos.

No tratado de *Vitrúvio* denota-se que na altura já se dispunha de alguma informação acerca da maior ou menor resistência a ataques biológicos de determinadas espécies de madeira e do seu comportamento estrutural, destacando a necessidade de secagem das madeiras e o acréscimo de resistência e rigidez obtido por esse processo. Este mostra ainda saber que as madeiras resinosas retardam a sua deteiorização biológica, como sucede por exemplo no Templo de Diana, e, *Epheseus*, destacando também as propriedades de conservação do óleo de Cedro que previne o aparecimento de “vermes e bolor” (Gwilt J., 1860).

A Ponte sobre o Rio Danúbio, na atual Roménia, do engenheiro-arquiteto de Trajano, Apollodorus de Damasco, foi um empreendimento extraordinário do imperador. Esta foi construída com 20 pilares de alvenaria afastados entre si, 70 pés romanos, de 150 pés de altura e 60 pés de largura. De um pilar a outro pilar foram armados segmentos de arco que nascem de um suporte triangular. Esta sequência de arcos forma o suporte para as vigas do tabuleiro ou “deck”. O tabuleiro é flanqueado por perfis de madeira e os membros de madeira radiais representam braçadeiras para amarrar as madeiras sambladas do arco. O sistema atua, essencialmente à compressão. Infelizmente, esta magnífica estrutura foi demolida pelo Imperador Adriano, (Figura 12) (Salavessa, 2011).

A combinação de triângulos numa treliça de madeira, não pode ser alterada sem modificar o comprimento dos seus lados, não pode ser distorcida, por conseguinte, uma treliça não depende na estabilidade de ligações rígidas. Os esforços sobre os membros são menores do que numa viga porque os maiores esforços em membros de uma treliça são a tração direta ou a compressão mais do que a flexão.

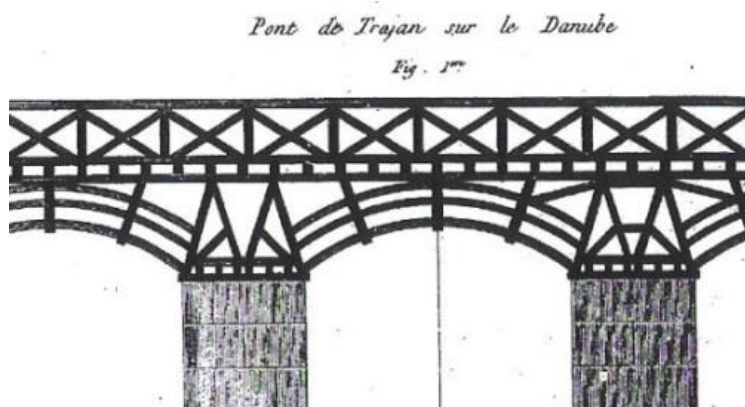


Figura 12 - Ponte de Trajano sobre o Rio Danúbio, segundo Rondelet, 1805, Tomo 3, PL CXXXIX (fonte: Salavessa, Eunice, 2011)

Os antigos construtores empregaram o princípio da treliça, ligando os extremos dos barrotes, criando, assim, um sistema triangular, que utiliza membros de madeira de menor comprimento e especialmente de menor secção, para vencer grandes vãos.

Deste modo o extremo do barrote não abre e a força horizontal de derrubamento é estrangida. Este desenvolvimento tecnológico permitiu criar vãos maiores sobre paredes menos maciças, e abrir vãos no topo da parede sem perturbação da estabilidade do conjunto, possibilitando a penetração da luz no interior do edifício num nível superior (clerestório), como nas basílicas Romanas de S. Pedro o Velho e de S. Pedro Fora de Muros para vãos de naves centrais de cerca de 13 a 30 metros. A estrutura de asnas triangular colocadas a intervalos iguais constituiu uma solução tecnológica ideal sendo na Basílica de S. Pedro Fora-de-Muros, para os vãos longos, asnas duplas (ou gémeas) incorporando pendurais amarrados por linhas duplas de abeto, e essas asnas duplas suportaram a superestrutura do telhado através de madres (Salavessa, 2011).

Na Basílica de S. Pedro Fora-de-Muros, em Roma, a estrutura da cobertura tem um vão de 24, 30m, (antes da sua destruição num incêndio que ocorreu em 1823), e nela se distinguem três sistemas diferentes de asnas de datas diferentes. Para a primeira asna, reparada em 816 d.C., construída em pinho, foi idealizada um sistema de estrutura dupla usando pares de vigas-linha e um pendural central (intermédio) como braçadeira, fixo no extremo superior por um parafuso de ferro através da ligação das pernas (Salavessa, 2011). Para impedir que a viga-linha faça flecha o intradorso é apertado por uma cavilha de madeira atravessada. As asnas compostas suportam uma série de madres e o pau de fileira. As asnas estão espaçadas em intervalos de cerca de 3,5m, e as pernas duplas separadas apenas de 20 cm. A asna dupla de S. Paulo tem ligações bem desenvolvidas que trabalham à tração necessárias para a função do pendural central que suporta o ponto médio das longas vigas-linha, (Figura 13) (Salavessa, 2011).

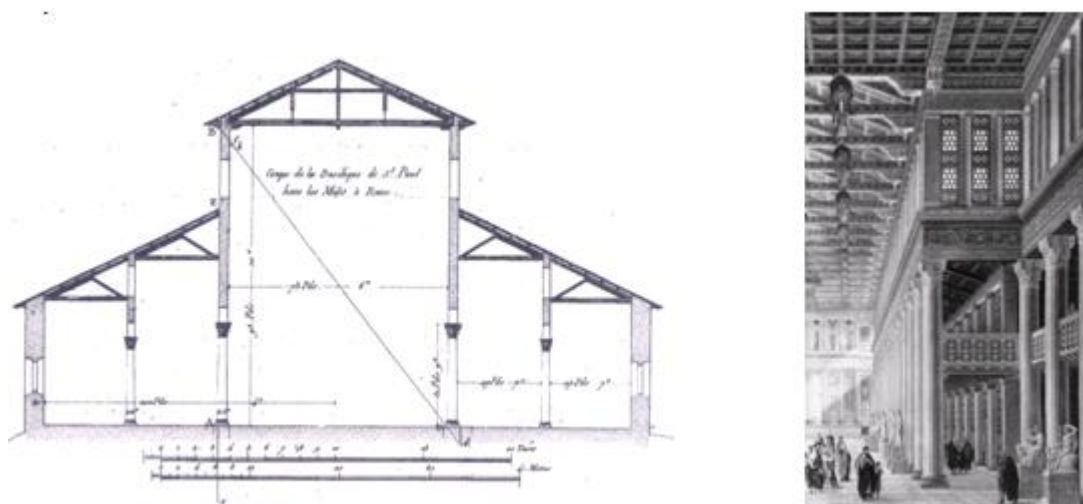


Figura 13 - Esq: J. RONDELET, J. Corte da basílica de St |Paulo|Fora-de- Muros, mostrando a carpintaria, antes de ser destruída pelo incêndio de 1805 ; Dir: HITTORFF, J.I. Aguarela de interior de uma basílica antiga restituída, Museu d'Orsay, 1831 (fonte: Salavessa, Eunice, 2011)

A basílica Romana consiste essencialmente num espaçoso hall, com uma estrutura baseada numa nave central mais alta e alas laterais de menor pé direito.

Vitrúvio, afirma que, o vão interno da nave central é 3 a 4 vezes superior ao das naves laterais. As paredes resistentes da nave central incorporam as janelas do clerestório ou é iluminada através de janelas em galerias no segundo andar sobre as naves laterais (Salavessa, 2011).

No que diz respeito aos pavimentos de madeira, *Vitrúvio*, refere que não se deve construir paredes em contacto com a face inferior do pavimento, devido às deformações que o pavimento possa vir a sofrer, recomendando a criação de um espaço suficiente que permita a deformação do mesmo. Nos pavimentos romanos, é muito usual utilizar azinho e carvalho. No caso do pavimento de carvalho, segundo o mesmo autor, este deve permitir a fixação de pregos e por isso deve ser cortado fino. A madeira, apesar de ter sido aplicada anteriormente, não foi o material de eleição da civilização Greco-Romana, que encontrou na alvenaria e no cimento romano as ferramentas necessárias para aplicar os conhecimentos relativos ao arco, permitindo assim vencer vãos que não se conseguem com estruturas de madeira (Gwilt J., 1860).

3.3.4 Países Orientais

As culturas Asiáticas, da Índia actual, China e Japão desenvolveram um método construtivo muito diferente do que se usava na Europa, devido à vulnerabilidade sísmica dessa região e disponibilidade de diferentes materiais de construção. A Índia pré-histórica apresentava uma cultura megalítica muito parecida com a Europeia, com estradas empedradas e dólmens.

Na China, com uma sociedade alfabetizada, onde se vivia fundamentalmente da Agricultura e de trocas comerciais, a capital do império encontrava-se no centro geográfico do país e rigorosamente alinhada com os pontos cardeais. As linhas retas e a orientação dos edifícios eram os pontos fundamentais da arquitetura chinesa, dando-lhe destaque às formas horizontais e aos edifícios de altura determinada em função da posição social dos seus habitantes, formando bairros para cada classe social. As casas tinham em comum o pátio, independentemente da sua grandiosidade, (Figura 14) (Kostof, 1996).

Nesta arquitectura, as estruturas não eram permanentes, pois esta função estava reservada para os rituais. Os materiais mais utilizados eram a taipa, o tijolo de barro e a madeira. Os edifícios tinham uma vida útil de uma geração, degradavam-se facilmente e alguns materiais eram novamente reutilizados em estruturas.

As edificações eram de planta rectangular, dividida por alinhamentos de pilares de madeira ou pedra que suportavam a cobertura. No que diz respeito a tipologias de coberturas, existiam várias tipologias desde as mais simples às mais complexas.

A cobertura assentava sobre pilares através de um sistema de “dougong”, que consistia numa série de mísulas de madeira sobrepostas. Com o evoluir dos tempos e além da sua função estética, este sistema desempenhava funções anti-sísmicas.

Os elementos religiosos chineses mais conhecidos são os Pagodes, templos budistas compostos por uma torre com múltiplos telhados sobrepostos e com um pináculo central, com estrutura primeiramente em madeira e nos Pagodes mais recentes alvenaria nos elementos verticais.

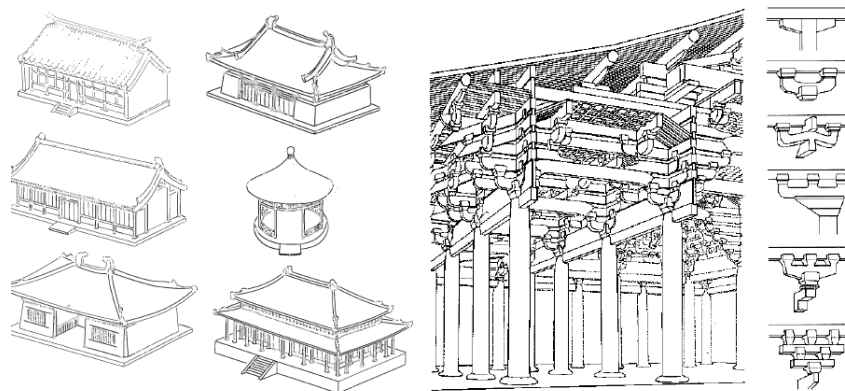


Figura 14 - Coberturas de edifícios chineses: (a) evolução ao longo das dinastias; (b) representação da sala principal de Fokuang Shu (857 d.C); (c) Evolução da complexidade desde o sistema primitivo até ao mais elaborado (fonte: Kostof, 1996)

3.3.5 Idade Média

A idade Média surgiu na Europa num período aproximadamente mil anos após a queda do Império Romano e que ficou marcado pela dispersão e perda de muitos avanços tecnológicos, dado o atraso das

populações rurais. A igreja Católica, como instituição que se manteve para além do Império, chamou a si a responsabilidade de preservar algum do conhecimento adquirido até à data, através da vida monástica. Durante este período, o arquitecto/construtor era considerado um artesão ou mestre-de-obras, evoluindo de forma autónoma e em regra sem acesso à formação académica (Wright, 1862).

A Europa Central e a Península Ibérica foram dominadas pelos povos bárbaros, após a queda do império romano, e, as habitações usavam predominantemente a madeira proveniente dos países frios do Norte da Europa. Embora existam escassos registos arqueológicos da sua existência, a obra pioneira da literatura anglo-saxónica *Beowulf*, relata em várias passagens pormenores das habitações deste povo, onde na sua maioria são compostas por estruturas de madeira, com estacas cravadas no solo, pisos internos em madeira e o uso da palha na cobertura.

Por sua vez a arquitectura religiosa é fortemente marcada pelas catedrais Góticas, que evoluíram a partir das Românicas embora as suas coberturas tenham inclinações maiores comparativamente com as Românicas, e as paredes apresentem menor espessura, devido a inovações introduzidas nas estruturas das abóbadas, que passam a ser construídas com nervura de pedra e enchimento de tijolo, o que as tornou mais leves. O arco preferencial deixa de ser arco pleno (de volta inteira) e passa a ser arco quebrado. Os contrafortes, devido aos menores impulsos horizontais, separam-se da estrutura principal por arcos botantes, (Figura 15) (Salavessa, 2011).



Figura 15 - Elementos de um edifício de arquitectura Gótica: Esq: Westmister Hall, London, 1397; Centro: Abóbadas de arestas, nervuradas, colunas, arco quebrado e contrafortes; Dir: Notre Dame de Paris (fonte: Salavessa, Eunice, 2011)

As estruturas de madeira tiveram a sua idade de ouro na Idade Média, em que desempenharam um papel fundamental para este processo construtivo e evolução da arquitetura religiosa e habitacional, havendo uma cooperação fundamental entre o carpinteiro e o pedreiro.

O pano de madeira medieval é constituído por frechais superiores e inferiores, prumos, escoras de reforço, para além de prumos intermédios de enchimento dos frontais, sendo utilizado como paredes divisórias, quando usadas no interior. Os vazios da estrutura de madeira podiam ser preenchidos com caniçada revestida com barro ou com pedra e argamassa revestida a reboco, onde eram executados

estuques decorativos. As peças de madeira podiam ser pintadas com cores contrastantes, como o amarelo e o negro, o branco e o castanho ou o encarnado e o preto (Salavessa, 2011).

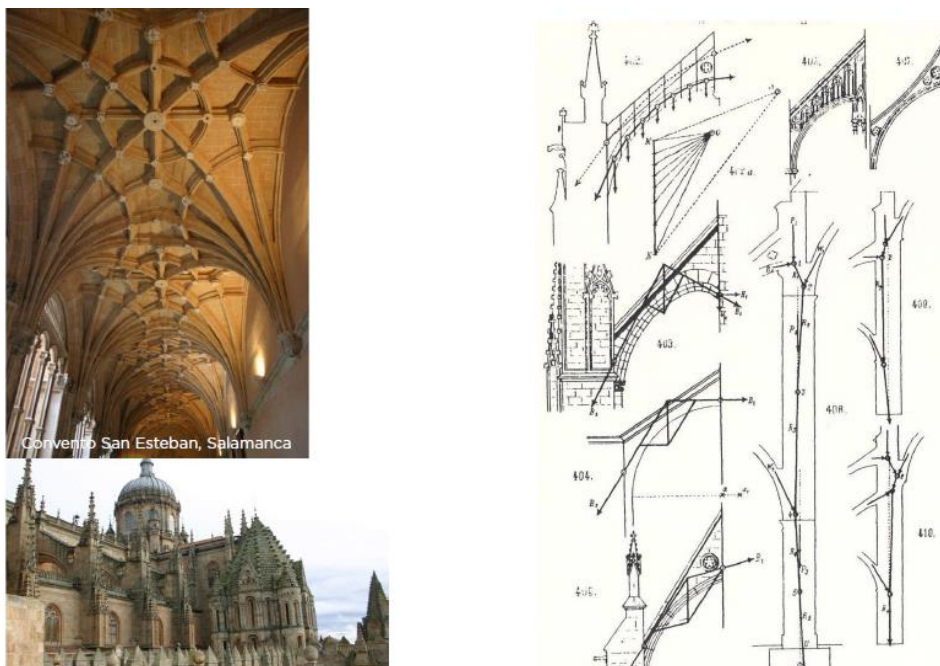


Figura 16 - Coberturas de madeira em edifícios de arquitectura Gótica: Convento San Esteban, Salamanca (fonte: A. Costa, 2013)

Fitchen, afirma que nas catedrais góticas, a elevada inclinação das coberturas conduziu à separação do tecto, construído em abóbada ou cúpula, da cobertura, realizado, com estrutura de madeira e destinado, a resistir às intempéries. Tal separação era vantajosa para o processo construtivo, pois a colocação da cobertura primeiramente, permitia avançar com trabalhos internos mais minuciosos, que seriam impraticáveis a céu aberto. A cobertura era realizada com uma estrutura de madeira, normalmente de carvalho, sobre o qual eram colocadas chapas de chumbo ou placas de ardósia (Fitchen, 1986).

A cobertura de madeira também servia para travar as paredes na fase construtiva, permitindo assim um funcionamento de conjunto entre todas as paredes para ações horizontais, como o vento e os sismos. Durante a construção eram utilizados elementos de madeira para fins como andaimes e cimbres de abóbadas, arcos, e nervuras que eram removidos após a conclusão da construção do edifício (Figura 16).

No Reino Unido, onde a madeira era abundante, existem registos da utilização de estruturas de madeira de forma contínua, nomeadamente no fabrico de edifícios religiosos e de habitação de vários pisos. A técnica usada era designada por *half-timbered* e consistia em construir uma estrutura de madeira que posteriormente era preenchida por elementos de alvenaria de fraca qualidade. Na Idade Média, os edifícios de alvenaria de pedra estavam destinados apenas a edifícios de grande importância, sendo a madeira, adobe e taipa para finalidades mais humildes.

Quanto aos edifícios religiosos Britânicos do primeiro quarto do Século XVI, Ross, refere que a maioria das coberturas em madeira a vista, eram sem abóbada (Ross, 2002).

As asnas de cobertura eram realizadas com várias tipologias, mas tinham como principais características o uso de linhas altas ou “níveis” (*colar beams*), vigas de eixo curvo (*arch brace*), a inexistência de fileira, bem como um sistema designado de pontalete (*hammer beam*) que tinha o objectivo de diminuir os impulsos horizontais transmitidos pelas tipologias de asnas (Ross, 2002) (Figura 17)..

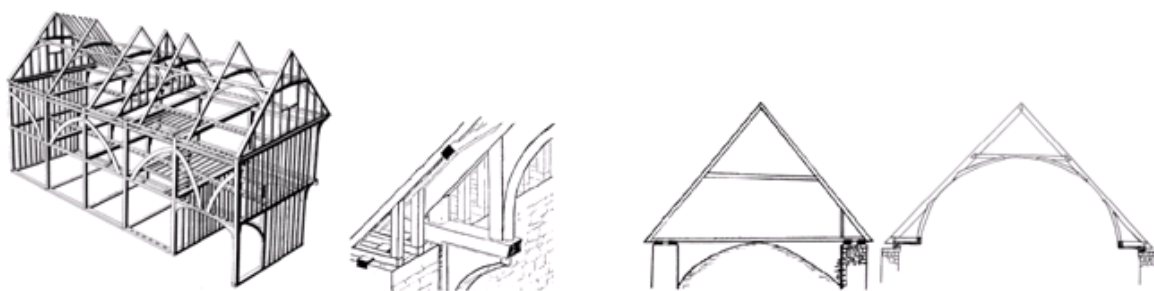


Figura 17 - Estruturas Medievais: Esq: Estrutura – tipo edifício construído em sistema *half-timbered*; Centro: Sistema *hammer beam*; Dir: Asna com dupla linha e Asnas de nível e de aduelas de eixo curvilíneo (ou vigas); (fonte: Yeomans, 1999)

Mais tarde, devido à necessidade de estabelecer locais onde fosse possível proceder a trocas comerciais, as cidades medievais começaram a desenvolver-se séculos mais tarde, não sendo de estranhar que as primeiras cidades medievais surgissem sobre as principais rotas comerciais. Esta concentração de riqueza nesses pontos criou a necessidade da construção de fortalezas e muralhas, para protecção (Jestaz, 1996).

No século X cessaram as invasões bárbaras na Europa e começou-se a recuperar algum conhecimento da Antiguidade através da criação de novas escolas e universidades o que permitiu avanços sucessivos na Astronomia, Matemática e Medicina, levando a Europa para a Idade Moderna.

3.3.6 Do Renascimento ao século XVIII

O Renascimento, teve início em Itália, no século XIV, sendo descrito pela revalorização dos cânones arquitectónicos e valores sociais da Antiguidade. A obra de Vitruvius volta a ser reeditada, servindo de inspiração para uma geração de arquitectos eruditos (Jestaz, 1996). Neste período e ao contrário da Idade Média, em que toda a informação era transmitida de modo verbal, começaram-se a elaborar desenhos à escala com pormenorização do edifício, o que ajudava no processo de construção, mas também a todos os interessados (Jestaz, 1996).

A partir dos tratados de construção do século XVI, verifica-se que as estruturas de madeira em coberturas de grande vão eram um problema recorrente. *Alberti*, em 1450 escreve que “se as árvores são demasiado pequenas para realizar uma viga completa a partir de um só tronco, juntem-se vários numa viga compósita...com as suas faces sambladas umas nas outras (à meia madeira, ligação de chanfro, à meia madeira de malhete duplo, vigas endentadas com chavetas, etc.” (Salavessa, 2013/2014).

Desta altura destaca-se também *Andrea Palladio*, sendo dos arquitectos mais famosos deste período, e a sua obra a *Villa La Rotonda*, que representa o estereótipo das construções da época, (Figura 18).

Andrea Palladio, 1570 refere que o bom desempenho da Ponte sobre o Rio Cismone (Figura 29), está no facto das diversas partes se apoiarem mutuamente usando gatos de ferro aparafusados para juntar os elementos verticais com a corda inferior.

A estrutura, para além de bela é cómoda, pois o seu piso está ao nível do caminho de terra firme, os extremos da ponte estão apoiados e sustentados por bons pegões, ou alicerçados em alvenaria. Assim, toda a obra fica de tal modo unida e bem ligada, que as vigas que fazem a largura da ponte, e aquelas do guarda-corpos, são como uma só peça com os pendurais, os quais vêm por este meio sustentar as traves da largura da ponte, sendo também reciprocamente suportadas pelos contraventamentos que vão dum pendural a outro (Salavessa, 2013/2014).

Deste modo, quanto maior for a carga a que a ponte está sujeita, mais a samblagem da obra se aperta, e se torna mais fechada, com os prumos verticais e cordas inferiores em tracção, enquanto todas as diagonais e cordas superiores estão à compressão.

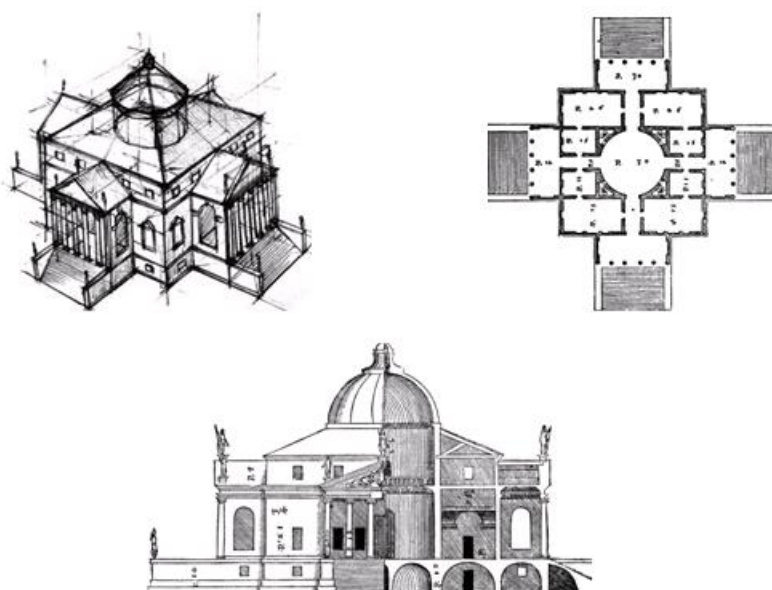


Figura 18 - Edifício Villa La Rotonda, de Palladio (fonte: www.vitruvius.com.br)

As cordas inferiores da estrutura triangular da ponte, que no desenho de Palladio parecem contínuas, peças simples de madeira que vencem todo o comprimento da ponte, deve ter sido utilizado em vários locais nas cordas inferiores, algum tipo de samblagem que trabalha à tracção, possivelmente reforçado com correias de ferro (Salavessa, 2013/2014).

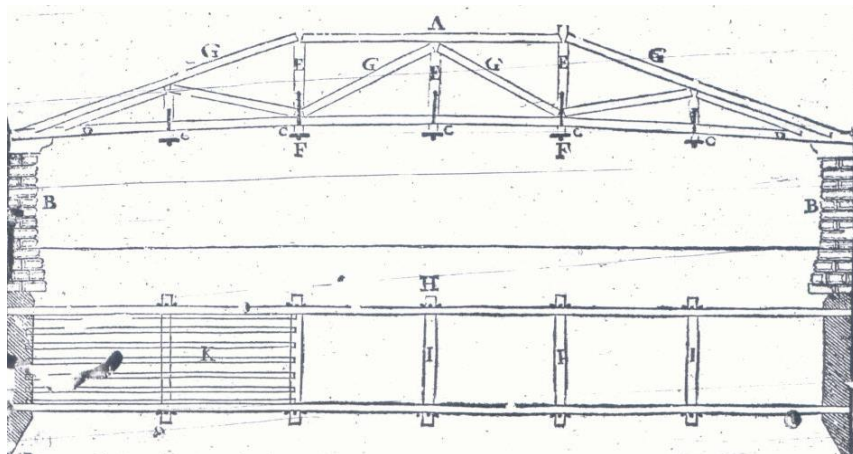


Figura 19 – Ponte sobre o Rio Cismone, Invenção de Andrea Palladio (fonte:Salavessa, 2013/2014)

No século XVII, uma das coberturas de maior vão foi projectada por Christopher Wren, o teatro Sheldonian em Oxford (Figura 20). Este baseou-se no Teatro Romano de Marcellus (tal como vinha representado nos tratados de Serlio e Vitruvius). Enquanto a arena do teatro semi-circular Romana estava coberta apenas por lonas, *Christopher Wren* teve que construir uma cobertura permanente por causa do clima Inglês e também para permitir que o edifício fosse utilizado pela Imprensa da Universidade de Oxford, cujos livros tiveram que ser armazenados no sótão sobre o auditório (Salavessa, 2013/2014).

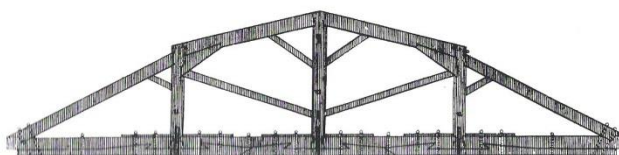


Figura 20 - Teatro Sheldonian em Oxford e asna de cobertura de Wren, 1662-1666 (fonte: L. T. Courtenay, 1995)

O trabalho de Christopher Wren é extraordinário em dois aspectos: foi o primeiro a afastar-se da tradição Gótica em Oxford, e incorpora um tecto invulgarmente amplo sobre o auditório sem colunas de suporte. Em vez de utilizar uma estrutura triangular mais eficiente, este escolheu um tipo de arco com linha em que os elementos dos níveis actuam mais ou menos em compressão, enquanto a linha inferior actua

principalmente à tracção, aliviando as paredes dos esforços horizontais que as empurra para o exterior (Salavessa, 2013/2014).

Francis Price, 1733, foi provavelmente o primeiro a dedicar atenção especial às coberturas, apresentando várias tipologias de desenhos de asnas. Porém, o comportamento estrutural destas, ainda não era conhecido, pois utilizavam-se tabelas com dimensões, determinadas por construtores mais experientes de forma empírica, em que se aumentava a secção em função do vão.

A obra “*The British dictionary*”, de 1734, afirma que a resistência à flexão é proporcional à base e ao quadrado da altura da peça. Esta ilação, não influenciou a forma como as asnas eram realizadas, uma vez que a deformação influenciava mais a escolha das secções do que a sua resistência (Yeomans, 1999).

Com a conclusão de trabalhos importantes de base teórica, como os de Coulomb, Euler, Bernoulli e Hooke, nas últimas décadas do século XVIII, onde se fez algum desenvolvimento experimental em peças de madeira, e desde aí foi possível descrever com alguma precisão o comportamento mecânico das estruturas de madeira.

Peter Nicholson, é o primeiro a realizar uma abordagem científica ao dimensionamento aos elementos estruturais apresentando minuciosamente os esforços que se geram nas várias peças que constituem a asna simples, bem como a forma de determinar a capacidade resistente, tendo como base estudos experimentais (Yeomans, 1999).

Nas colónias britânicas e continente americano e australiano, a madeira era o material estrutural de eleição, devido à sua disponibilidade e conhecimento dos construtores e responsáveis da construção, provenientes do território inglês.

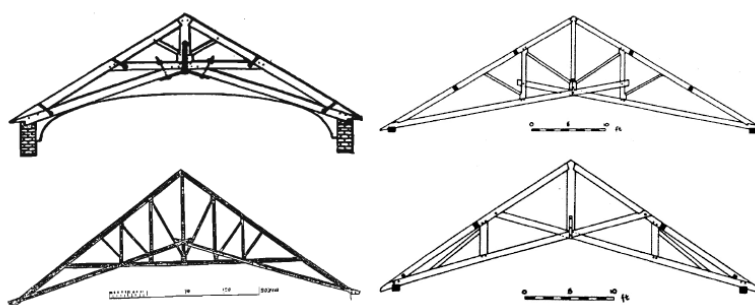


Figura 21 - Soluções diferentes de asnas de tesoura adoptadas no Reino Unido e na América Colonial; Esq: soluções inglesas; Dir: soluções americanas (fonte: Yeomans, 1999)

Com a evolução dos tempos, assiste-se a uma adaptação das tipologias estruturais a situações particulares de cada território. No território americano, a adopção das asnas em tesoura resulta menor resistência aos impulsos horizontais das paredes americanas, construídas com estruturas de madeira mais

leves e flexíveis, que exigiam soluções de asnas com maior poder de travamento em que os impulsos eram minimizados.

No Reino Unido, em que a espessura das paredes era maior, devido ao facto de serem construídas em alvenaria, suportavam as asnas mais complexas que transmitissem maiores impulsos horizontais, (Figura 21) (Yeomans, 1999).

Com a evolução e a necessidade de conceber estruturas de maior vão para fins industriais, e com as limitações das estruturas de madeira, surge a preocupação em usar novos materiais com outras propriedades mecânicas, disponíveis a custos economicamente aceitáveis após a revolução industrial.

3.3.7 Revolução Industrial

No final do século XVIII, a Revolução Industrial foi um período onde se passou de uma economia baseada na produção artesanal e manual para uma produção mecanizada e sistemática, o que fez aumentar drasticamente a produtividade com a diminuição dos custos de bens e serviços. O comércio sofreu também uma expansão devido ao melhoramento de estradas e construção de vias férreas e canais de navegação. O ferro começou então a ser um material acessível economicamente, o que possibilitou o seu uso estrutural, inicialmente como meio complementar aos materiais existentes, e mais tarde como material estrutural.

No que diz respeito a estruturas de madeira, uma alteração importante verificada neste período, é a modificação do sistema de ligação, passando-se de sistemas de ensablagens (entalhes) para ligações com elementos metálicos, o que permitiu resolver uma das principais limitações das estruturas de madeira: as ligações entre peças. As ensablagens obrigavam a um trabalho de carpintaria minucioso e demorado, enquanto os parafusos, pregos e chapas permitiam uma rápida execução de ligações. O problema crónico da retração da madeira, provocado pelo uso de madeira verde em estruturas, podia também ser minimizado com o uso de peças metálicas, de maior resistência e que podiam ser ajustadas para compensar este efeito (Yeomans, 1999).

Com a produção massiva de ferro e diminuição substancial do seu custo, as estruturas metálicas começaram a substituir as de madeira, que devido às suas melhores propriedades mecânicas permitiam vencer maiores vãos com secções mais esbeltas, tornando assim o processo de fabrico mais económico. A tentativa de resposta das estruturas de madeira veio com o surgimento das peças laminadas, que consistiam em secções de madeira compostas por várias peças individuais unidas entre si por elementos metálicos, de modo a criar uma estrutura contínua, ultrapassando assim os condicionalismos de secção e comprimento das peças individuais. Wiebeking foi provavelmente o primeiro a utilizar estruturas laminadas, através da criação de um arco de madeira de peças aparafusadas, que eram utilizadas para o fabrico de pontes em arco na Baviera, Alemanha, entre 1807 e 1809.

O processo de fabrico consistia em criar uma estrutura provisória de andaimes e cofragens em terra firme, onde a estrutura era montada e obrigada a fletir com a ajuda de sistemas de alavanca. Cada arco era formado por várias lâminas de madeira com cerca de 0.35m de espessura que eram aparafusadas e coladas entre si, conseguindo assim arcos capazes de vencer distâncias entre os 30 m e os 50 m. Para aumentar a estabilidade lateral, eram colocadas peças de contraventamento.

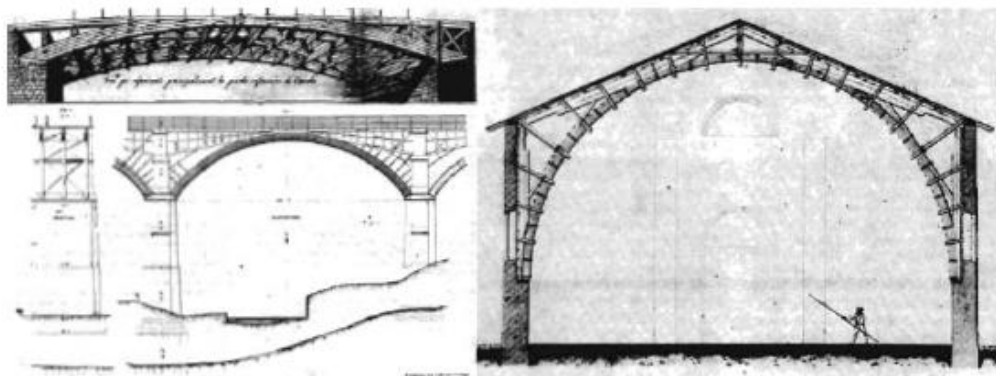


Figura 22 - As primeiras estruturas de laminados de madeira: pontes, desenvolvidas por Wiebeking (em cima, à esquerda); Coberturas de escolas de equitação, por Emy (direita), e viadutos ferroviários de Green (em baixo à Esquerda) (fonte: Yeomans, 1999)

Cerca de dez anos depois, em França após os trabalhos de Wiebeking, um engenheiro militar de nome Armand Rose Emy usou este método para fabricar coberturas de edifícios de grande vão de escolas de equitação, edifícios militares e industriais um pouco por toda a França (Yeomans, 1999).

John Green e o seu filho, Benjamin, foram os precursores desta técnica no Reino Unido na década de 30 do século XIX, através do seu uso em viadutos ferroviários e coberturas de estações de caminho-de-ferro (Figura 22).

O modelo proposto primeiramente por Wiebeking sofreu pequenos acertos pelos restantes autores contemporâneos, de modo a maximizar o desempenho: diminuição da espessura das lâminas e a difusão por outros tipos de estruturas. Esta técnica evoluiu para os atuais lamelados colados, onde a ligação entre as várias lâminas passou a ser realizada exclusivamente com colas sintéticas à base de formaldeído.

Neste período, as estruturas de madeira maciça ficaram remetidas ao uso em edifícios habitacionais de poucos pisos e vãos reduzidos, sendo gradualmente substituídas por novos materiais, como estruturas metálicas ou de betão armado, com o passar dos anos e consequente evolução destes materiais (Yeomans, 1999).

Segurado, refere que, nas construções muitas vezes efectuava-se uma gaiola ou esqueleto de madeira, constituindo a estrutura das paredes, que mais tarde era acompanhado com alvenaria. O esqueleto

ou gaiola limita as paredes das frentes, sendo construída na sua face interior servindo para a fixação dos alisares, tábuas de peitos, aros de caixilharia.

O mesmo autor, afirma também que as construções de madeira são menos duradouras comparativamente com as estruturas de pedra e alvenaria, pois apresentam menor estabilidade, são atacáveis pelos insectos e não preservam os habitantes convenientemente das variações de temperatura exterior (Segurado, 1909).

3.3.8 As Estruturas de Madeira em Portugal

A madeira foi durante muitos anos, uma parte importante da economia portuguesa, nomeadamente na construção de mobiliário, edifícios, e embarcações. No final da idade Média, o carvalho servia para o fabrico de embarcações, enquanto o castanho era utilizado na construção de mobiliário e edifícios.

O pinho bravo introduzido no século XIII a partir do pinho marítimo francês, é uma das espécies com maiores aplicações estruturais ainda hoje. Com os descobrimentos, Portugal introduziu muitas espécies de madeiras brasileiras na Europa. No século XVIII, o ouro proveniente do Brasil foi usado na construção e decoração de edifícios religiosos, onde a talha dourada assumiu um papel relevante (Faria, 2002).

A madeira foi utilizada na construção de abrigos temporários desde tempos remotos em Portugal, onde eram utilizados pequenos troncos ou tábuas que posteriormente eram cobertos com palha ou ramos (Oliveira, 1994). Contudo, pretende-se dar especial ênfase às estruturas de carácter mais permanente, cuja estrutura era mais trabalhada e cuidada.



Figura 23– Gaiola Tridimensional (fonte: <http://www-ext.lnec.pt/>)

Os manuais de construção Portugueses do final do século XIX e primeira metade do século XX que chegaram aos dias de hoje são escassos, e para o presente trabalho, teve-se acesso aos, Trabalhos de

Carpintaria Civil de João Segurado no início do séc. XX, contendo descrições e ilustrações pormenorizadas das metodologias construtivas dos diversos elementos constituintes dos edifícios pombalinos, incluindo os frontais e tabiques e também Enciclopédia Prática da Construção Civil contendo por sua vez, um conjunto de cadernos editados por, Costa, 1995, com descrições e ilustrações de coberturas e pavimentos de madeira (Costa, 1955).

O sistema utilizado para formar o esqueleto das paredes exteriores, correntemente empregado nas construções da Baixa Pombalina em Lisboa, era o chamado sistema de gaiola, (Figura 23) e (Figura 24).

Neste tipo de sistema as paredes assentam longitudinalmente em vigas de madeira (AA), sendo estas designadas por frechais, que servem de base a todo o esqueleto da parede, sendo estes dispostos recuados do paramento interior das paredes, aproximadamente 5cm para permitir que os prumos (BB) possam ser ligados aos frechais.

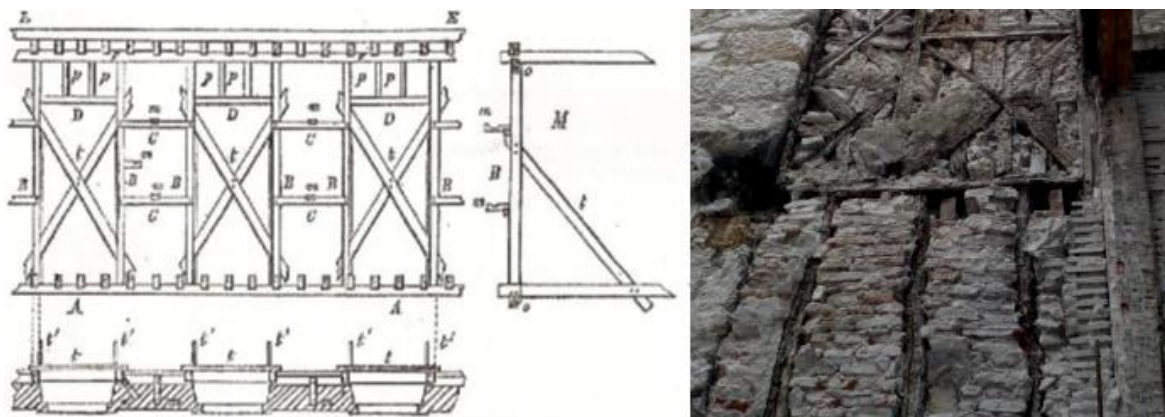


Figura 24 - Esqueleto ou gaiola das paredes exteriores de um edifício (Fonte: Segurado, 1909 e Ilharco, 2013).

Os prumos servem para definir os vãos das portas e janelas, podendo estes abranger a altura de um ou dois andares. Para travar entre si os prumos, são utilizados travessanhos (CC), que são umas curtas peças de madeira horizontais que são dispostos de prumo a prumo (Segurado, 1909).

Os travessanhos são entalhados na madeira pelas extremidades e fixados com pregos nos cantos ou faces mais estreitas do lado dos paramentos exteriores.

Os vãos são limitados na parte superior por vergas (DD), que travam simultaneamente os prumos correspondentes às ombreiras. As vergas são ligadas ao frechal superior (FF), através de umas peças curtas de madeira verticais, designadas por pendurais (pp).

Os prumos são mantido verticalmente, através de travadouros (tt), que evitam qualquer deformação, sendo estas duas tábuas pregadas uma à outra e aos prumos limites do vão e dispostos em Cruz de S. André, estes são pregados pela face do paramento.

Para efectuar a ligação dos diferentes elementos da gaiola à alvenaria, são adaptados em diversos pontos umas peças de madeira (mm), com um dente solidamente emalhetadas, de maneira a tornar solidário o seu conjunto (Segurado, 1909).

Os frontais eram estruturas onde as peças de madeira eram amarradas, convenientemente dispostas e ligadas entre si, formando as divisões principais das habitações, e cujos intervalos se preenchiam com pedras miúdas ou tijolo.

Estes são constituídos por prumos verticais ligados aos frechais superior e inferior, sendo todos os prumos ligados entre si através de travessanhos horizontais e por escoras, formando assim a Cruz de S. André.

As vergas das portas são ligadas ao frechal superior por meio de pendurais, que são umas peças curtas de madeira colocadas verticalmente. A junção das diferentes peças de madeira é reforçada com pregos. Os prumos (nn) assentam nas vigas do sobrado, e os prumos que limitam os vãos do lado central assentam em chincharéis colocados entre as vigas, (Figura 25).

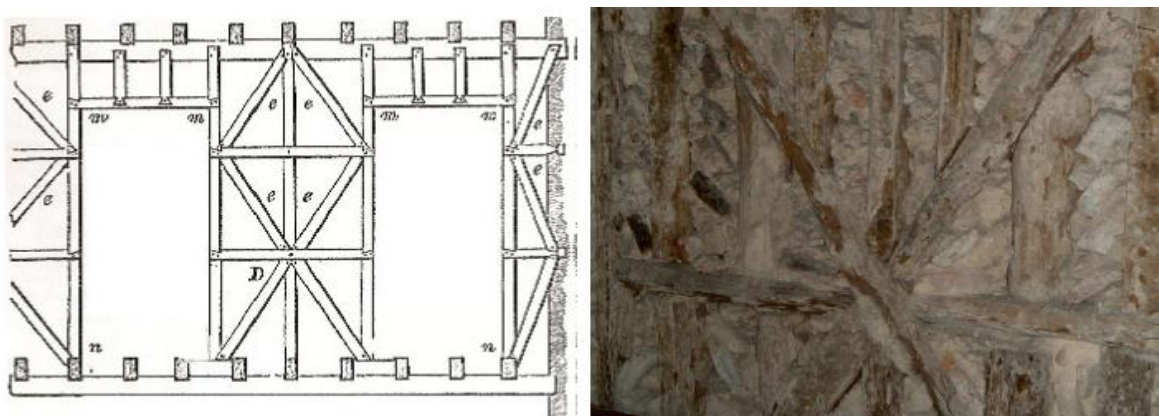


Figura 25 - Parede divisória em Frontal de madeira (Fonte: Segurado, 1909 e Ilharco, 2013)

Os tabiques são paredes de madeira, também utilizadas como paredes divisórias, destinadas a separar os diversos aposentes de um edifício, sendo estas constituídas por fasquiado, e apresentam uma espessura que não excede em geral os 0.10m.

O tipo mais simples de tabique é construído após a casa ser assoalhada, onde era pregada no chão uma ripa no lugar em que se pretendia fazer a divisão, e no vigamento de tecto pregava-se outra na mesma prumada. Era pregado seguidamente às duas ripas, uma fila ao alto de tábuas, deixando entre si intervalos de aproximadamente 1cm onde , era pregado, seguidamente em ambas as faces das tábuas o fasquiado, horizontalmente e espaçado de poucos centímetros, sendo estas depois estucadas e rebocadas.

Para evitar o inconveniente descarregamento da maior parte do peso do tabique sobre as paredes laterais, era construído um tabique aliviado. No exemplo representado (Figura 26), a parede é contida por uma abertura no vão duma porta, sendo esta definida por dois prumos (aa), designados por golas ligadas à viga superior e inferior. Ligadas às golas e à viga inferior encontram-se, duas tábuas inclinadas (bb), as aspas, funcionando como escoras, descarregando o peso do tabique na parede (P) e no frontal (F). À viga superior (B) é pregado inferiormente uma ripa longitudinal para que possam ser pregadas ripas (dd). A verga (v) que limita superiormente o vão da porta, tem um rebaixo na face superior onde se pregam as ripas que enchem o vão. Seguidamente, sobre a face principal do tabique, prega-se horizontalmente o fasquiado, sendo necessário na face oposta calçá-lo para ficar à face das aspas e golas. Os vazios são preenchidos com reboco, em ambas as faces do tabique. Quanto ao espaço (ee), representado na figura, deixado entre as calhas (cc) e a viga (A), este é destinado à passagem das tábuas do soalho.



Figura 26 - Parede divisória em Tabique (Fonte: Segurado, 1909)

No século XX, as tipologias de asnas mais usuais em Portugal eram as asnas simples e as asnas compostas (Figura 27).

As asnas compostas são constituídas por quatro ou mais escoras travadas por tirantes de ferro, que ligam o encontro das escoras com as pernas à linha, na vertical. Além destes elementos, estas asnas apresentam também a linha, as duas pernas e o pendural. As madres destes dois tipos de asnas eram colocadas sobre as pernas, nos pontos de encontro destas com as escoras. Estas asnas compostas servem para vencer até aos 12 m.

Nas ligações, eram usadas ensablagens e ferragens aparafusadas. O ângulo de abertura das pernas, medido ao eixo das peças, era de $\alpha = 26^\circ$, o que corresponde a uma inclinação de 1 : 2 (V:H). As ensablagens eram realizadas nas extremidades das pernas, das escoras e na extremidade inferior do pendural, bem como nos locais de encontro entre estas peças e as restantes, (Figura 28 Esq.) As ferragens

eram efetuadas com chapas de espessura a rondar os 6 mm e uma largura de 5 cm a 6 cm (Figura 28 Dir.) (Costa, 1955).

As asnas simples, também designadas de Paládio, adaptam-se a vãos até aos 8 m, e são constituídas por uma linha horizontal, duas pernas, um pendural e duas escoras.

Os parafusos de porca utilizada tinham diâmetros que variavam entre os Ø6 mm, Ø9 mm e Ø12 mm, consoante o tipo de asna, enquanto as extremidades das peças metálicas eram cravadas na peça de madeira. Os estribos para os tirantes de ferro (usados para fixação dos tirantes metálicos nas pernas das asnas compostas) e as abraçadeiras eram fixadas às pernas por intermédio de parafusos de rosca ou pregos, embora o uso de ferragens fosse dispensado em trabalhos de menor importância (Costa, 1955).

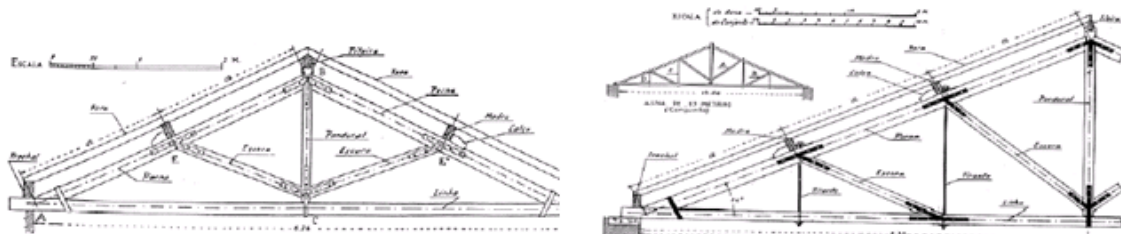


Figura 27 - Asnas de madeira mais comuns em Portugal: Esq: asna simples; Dir: asna composta (fonte: Costa, 1955)

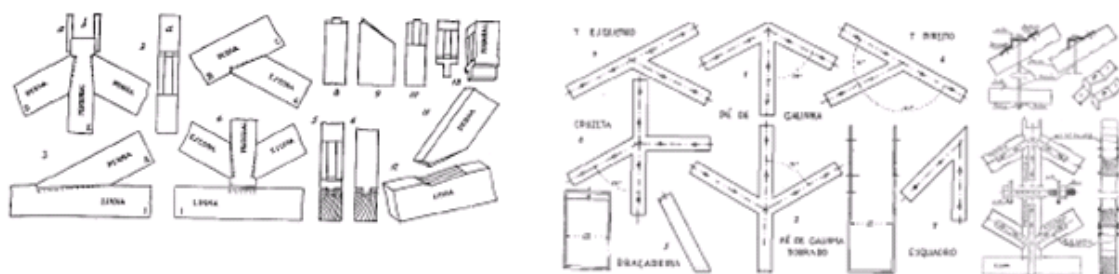


Figura 28 - Ligações das peças das asnas: Esq: ensamblagens; Dir: ferragens (fonte: Costa, 1955)

A espécie de madeira mais utilizada para as vigas era o pinho (bravo), embora também se utilizassem outras espécies como o carvalho, a casquinha, o castanho, o choupo, a nogueira e o pinho manso. Para os soalhos, preferia-se a madeira de pinho e casquinha. Refere-se ainda a necessidade de proceder ao tratamento das extremidades da peça encastradas nas paredes de alvenaria, através de pintura com produtos preservadores, como tinta de óleo. Os pavimentos térreos deveriam ser providos de caixa-de-ar inferior de pelo menos 40 cm para garantir a sua durabilidade (Costa, 1955).

Na segunda metade do século XX, com o advento do betão armado, as estruturas de madeira caíram em desuso nos edifícios habitacionais portugueses. Contudo, nos últimos anos, assiste-se a um

renascido interesse devido às teorias da construção sustentável, juntamente com o interesse do público em geral na conservação do património histórico (Faria, 2002).

4



INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA. METODOLOGIAS DE INTERVENÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

A condução de trabalhos de conservação e reabilitação de uma estrutura de valor patrimonial não poderá ser realizada, de forma eficaz e responsável, sem um conhecimento adequado acerca das características fundamentais do material utilizado na sua construção, de forma a avaliar correctamente o seu estado de conservação e o seu comportamento estrutural (Dias, et al., 2009).

A madeira sob a acção de determinados agentes deteriora-se, sendo a grande diferença em relação a outros materiais de construção não-naturais, o facto de ser um material natural que, por conseguinte sofre também de biodeterioração. A biodeterioração, entende-se, como a acção de organismos vivos na madeira, que levam à degradação parcial ou completa do material, com o intuito de obtenção de alimentos ou de protecção, entre outras razões.

Distingue-se dentro do universo dos agentes causadores de deterioração na madeira, dois tipos: os *agentes abióticos*, que são os elementos não vivos que provocam a deterioração da madeira, tal como a chuva, a radiação solar e o fogo; e os *agentes bióticos*, que correspondem aos organismos vivos causadores

da biodeterioração, como as bactérias, os bolores, os fungos de podridão e cromogéneos, os insectos xilófagos, e os xilófagos marinhos (Nunes, et al., 2000).

Assim, é essencial compreender as causas das patologias, no sentido de os poder evitar. Neste tipo de estruturas e se estas se apresentarem com patologias é necessário efectuar uma inspecção e, eventualmente, proceder à realização de ensaios específicos, para que se possa caracterizar o estado de conservação e estudar as intervenções possíveis.

No presente capítulo faz-se uma perspectiva geral acerca da madeira atendendo à sua origem e composição, procurando-se demonstrar o seu papel e desempenho como material estrutural, principais tipos de degradação e apresentar as fases obrigatórias de inspecção e diagnóstico, procurando encontrar formas simples e expeditas de apoiar a decisão de manutenção/reabilitação ou substituição.

Serão referidos ainda alguns dos ensaios não destrutivos e destrutivos existentes e que se resumem, na sua maioria, à avaliação da rigidez e da capacidade resistente dos elementos de madeira. Por fim algumas metodologias de intervenção estrutural, no que respeita a técnicas de reforço.

4.2 CONSTITUIÇÃO DA MADEIRA

4.2.1 Introdução

A madeira é um material orgânico e natural de estrutura celular. Não é um material homogéneo, sendo constituída por um conjunto de células, genericamente reconhecidas como “fibras”, cuja diversidade morfológica e funcionalidade requerem denominações específicas, e que desempenham três funções vitais: condução da seiva, armazenamento de substâncias nutritivas e suporte (Carvalho, 1996).

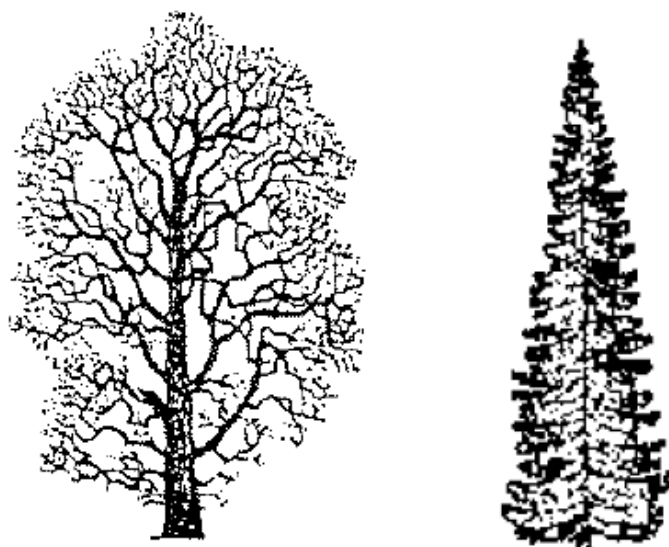


Figura 29 - Principais categorias de árvores: Esq: Folhasas, Dir: Resinosas (fonte: Adaptado de Paloma, 2007)

De facto, não há duas árvores iguais, dada a pluralidade de factores que influenciam o seu desenvolvimento e sendo a madeira obtida a partir da transformação de um organismo vivo complexo, será essencial, para a sua correcta utilização como material estrutural, que exista conhecimento da sua composição, para se estar consciencializado das suas principais propriedades físicas e mecânicas e, consequentemente, das suas limitações (Negrão, et al., 2009).

Assim, botanicamente, as árvores madeireiras pertencem a duas grandes categorias (Figura 29): *Angiospérmicas* e *Gimnospérmicas*, geralmente denominadas por *Folhosas* e *Resinosas*, das quais são exemplos na floresta nacional os Carvalhos e os Pinheiros, respectivamente.

Uma árvore cresce pela produção de novas células, na zona do câmbio, zona responsável pelo transporte de alimentos, e, conforme vai crescendo, as células mais velhas vão ficando no interior do tronco. Ao cortarmos um tronco de uma árvore podemos observar a organização do material lenhoso que a compõe (Figura 30). Da análise da secção assim obtida, é possível identificar:

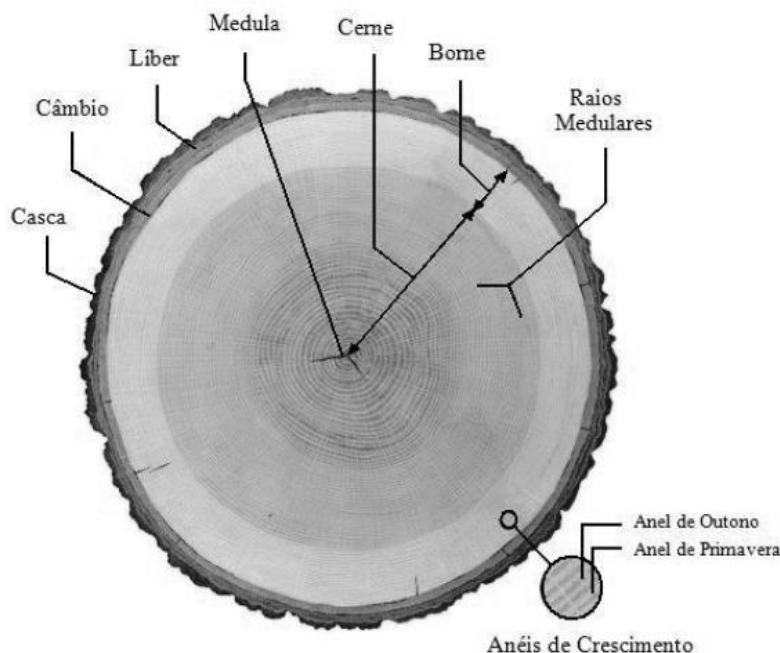


Figura 30 - Secção Transversal de um tronco de árvore (fonte: Adaptado de H.H.&M., 2005)

A **Casca**, camada protectora externa de espessura variável com a espécie e idade constituída por 2 sub-camadas: uma externa, contendo células mortas, e outra subjacente, de tecido vivo e macio, que conduz o alimento preparado nas folhas para as partes em crescimento. Esta tem como função proteger o lenho e conduzir a seiva que foi elaborada nas folhas.

O **Câmbio** é uma camada fina e quase não visível, quase microscópica, situada entre a casca e o lenho. Este constitui a parte útil do tronco que é utilizada como matéria-prima para a construção, sendo o

Borne a camada mais externa e o Cerne a camada mais interior. Apresenta na sua constituição um tecido de células em contínua e permanente transformação – tecido merismático. É responsável pelo crescimento transversal da árvore, ou seja pela adição de novas camadas concêntricas e periféricas, os anéis de crescimento. O líber e o câmbio têm uma função vital para o crescimento das árvores;

A **Médula**, de tecido macio, em torno do qual se verifica o crescimento inicial dos ramos novos;

O **Cerne**, também designado por “durâmen”, constitui a zona envolvente da medula, sendo formado por células antigas mortas, impregnadas de minerais que lhe conferem grande resistência ao ataque de insectos e fungos. A sua principal função principal é a de sustentar o tronco;

O **Borne** ou **alburno**, é a camada de células vivas que conduzem a seiva proveniente das raízes e armazenam nutrientes. A sua área é aproximadamente constante ao longo do troco, o que significa que a espessura aumenta em altura.

4.2.2 Estrutura Celular Típica

Os troncos das *Resinosas* são constituídos por 90 a 95% de traqueídeos, células ocas e alongadas com 2 a 5 mm de comprimento e 10 a 50 µm de diâmetro, de topos abaulados ou abertos (coníferas), caso em que realizam a condução da seiva ao longo do tronco.

Estas células justapõem-se topo a topo na direcção longitudinal, originando fibras que por sua vez, se organizam em planos radiais. Dispersos pela secção do tronco ocorrem canais de resina (Figura 31 Esq).

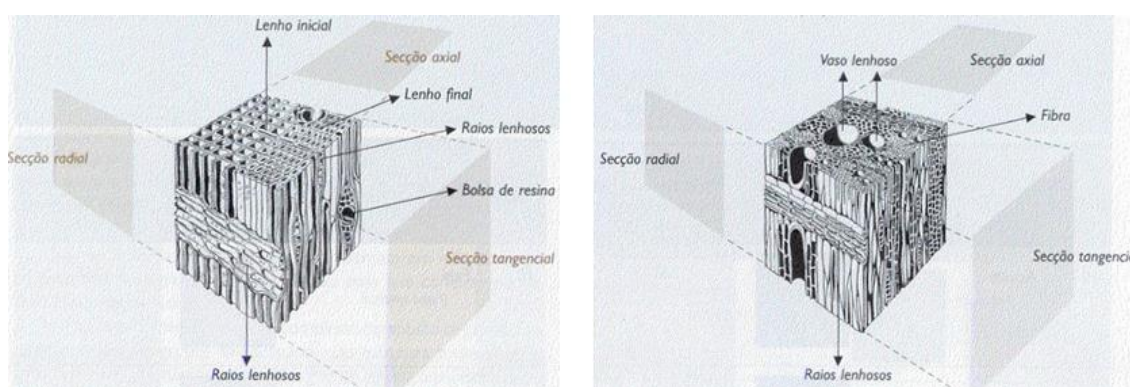


Figura 31 - Estrutura celular típica das Resinosas (Esq) e Folhosas (Dir) (fonte: Cavaco, 2001)

O armazenamento e distribuição de alimento está a cargo das células do parênquima. Nas Resinosas, estas constituem o revestimento dos canais de resina. Mas geralmente, agrupam-se também em fibras radiais designadas por raios medulares.

A troca de fluidos é facilitada por orifícios laterais nas fibras. Estes funcionam como válvulas impedindo a intrusão de ar, que romperia a coluna de líquido proveniente da raiz e mataria a árvore.

Nas *Folhosas*, os traqueídeos são fechados nos topos, dando-se a circulação de seiva em células longitudinais de grande diâmetro e topos abertos, que se justapõem formando vasos ou canais, os quais se podem distribuir de formas diversas na secção (Figura 31 Dir).

O metabolismo da árvore segue o ciclo das estações. Nos climas temperados e frios, em que este ciclo é bem marcado, o crescimento é intenso na primavera, dando origem a células grandes e de paredes finas.

No fim do Verão, pelo contrário, o crescimento abranda e produz células de menor diâmetro e paredes grossas, portanto mais resistentes (Lopes, et al., 2002).

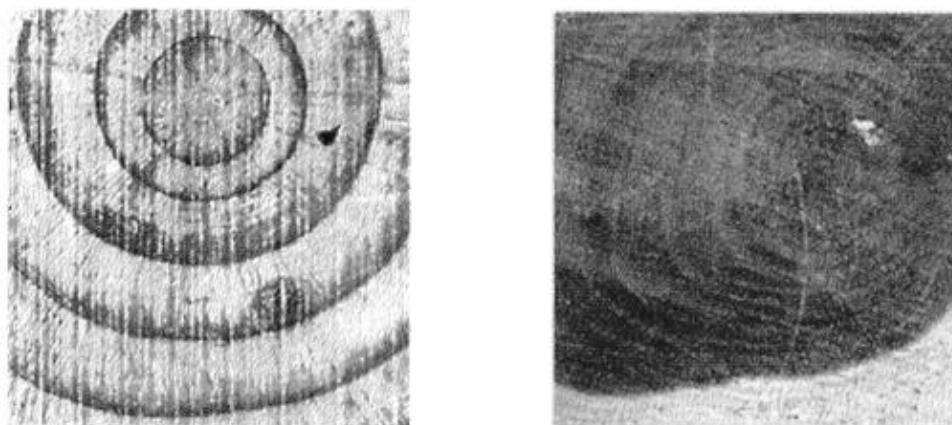


Figura 32 - Corte Transversal do Tronco (fonte: Lopes, et al., 2002)

O corte transversal do tronco revela assim um padrão de anéis de crescimento, cada qual constituído por uma zona clara mais espessa (madeira de Primavera ou lenho inicial) e outra mais escura e fina, o que permite determinar a idade das árvores.

A espécie proveniente de climas tropicais, em que as oscilações anuais de clima são pequenas, a identificação dos anéis de crescimento é muito difícil (Figura 32).

No estudo da madeira distinguem-se três níveis de organização do tecido celular através dos quais se explicam as características do seu comportamento físico-mecânico: a estrutura da parede celular (Ultraestrutura), a agregação das células formando a madeira (Microestrutura) e a consideração da madeira comercial com defeitos (Macroestrutura) (Lopes, et al., 2002).

4.2.2.1 Ultraestrutura

Esta estrutura celular não é visível a olho nu, sendo essencial recorrer a microscópicos especiais. Neste nível, o tecido celular baseia-se num conjunto de fibrilas agrupadas sob a forma de microfibrilas envolvido por uma matriz de hemicelulose e lenhina (Alvarez, et al., 2000).

A agregação das microfibrilas revela-se sob a forma de lamelas que podem ser de quatro tipos fundamentais: parede primária, P, e três camadas de parede secundária, S1, S2 e S3.

Entre as células existe uma camada, denominada lamela média, LM, que serve como material de ligação das células entre si, e que sendo rica em lenhina, não possui celulose. Contudo, na parede primária já existe uma organização da celulose, por intermédio de microfibrilas sem orientação definida (Figura 33).

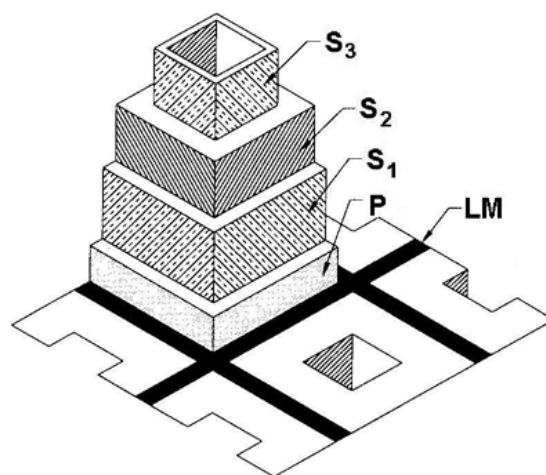


Figura 33 - Organização da parede celular (Alvarez, 2000)

A camada exterior, S1, tem apenas 0.1 a 0.2 μm de espessura. No entanto, é formada por um conjunto de subcamadas cujas microfibrilas estão alternadamente direccionadas com uma orientação inclinada de cerca de 50° a 70°, relativamente ao eixo da célula.

A camada média da parede secundária, S2, é a mais espessa das três, sendo constituída por um elevado número de subcamadas (100 a 200), cujas microfibrilas estão orientadas na direcção do eixo longitudinal da fibra com uma ligeira inclinação (5 a 20°).

Por último, a camada interna, S3, também bastante menos espessa que S2, mas mais espessa que S1, apresenta igualmente lamelação, de inclinação fraca, contudo, sem predominância.

O estudo da parede celular explica, por exemplo, a razão pela qual os movimentos provocados pela variação do teor de água são 10 a 20 vezes superiores na direcção transversal que na direcção longitudinal (Alvarez, et al., 2000).

4.2.2.2 Microestrutura

A microestrutura é visível ao microscópico. Este estudo, possibilita entender a razão da madeira ser 20 a 40 vezes mais rígida na direcção longitudinal comparando com a direcção transversal. Baseia-se na observação da disposição das células e nos seus efeitos (Lopes, et al., 2002).

4.2.2.3 Macroestrutura

É a estrutura do tecido celular visível a olho nu. Este nível centra-se na análise dos defeitos de crescimento e nos seus efeitos no comportamento mecânico da madeira. A existência de defeitos (nós e desvios das fibras), explicam porque é que a resistência à tracção na direcção paralela às fibras diminui desde os 100 MPa, para madeira isenta de defeitos, até aos 10 MPa, na madeira comercial de fraca qualidade (Lopes, et al., 2002).

4.3 DEFEITOS E DEGRADAÇÃO DA MADEIRA

Em estruturas de madeira o tempo pode vir a ser um inimigo, não pela diminuição da qualidade da madeira que, pelo contrário, é muito resistente ao envelhecimento, mas pela acção dos vários agentes que degradam no tempo (Cachim, 2007).

Sendo um material bastante susceptível ao ataque biótico, o próprio crescimento natural, os agentes atmosféricos e mesmo à má concepção de construção que alteram as suas propriedades, quer se trate de uma árvore viva, quer de madeira serrada para construção. Contudo, este aspeto de degradação é apontado como uma das principais desvantagens da madeira.

4.3.1 Características do Material

Todas as anomalias, defeitos e irregularidades que aparecem na madeira influenciam bastante as suas condições de trabalho, tanto na sua qualidade, como consequentemente os valores das suas propriedades físicas e mecânicas (Dias, 2008).

As várias anomalias e defeitos que podem ocorrer na madeira, são descritas na norma NP180 (1962) referindo que as suas causas podem estar ligadas com a própria estrutura do lenho, com ataque de agentes vivos e com o abate, a secagem e a laboração incorrectos (Cachim, 2007).

Destes defeitos mais comuns destacam-se os nós, as fendas, o desvio de inclinação em relação ao eixo da peça e os empenos. Existem outros defeitos que é possível observar em elementos estruturais de

madeira, nomeadamente as bolsas de resina, a presença de medula ou entrecasco, a madeira juvenil, entre outros (Botelho, 2006).

4.3.1.1 Nós

Os nós são inserções dos ramos no tronco da árvore, de forma cónica, com o vértice situado na medula. Nas Resinosas, os nós (ramos) irrompem no tronco a intervalos mais ou menos regulares, cuja dimensão é ditada pela velocidade de crescimento da árvore (Figura 34).

Estes são geralmente considerados como os defeitos que mais condicionam a resistência global dos elementos de madeira, ainda não sendo o principal defeito que tem influência sobre o valor do módulo de elasticidade em flexão (Dias, 2008).



Figura 34 - Presença de nós em vigas de pavimento da Pousada Medieval da Gralheira (fonte: Andrade, M.2013)

Estas anomalias correspondem às ligações orgânicas dos ramos ao tronco, apresentando no interior da mesma forma cónica. Estes apresentam várias dimensões e têm tendência a rachar e dificultar a trabalhabilidade da madeira.

Os nós provocam desvios locais nas fibras que o envolvem, fazendo com que a peça se comporte de forma instável quando actuada por uma carga de compressão paralela às fibras (Cachim, 2007).

4.3.1.2 Fendas

As fendas de secagem são resultado das elevadas tensões instaladas pela contracção diferencial da madeira entre as zonas periféricas e interiores do lenho, o que provoca esforços de tração transversal que tendem a romper a madeira segundo planos radiais, sendo os esforços longitudinais praticamente desprezáveis (Dias, 2008).

Estas conduzem à redução da secção útil resistente da peça e podem ser graves se ligarem faces opostas das peças de madeira, bem como se estiverem localizadas em zonas de união entre peças ou elementos sujeitos à compressão axial (NP180,1962).



Figura 35 - Presença de fendas de secagem (Fonte: Andrade, 2013)

Zoreta, afirma que as fendas são um dos piores danos da madeira, já que o facto de existir uma secagem mal feita pode fazer com que aconteçam tensões internas na madeira que podem libertar-se rapidamente quando se altera o estado de equilíbrio adquirido. O aumento da área exposta devido à existência de fendas de secagem leva a um aumento da probabilidade de ocorrência de fogo (Zoreta, 1986).

De qualquer modo, a ocorrência de fendas pode ter pouca influência na resistência, caso esta se encontre dentro de um intervalo de valores dimensionais determinados nas normas de classificação visual (Botelho, 2006). Nas construções antigas, é possível encontrar cortes realizados nos extremos destas fendas para barrar o seu progresso, sabendo a sua posição em relação aos seus extremos das fendas, mostram se estas progridem com o decurso do tempo ou se estão estáveis.

4.3.1.3 Inclinação do Fio

Este defeito traduz-se numa inclinação das fibras relativamente ao eixo longitudinal das peças que pode ter sido originada no momento da serração ou derivar da inclinação natural das árvores associadas aos ventos dominantes (Figura 36).

O desvio da inclinação do fio assume uma importância particular já que salienta a anisotropia própria da madeira, o que é importante na selecção da madeira para sistemas estruturais e, além de modificar as características resistentes, também influencia o aparecimento de empenos e fendimentos (Cachim, 2007).

O desvio da inclinação do fio interfere de uma forma variável na resistência que as peças de madeira evidenciam às diferentes solicitações: o seu efeito é praticamente desprezável no caso de

elementos sujeitos à flexão ou à tração e em solicitações que provocam compressões a influência pode ser mais significativa (Mateus, 1961).

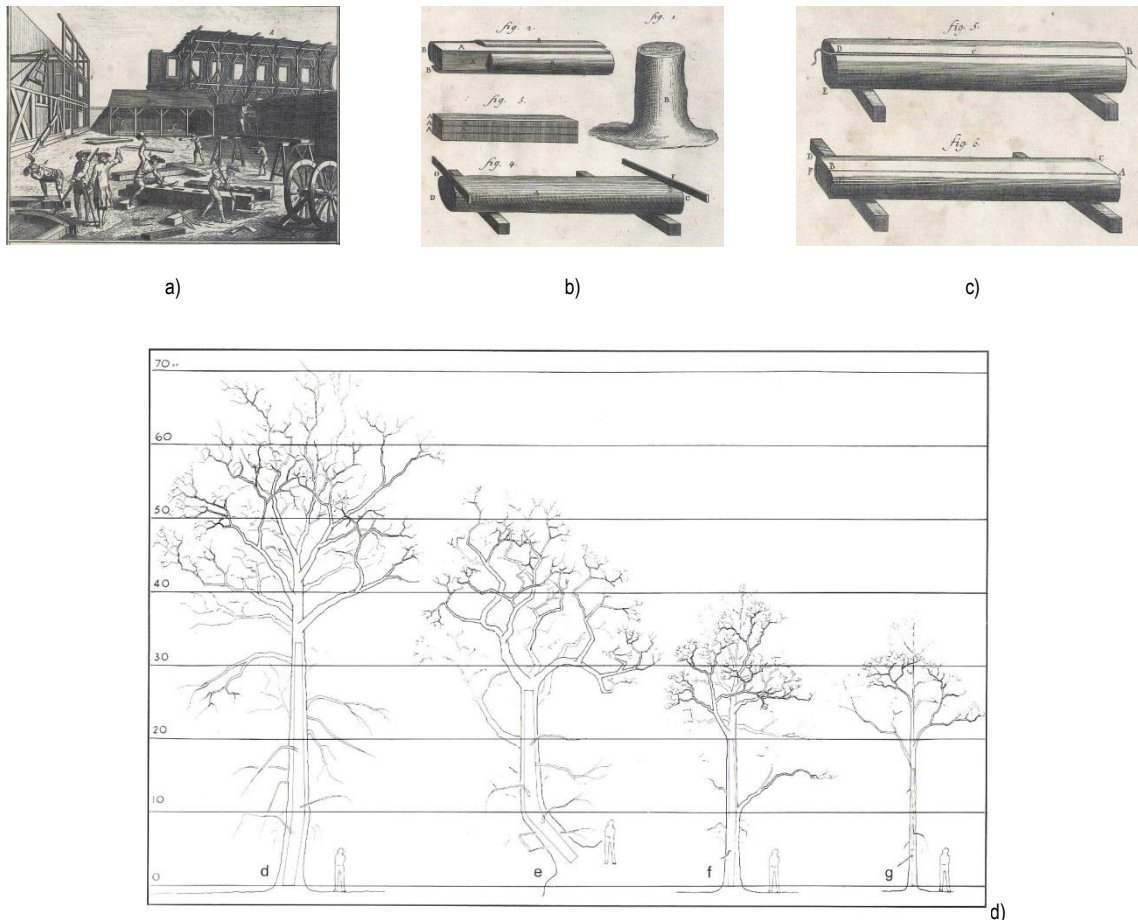


Figura 36 – a) b) c) *Carpintaria*, d'Alembert, séc. XVIII; d) Tamanhos e tipos de troncos de carvalho utilizados na construção, F.W.B. Charles, 2003.

4.3.1.4 Danos de origem biótica

Tanto o ataque de insectos como o de fungos causam reduções muito sérias na resistência mecânica dos elementos estruturais podendo produzir danos muito graves. A madeira é um material muito susceptível a estes ataques, existindo vários agentes de deteriorização que alteram as suas propriedades, designadamente os fungos xilófagos, os insectos de ciclo larvar (caruncho) e os insectos sociais (térmitas) (Dias, 2008).

4.3.1.5 Fungos Xilófagos

Devido à existência de variadas substâncias nutritivas, tais como açúcares, gomas resinas e amidos do lenho, a madeira encontra-se sob o risco de sofrer graves problemas de degradação devido à existência

de organismos que dela se alimentam e a probabilidade de ataque por parte de fungos é alta. Através das fissuras, os fungos acedem ao interior da madeira, e produzem substâncias fibrosas, degradando-as.

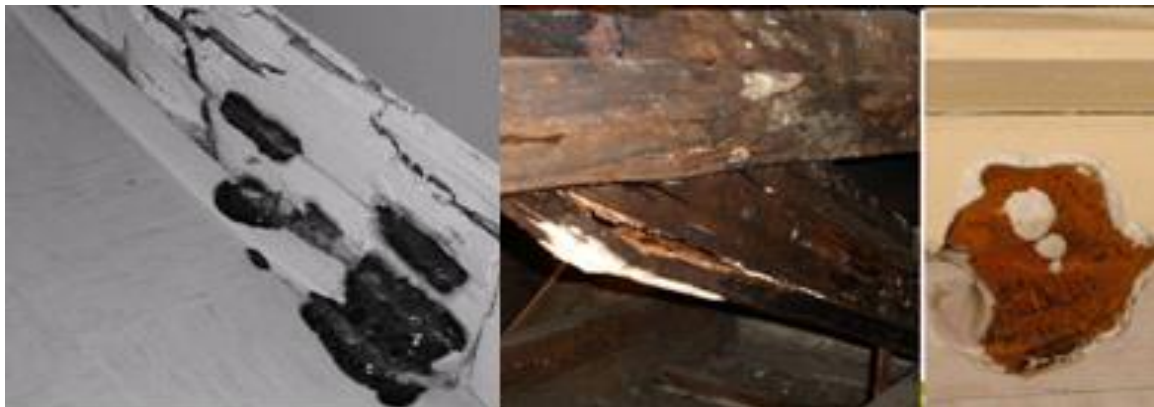


Figura 37 - Presença de fungo de podridão cúbica, Escola Secundária Rodrigues de Freitas, Porto 2007 (Fonte: Dias, et al., 2013)

A actuação destes agentes é feita de uma forma faseada, começando a sua actuação com o aparecimento de manchas e terminando com decomposições e apodrecimentos. Entre os fungos que atacam a madeira evidenciam-se os cromogéneos e os fungos de podridão (Cachim, 2007).

Apesar de não alterarem a constituição do lenho, os cromogéneos são factores desvalorizadores dos elementos de madeira pois causam manchas superficiais, como é o caso das manchas azuladas evidenciadas a baixas temperaturas.

Dado a que a madeira no interior de edifícios terá um teor de humidade na ordem dos 10 a 15%, juntamente com as deficientes condições de ventilação, os fungos de podridão só ocorrem em presença de deficiências de construção, nomeadamente nas entregas dos elementos estruturais do pavimento e coberturas nas paredes (Dias, et al., 2009).

4.3.1.6 Insectos Xilófagos

Os Anóbios (caruncho) e os Cerambicídeos (caruncho grande), são os insectos xilófagos mais habituais em edifícios. Os Anóbios são vulgarmente encontrados com teor de água elevado, a profundidades médias de 4-5cm, e alimentam-se do borne da madeira.

O seu ataque pode ser identificável pelo serrim produzido, que consiste na mistura de madeira e excrementos do inseto, preenchendo as galerias e podendo escavar com diâmetros de cerca de 1cm, podendo chegar mesmo ao centro da secção (Dias, 2008).

4.3.1.7 Insectos Sociais

Os primordiais tipos de insetos sociais (térmitas) existentes na Península Ibérica são as *Reticulitermes Lucifigus Rossi* e as *Kalotermes Flavicollis*. Enquanto os primeiros fazem ninhos no solo e no exterior, e vão à terra buscar os elementos indispensáveis para a sua sobrevivência, a humidade permanente, a escuridão e a temperatura moderada e constante, acedendo aos elementos de madeira dos edifícios através de galerias e de frinchas nas alvenarias, as segundas fazem ninhos no interior dos próprios elementos de madeira (Arriaga, 2002).



Figura 38 - Esquerda: Presença de ataques de insectos Xilófagos no Edifício Rua António Carneiro, Porto 2007, Direita: Largo Domingos, Porto 2006 (Fonte: Dias, et al., 2013)



Figura 39 - Esq: Presença de Térmitas, Igreja Stª Clara, Porto 2010; Dir: Igreja de Valongo, 2008 (Fonte: Dias, et al., 2013)

Os ataques destes insectos são particularmente na madeira menos densa e consistem na abertura de galerias de espessura muito reduzida (1 a 2 mm), paralelas à orientação do fio, deixando as secções intactas entre as galerias e a capa exterior, o que faz com que sejam detectados num estado muito avançado, aquando do aparecimento de deformações exageradas ou mesmo rotura do elemento estrutural (Dias, et al., 2013).

Na inspecção de edifícios, são vulgarmente encontrados ataques de térmitas, que normalmente são associados às respectivas galerias exteriores de entrada no edifício (Figura 40).



Figura 40 - Esq: Presença de térmitas, Midorino, Tsukuba, Japão 2006, Dir: Ninhos de térmitas vazios (Fonte: Dias, et al., 2013)

4.3.2 Acção de Agentes Atmosféricos

A acção dos agentes dos agentes atmosféricos de degradação da madeira faz-se sentir sobretudo pela radiação solar e pela chuva, principalmente através da ocorrência de ciclos de molhagem/secagem.

A ocorrência de ciclos de molhagem/secagem, devido a madeira ter uma grande variação dimensional em relação ao seu teor em água, causa tensões internas nas peças, e consequentemente a sua degradação, designadamente através do aparecimento de empenos e fendas (Botelho, 2006).

Por outro lado, a retração de humidade da madeira, permite a abertura de fendas, aumentando a ocorrência de ataques bióticos, e resultando no envelhecimento da estrutura celular e na diminuição da resistência da peça (Dias, 2008).

A humidade não origina, por si só, a degradação das estruturas de madeira, mas também a permanência destas em ambientes húmidos e com má ventilação favorece as condições adequadas para o aparecimento dos agentes biológicos.

4.3.2.1 Radiação Solar

A camada superficial da madeira, directamente exposta à radiação solar, apresenta a decomposição da lenhina pela acção dos raios ultravioleta, levando a uma alteração da sua coloração superficial, que passa pela alteração de tonalidade amarelada para uma tonalidade acinzentada.

Quando, posteriormente, a madeira é exposta à água da chuva, a sua superfície é lavada por escorrimento, ficando uma nova camada de madeira sã exposta à radiação ultravioleta, conduzindo a um processo de degradação contínuo (Botelho, 2006).

Por outro lado, a ação do Sol provoca a abertura de fendas na madeira o que permite, na ocorrência de chuva, o alojamento da humidade e a consequente aceleração de ataques de agentes bióticos (Cachim, 2007).

4.3.2.2 Chuva e Humidade

Um dos parâmetros que influenciam muito as características da madeira é o teor em água. Quanto maior é o seu teor, menor é a resistência mecânica da mesma, e maior é o seu inchamento e a probabilidade de ser atacada por agentes biológicos.

A acção de agentes atmosféricos, devido ao aparecimento de água, acontece particularmente através da água da chuva, podendo também manifestar-se a partir da humidade do terreno. Nos pavimentos térreos do edifício, de facto, pode manifestar-se a humidade do terreno que ascende por capilaridade através das paredes, ou também pelo contacto directo dos elementos de madeira com o terreno, o que, naturalmente, se deve evitar. A humidade de precipitação ocorre quando se dão infiltrações pelas coberturas, paredes ou vãos, principalmente quando os edifícios se encontram em estado de abandono.

Neste caso, os elementos de madeira mais atingidos são os que se encontram próximo da envolvente do edifício, em particular as entregas das vigas nas paredes e as zonas sob os vãos (Dias, et al., 2013).

A presença de água, quando associada a ciclos de secagem/molhagem e a variações de temperatura, leva à criação de condições para que se desenvolvam fungos de podridão e ataques de insectos, em particular carunchos e térmitas. Como resultado destes ataques, ocorrem deslocamentos verticais e rotações, acompanhados normalmente da redistribuição de esforços e da ocorrência de vibrações acentuadas nos pavimentos (Appleton, 2003).



Figura 41 - Os raios ultravioleta decompõem lenhina e a madeira fica cinzenta, o sol provoca abertura de fendas, a humidade aloja-se nas fendas e acelera os ataques bióticos (Fonte: Dias, et al., 2013)

4.3.3 Deficiente concepção (ou uso) estrutural

Uma grande parte dos danos verificados em pavimentos de madeira tem como origem a concepção ou construção incorrectas, contando que os erros mais comuns acontecem devido à existência de secções insuficientes para as cargas actuates, a consideração de espaçamentos exagerados entre vigas, a falta de tarugamento, a má ligação entre soalho e vigamento, entre outros (Dias, et al., 2013).

Contudo, a não consideração da possibilidade de ocorrência de fenómenos de fluência da madeira, na fase de projecto, faz com que durante a vida útil da estrutura a longo/médio prazo, surjam deformações excessivas. Já é frequente o não dimensionamento das ligações e entalhes, que são elementos delicados, podendo originar roturas e deslizamentos provocados pela deformação em serviço (Faria, 2006).



Figura 42 - Deformação excessiva do pavimento de madeira (Fonte: Dias, et al., 2013)

Appleton refere o carácter negligente dos projectos de estruturas de madeira ao nível dos pavimentos, que ao longo dos séculos, vão perdendo a qualidade necessária ao seu bom desempenho no sentido de os tornar mais económicos. A título de exemplo, os edifícios construídos no século XVIII e ampliados nos séculos XIX e XX com novos pisos de madeira com pouca qualidade, reduzindo as secções e aumentando os espaçamentos, abandonando as técnicas construtivas do passado (Appleton, 2003).



Figura 43 - Intervenções posteriores desadequadas (Fonte: Dias, et al., 2013)

Ao longo da vida útil dos edifícios, a realização de obras é por diversas vezes origem de graves danos estruturais (Figura 43), muito devido à eliminação de elementos estruturais importantes, ou uso de materiais que introduzem humidade de construção e aumento de cargas devido à alteração de funcionalidade do edifício (Dias, et al., 2013).

4.4 INSPECÇÃO DOS DANOS. ANÁLISE E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO

4.4.1 Inspecção dos danos

4.4.1.1 Introdução

Ao contrário da construção nova, em que uma vez escolhida a localização, geralmente, apenas é necessário recolher informação sobre a topografia e terreno de fundação, as intervenções de reabilitação fazem apelo ao conhecimento da geometria, dos materiais e do estado de conservação da estrutura (Appleton, 2003).

Quando se pretende preservar o mais possível os elementos estruturais do edifício, numa reabilitação é importante conhecer o seu estado real. A obtenção deste conhecimento irá permitir avaliar a sua actual capacidade resistente, tornando-se num instrumento fundamental na tomada de decisão relativa ao tipo de acções de intervenção a implementar (Paupério, et al., 2001).

Assim, num processo de reabilitação de edifícios existentes é fundamental avaliar o seu estado de conservação para que seja possível propor soluções que permitam atingir o desempenho desejado. Esta fase deve ser adaptativa, pelo que na reabilitação não existem estratégias pré-definidas, é necessário um diagnóstico específico e fundamentado, caso a caso, que permita propor uma estratégia e metodologia técnica e economicamente adequada (Cóias, 2006).

A inspecção tem como objectivo proceder ao levantamento de todos os dados relevantes à futura análise do comportamento estrutural e definição das medidas de substituição, conservação, reforço a empregar de modo a assegurar o tempo em serviço pretendido para a estrutura.

A realização da inspecção implica o acesso aos elementos estruturais, devendo ser estabelecido um esquema de remoção de elementos não estruturais, caso necessário, de modo a minimizar a quantidade de material a remover.

Para isso implica que a remoção de elementos ou de material, seja feita de forma a permitir observar simultaneamente a qualidade e as características geométricas dos elementos principais da estrutura, assim como, as zonas críticas de ocorrência de deterioração (Cóias, 2006).

Esta inspecção localizada poderá ser prolongada, caso os resultados observados o exijam ou quando surjam dúvidas relativamente à qualidade da ligação entre elementos, a existência de possíveis deficiências de contraventamento.

Assim, a inspecção não deverá negligenciar também a possibilidade das anomalias poderem resultar de alterações introduzidas num tempo posterior (Figura 44), devido à crescente deterioração de elementos menos danificados ao longo do tempo. A observação visual no que respeita a estruturas de madeira antigas tem como objectivo o levantamento dos danos e materiais de modo a poder-se atribuir uma determinada classe de qualidade (Arriaga, 2002).



Figura 44 - Intervenções posteriores desadequadas (Fonte: Dias, et al., 2013)

Esta fase consiste na caracterização dos elementos estruturais que constituem os pavimentos ou asnas de madeira, em termos de geometria (obtida em parte no levantamento arquitectónico), na classificação da madeira (resinosas ou folhosas), sempre com a preocupação de compreender o funcionamento da estrutura.



Figura 45 - Verificação das vigas de suporte do pavimento junto ao apoio. (Fonte: Dias, et al., 2013)

Dias refere a importância em analisar as condições de apoio dos elementos estruturais entre as vigas e as paredes (Figura 45). Este refere, também, a importância de se proceder à limpeza dos elementos estruturais com sujidade, pó, detritos de animais com uma escova de fibra vegetal ou sintética e aspirador antes de se iniciar a inspecção visual (Dias, et al., 2013).

Esta informação torna-se completa quando acompanhada de ensaios (destrutivos ou não destrutivos) e sondagens superficiais executadas sobre os materiais. Esta informação poderá ser acompanhada por levantamentos fotográficos, topográficos ou mesmo esquemas manuais que por vezes, estes últimos serão utilizados como esquemas utilizados para efectuar a modelação numérica da estrutura (Faria, 2006).

Após o levantamento dos danos existentes (nós, fendas, inclinação do fio, origem biótica, entre outros) nos elementos estruturais, segue-se o levantamento dos elementos estruturais.

Esta avaliação do estado de conservação vai desde a determinação e localização das anomalias estruturais e nas peças de madeira, às causas que deram origem a essas anomalias. Nesta avaliação é importante detectar zonas de deformações excessivas, as peças com defeitos, nomeadamente nós e fendas, assim como identificar a qualidade da madeira existente.

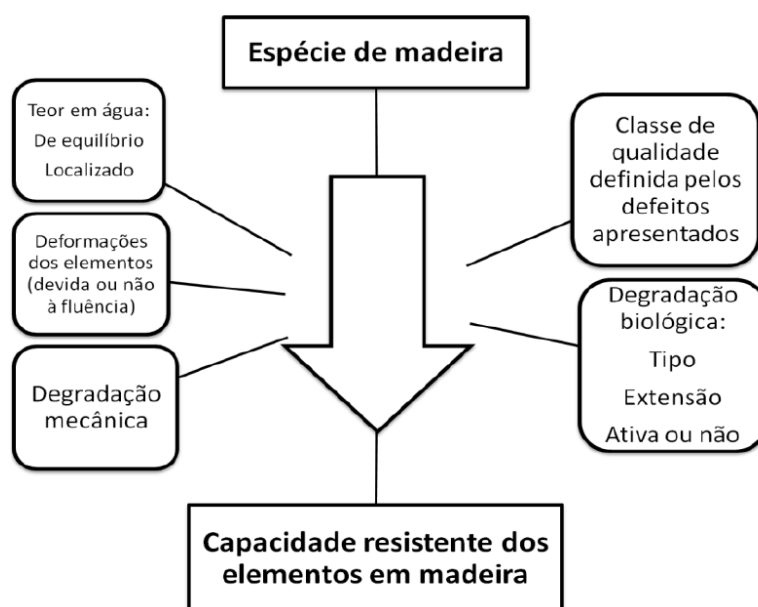


Figura 46 - Verificação das vigas de suporte do pavimento junto ao apoio. (Fonte: Dias, et al., 2013)

Porém, as deformações excessivas são indícios de degradação dos elementos de madeira, que podem acontecer devido à falta de rigidez das ligações ou mesmo pela degradação de vigas ou tarugos. As irregularidades da textura da madeira, empolamentos, alteração da cor, são também indicadoras que podem ajudar na identificação do motivo da degradação (Dias, et al., 2013).

Certos Autores defendem que a inspecção de estruturas em madeira, tendo em vista a sua recuperação, compreende a necessidade última de quantificar a resistência dos seus elementos. Para esse efeito, agrupam-se uma série de parâmetros com o intuito de serem avaliados e quantificados (Machado, et al., 2000).

4.4.2 Inspeção Visual

4.4.2.1 Introdução

A inspecção visual é dos métodos usual de inspecção e diagnóstico para estruturas de madeira devido à facilidade de examinação através do contacto directo ou a uma curta distância que permite a deteção e registo de grande parte das anomalias, defeitos e ataques existentes nas peças (Brites, 2011).

Este método de avaliação do estado de conservação da estrutura é simples e antigo pois com a informação recolhida e um inspector experiente permite obter informações que permitam determinar a espécie de madeira, defeitos mecânicos e sinais de deteriorização existente.

As peças de madeira apresentam uma grande variabilidade no que diz respeito às propriedades mecânicas, como resultado de diversos factores, dos quais se destacam a espécie da madeira e os defeitos.

Assim, e por este motivo, a madeira para ser usada de um modo fiável e seguro, é necessário que se garanta ou defina um esquema de controlo de qualidade. Não obstante a existência de inúmeros ensaios que complementam o estudo de diagnóstico, a avaliação da resistência dos elementos de madeira antiga assenta, na maioria das vezes, em critérios de observação visual, na identificação da espécie da madeira e, por conseguinte, na sua qualidade e estado de conservação dos elementos, tendo em conta os defeitos que apresentam (Freitas, 2011).

Em estruturas de madeira, a inspecção é normalmente dificultada devido a estrutura não se encontrar visível. O contacto visual e físico com os elementos a inspeccionar é impedido devido à presença de elementos construtivos (soalhos, tectos, asnas) que impossibilitam o acesso aos elementos a examinar (Dias, 2008).

Branco afirma que a classificação visual mostra pouca objectividade, dado a inclusão numa classe depender da apreciação do técnico, não sendo consideradas propriedades importantes, como a massa volúmica. Segundo o autor, o facto da classificação ser baseada numa inspecção visual efectuada de acordo com uma norma, dificulta a avaliação das condições estruturais, pois as normas actuais de visualização não foram pensadas para secções usadas nas construções antigas (Branco, et al., 2004).

Através da inspecção visual é, então, possível realizar um levantamento dos materiais e danos dos elementos de madeira, bem como a classe de qualidade da madeira existente. Será analisado, neste

subcapítulo uma abordagem às classes de qualidade e resistência de madeira nova para levar a uma melhor compreensão do Método simplificado baseado na EN 338 para classificação dos valores de cálculo das propriedades físicas e mecânicas de madeira antiga, através da inspecção e classificação visual.

4.4.2.2 Classes de qualidade

As peças estruturais em madeira apresentam uma grande variabilidade no que diz respeito às propriedades mecânicas como resultado de diversos factores, como foi possível verificar no capítulo anterior.

Assim, para que a madeira possa ser usada como um material de construção fiável e seguro, é necessário definir um esquema de controlo de qualidade que garanta que as peças estruturais com dimensões comerciais aplicadas pelos construtores tenham características físicas e mecânicas totalmente compatíveis com as especificações de projecto (Freitas, 2012).

Através de ensaios, a madeira foi classificada em classes, as quais podem ser ligadas a valores característicos de resistência, massa volúmica e rigidez, entre outros. O sistema europeu de classificação de madeiras em classes de qualidade baseia-se nas quatro normas da série EN 14081 definindo as regras gerais de classificação de madeiras, visual e por máquinas, para uso estrutural.

Estes apresentam-se como os dois métodos actualmente disponíveis para classificação de madeiras, tendo naturalmente, maior ênfase neste trabalho, o método visual (Freitas, 2012).

Estas normas definem regras gerais de classificação, sendo a classificação de uma dada peça de madeira realizada com base em normas aplicáveis a espécies concretas. Aplicam-se assim à avaliação em laboratório da qualidade de peças estruturais em madeira, novas ou usadas, e de uma espécie determinada.

A classificação visual assenta na limitação de defeitos por classe EN 14081.1 realizada por operadores especializados, sendo os principais defeitos a limitar os seguintes:

- O número e localização dos nós
- O desvio do fio de madeira em relação ao eixo da peça
- O descaio (“cantos cortados nas peças”)
- As fendas.

Esta classificação é realizada através da avaliação das características (massa volúmica, medula) e dos defeitos da madeira associados à sua estrutura (nós, inclinação do fio, bolsas de resina, casca inclusa), ao corte praticado (descaio) e às alterações da madeira (empenos, fendas, degradação biológica) e da limitação destes parâmetros de acordo com uma norma que define os limites dos defeitos para cada grupo de madeiras, semelhantes entre si, ao nível da qualidade da média.

Cada um desses grupos constitui uma classe de qualidade (Negrão, et al., 2009).

Botelho refere que, para além de exigir o envolvimento de técnicos especializados e experientes e a análise de uma grande quantidade de factores, esta avaliação não é sensível à existência de defeitos internos que, como se sabe, podem ter bastante influência no valor da tensão de rotura dos elementos e, por isso, é importante a perícia e competência do operador responsável (Botelho, 2006).

4.4.2.3 Classes de resistência

O princípio das classes de resistência é o da atribuição das principais propriedades físicas e mecânicas a uma dada população de madeiras para estruturas, de forma simples e objetiva, de modo a facilitar a sua aplicação em trabalhos concretos de estruturas.

As classes de qualidade são definidas por uma sigla que identifica as principais propriedades mecânicas a usar no cálculo, facilitando assim a especificação por parte dos projectistas (Freitas;2012).

A definição de classes de resistência consiste no agrupamento de espécies de madeira para estruturas com idênticas propriedades físicas e mecânicas para que se garanta que, consoante o padrão necessário, a madeira terá comportamento correspondente.

Através deste processo, os projectistas apenas precisam de definir a classe de resistência da madeira que se adequa às suas necessidades e, de seguida, consultar a disponibilidade das peças com os produtores, de acordo com a durabilidade pretendida (Negrão, et al., 2009).

A designação de uma determinada classe é representada por sigla de acordo com a população lenhosa e a capacidade resistente associada. A letra “C” representa as resinosas (*Coniferous*) e a “D” refere-se às folhosas (*Deciduous*). Sendo ambas seguidas por um número corresponde respectivamente ao valor da resistência característica à flexão na direcção do fio [N/mm²].

Como já foi referido, a nível nacional, pode também ser consultada a ficha de especificação do LNEC: M1 – *Especificação de madeira para estruturas* (Cruz, et al., 1997), que congrega várias informações úteis relativas a este tema. Os valores indicados na EN 338 vêm reproduzidos na Tabela 4.1 e 4.2 (Negrão;Faria;2009). Estes valores (da Especificação do LNEC M1 e da EN 338) foram obtidos da seguinte forma:

- As principais propriedades físicas e mecânicas (massa volumica, resistência à flexão na direcção das fibras e módulo de elasticidade) são resultado de campanhas intensivas de ensaios;
- As restantes propriedades mecânicas, são resultado de relações numéricas obtidas por extrapolação estatística de resultados de ensaios.

Deste modo, para fazer a correspondência “espécie – qualidade” de uma população a uma classe de resistência, é suficiente a determinação destas três propriedades: resistência à flexão, massa volumica, e módulo de elasticidade.

Tabela 4.1: Propriedades físicas e mecânicas de madeira folhosa para estruturas (resinosas) (fonte: Adaptado Negrão, et al., 2009)

Espécies Resinosas		Classes de Resistência											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propriedades resistentes, em N/mm ² (Mpa)													
Flexão	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracção paralela ao fio	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Tracção perpendicular ao fio	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela ao fio	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressão perpendicular ao fio	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Corte	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Propriedades de rigidez, em kN/mm ² (GPa)													
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor médio)	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor característico)	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Módulo de elasticidade perpendicular ao fio (valor médio)	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de distorção (valor médio)	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volumica, em kg/m ³													
Valor característico	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Valor médio	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Nota:

i) Os valores indicados para a resistência à tracção, resistência à compressão, resistência ao corte, valor característico do módulo de elasticidade, valor médio do módulo de elasticidade perpendicular ao fio e valor médio do módulo de distorção foram calculados usando as equações apresentadas no Anexo A.

ii) Os valores tabelados correspondem a madeira com um teor em água em equilíbrio com uma temperatura de 20°C e humidade relativa do ar de 65%.

iii) Madeira das classes C45 e C50 pode não estar disponível de imediato.

Tabela 4.2: Propriedades físicas e mecânicas de madeira folhosa para estruturas (folhosas) (fonte: Adaptado Negrão, et al., 2009)

Espécies Folhosas		Classes de Resistência					
		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Propriedades resistentes, em N/mm ² (Mpa)							
Flexão	$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
Tracção paralela ao fio	$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
Tracção perpendicular ao fio	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela ao fio	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
Compressão perpendicular ao fio	$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Corte	$f_{v,k}$	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Propriedades de rigidez, em kN/mm ² (GPa)							
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor médio)	$E_{0,mean}$	10	10	11	14	17	20
Módulo de elasticidade paralelo ao fio (valor característico)	$E_{0,05}$	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Módulo de elasticidade perpendicular ao fio (valor médio)	$E_{90,mean}$	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Módulo de distorção (valor médio)	G_{mean}	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Massa volumica, em kg/m ³							
Valor característico	ρ_k	530	560	590	650	700	900
Valor médio	ρ_{mean}	640	670	700	780	840	1080

Nota:

i) Aplicam-se as mesmas notas explicitadas no Quadro 3.2.

4.4.2.4 Relação entre classes de qualidade e de resistência

O controlo da qualidade da madeira assenta nas normas de classificação visual ou mecânica de madeira para estruturas, pelo que é necessário definir de forma a relacionar essas normas com as classes definidas na EN 338. Foi então criada a norma EN 1912:2004 “*Structural Timber – Strength classes - Assignment of visual grades and species* “. Esta relaciona a madeira de diversas espécies com os diversos sistemas nacionais de classificação em classes de qualidade e a correspondente classificação de resistência.

Tabela 4.3: Relação entre classes de qualidade e classes de resistência (fonte: Adaptado Freitas, 2012)

Espécie de Madeira	Classe de Qualidade (Norma)	Classe de Resistência
<i>Pinho Bravo</i> (<i>Pinus Pinaster Ait.</i>)	E (NP 4305)	C18
<i>Casquinha</i> (<i>Pinus Silvestris L.</i>)	SS (BS 4978)	C24
	GS (BS 4978)	C16
<i>Espruce</i> (<i>Picea Abies Kars</i>)	S13 (DIN 4074)	C30
	S10 (DIN 4074)	C24
	S7 (DIN 4074)	C16
<i>Câmbala</i> (<i>Milícia Excelsa A. Chev.</i> ou <i>M. Regia A. Chev.</i>)	HS (BS 5756)	D40

Em Portugal, existe apenas uma norma de classificação em classes de qualidade para a espécie de pinho bravo (4305:1995). A classificação é feita em classes de qualidade E e EE, sendo estas classes correspondentes aproximadamente às C18 e C35 da NP EN 338:2003. A Classe EE não vem considerada na norma NP EN 1912:2003 e, portanto, não é reconhecida como C35 para efeitos de certificação de produto. Importa referir que no nosso país não é possível encontrar madeira da Classe EE (Negrão, et al., 2009).

4.4.2.5 Classificação de madeira antiga. Método baseado na EN338

Os processos e respectivas normas de classificação em classes de qualidade e resistência descritos anteriormente, são apenas aplicáveis a estruturas com madeira nova. É assim muito complexa a tarefa de avaliar a segurança estrutural de estruturas de madeira existentes pois, para esse efeito, será necessário avaliar a resistência, o estado sanitário e a integridade dos elementos estruturais que as compõem (Negrão, et al., 2009).

Na avaliação da segurança de estruturas de madeira antiga é necessário entender as acções a que as peças estão expostas, de maneira a poder analisar a circunstância dos defeitos e patologias existentes. É importante também estudar em pormenor as fendas existentes e o motivo da sua ocorrência.

Na avaliação de segurança de estruturas antigas, é também fundamental relacionar as lesões e defeitos resultantes do uso com esforços a que as peças estão sujeitas, de modo a poder avaliar, se esses

defeitos são críticos, face aos esforços a que as peças irão estar sujeitas. Fundamental é ainda descobrir as fendas resultantes de roturas provocadas por esforços mecânicos, muitas vezes causadas por erros humanos de utilização, falhas pontuais de elementos estruturais ou, ainda mais frequente, de falhas nas ligações (Pereira, 2009).

Na (Figura 47), é esquematizado um desses possíveis procedimentos, baseando-se os mesmos no ponto 6.2.2 da norma EN338, a qual refere que é possível indexar uma determinada população de madeiras a uma dada classe de resistência, desde que a sua resistência à flexão na direcção paralela às fibras ($f_{m,k}$), a sua massa volúmica (ρ_k) e o seu módulo de elasticidade médio na direcção paralela às fibras ($E_{0,m}$) sejam todos superiores aos indicados na classe respectiva (Freitas, 2012).

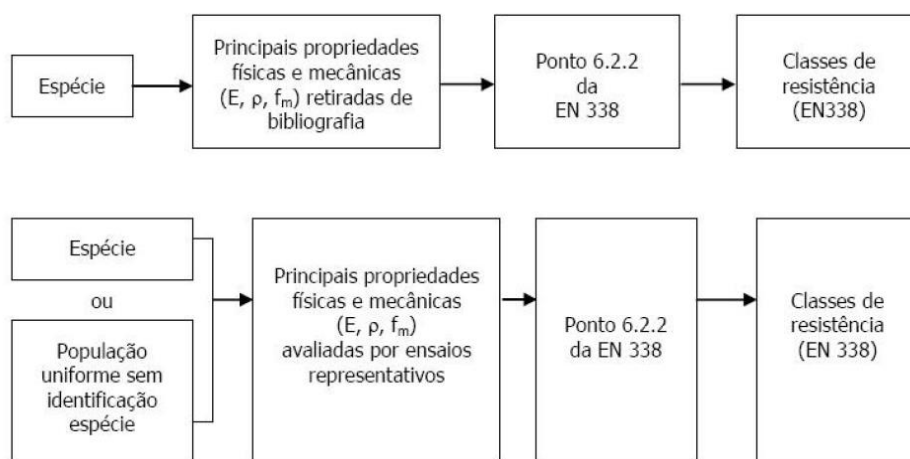


Figura 47 - Atribuição de classes de resistência a madeiras em serviço. (Fonte: Freitas, 2012)

Para adoptar os procedimentos ilustrados na Figura 47, é assim fundamental identificar a espécie, o que implica conhecimentos das características visuais das madeiras (cor, largura dos veios de verão e de inverno, dureza superficial, diferenças entre o borne e o cerne, etc.) e muitas vezes, a retirada de uma amostra real que possa ser avaliada em laboratório. A massa volúmica é sempre um indicador fundamental na aferição de uma dada avaliação (Negrão, et al., 2009).

A Tabela 4.4 representa a aplicação destes princípios às principais madeiras nacionais usadas em estruturas. Não inclui o Pinho bravo português por ter uma norma específica de classificação que o inclui na classe C18, desde que tenha defeitos que permitam enquadrá-lo na classe de qualidade E (4305:1995).

É importante referir que é sempre essencial aplicar conhecimentos genéricos de classificação de madeiras que possibilitem descobrir as peças cujo estado não lhes permita mais resistir a cargas de forma segura. Os defeitos mais comuns são os resultados das fendas de diversos tipos e de ataques de fungos e insectos xilófagos. É necessário avaliar a forma das secções residuais de madeira e verificar se ainda estão

em condições de assegurar a estabilidade das estruturas onde estão aplicadas, sem recurso a próteses ou à substituição pontual de peças ou partes de peças (Freitas, 2012).

Tabela 4.4: Classes de resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira (fonte: Adaptado Freitas, 2012)

Espécie de Madeira	$f_{m,k}$ (Mpa)	$E_{0,mean}$ (Gpa)	ρ_k (kg/m ³)	Classe EN 338:2003
Castanho (<i>Castanea sativa</i> , Mill)	97	10	540	D30
Carvalho (<i>Quercus faginea</i> , Lam.)	122	10	700	D30
Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> , Labill)	137	10	700	D30
Choupo branco (<i>Populus Alba</i> , L.)	80	10	420	C22

É importante salientar que esta metodologia exige o envolvimento de técnicos especializados e experientes e a análise de uma grande quantidade de factores. Além deste ponto, tem também a desvantagem de não identificar defeitos internos numa peça, que podem ter bastante influência no valor da tensão de rotura dos elementos (Botelho;2006).

4.4.3 Informação de arquivo do edifício e da informação obtida na inspecção do edifício

Antes de levar a cabo o exame pormenorizado de um edifício existente e o desenvolvimento de um programa de intervenção, deve ser reunida a informação disponível, tarefa que faz parte do exame preliminar. Assim, a recolha de informação do edifício é uma das etapas primordiais no processo de inspecção pois permite conhecer o seu enquadramento paisagístico, histórico, arquitectónico e construtivo.

Esta informação tem por objectivo uma avaliação aprofundada da construção ditada pela verificação de defeitos ou insuficiências, pela redução das secções ou das características dos materiais ou pelo aumento das acções a que a construção está sujeita (Dias, 2008).

A avaliação histórica do edifício e de possíveis intervenções ocorridas no passado é importante para integrar todo o conhecimento documental num modelo de intervenção consistente e de respeito pelo edifício. O rigor e a pertinência dos elementos disponíveis deverão ser confirmados em obra. Por vezes, a consulta de manuais antigos revela-se um outro instrumento de conhecimento das construções existentes pois transmitem informações sobre o processo construtivo utilizado na época em que foram construídos os edifícios (Dias, et al., 2013).

O registo detalhado dos danos revela-se de grande utilidade pois permitem uma visão global dos problemas, servindo de base na avaliação do conhecimento completo dos materiais que constituem o

edifício, assim como os esquemas estruturais que permitem ao observador estabelecer uma interligação entre os elementos construtivos e os fenómenos observados (Ornelas, et al., 2006).

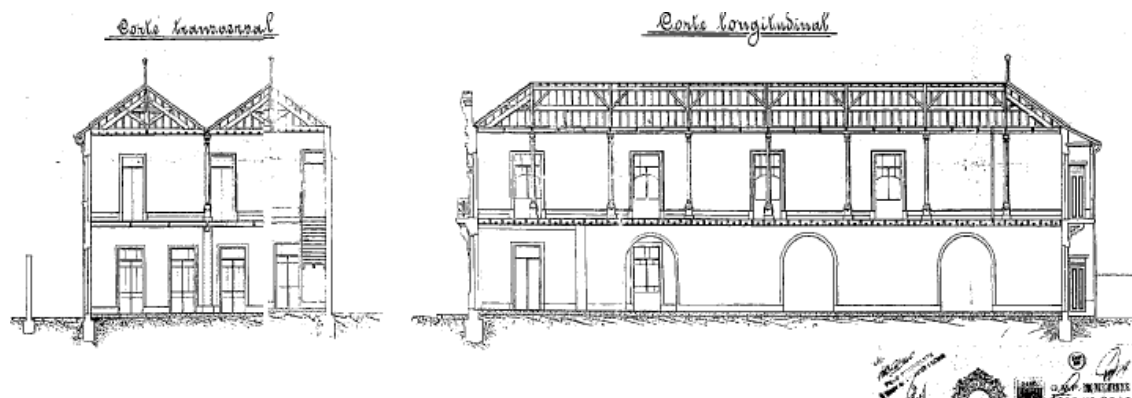


Figura 48 - Pesquisa histórica do edifício (Fonte: WNcrep, 2013)

A informação recolhida deve ser tratada com técnicas de documentação adequadas, e à medida que aumenta a complexidade e o valor do edificado, aumenta também a quantidade de informação registada e a dificuldade em proceder ao seu tratamento e apresentação de forma eficaz e apelativa (Mateus, 2002).

Conhecer as antigas tecnologias e materiais é, portanto, um primeiro passo para o respeito e a salvaguarda do património arquitectónico e viabiliza uma mudança de atitude que hoje se torna urgente.

A utilização de informação gráfica, facilita a troca de informação entre os diversos agentes envolvidos no processo de reabilitação.

Em suma, a inspecção com levantamento estrutural/material/danos de um edifício deve ser baseada numa metodologia sistematizada que se considera ser uma ferramenta fundamental de apoio a intervenções sustentadas no património (Dias, et al., 2013).

4.5 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

4.5.1 Ensaios não destrutivos

4.5.1.1 Introdução

Nos dias de hoje, existem muitos instrumentos que de alguma forma ajudam-nos a avaliar, de uma forma não destrutiva, o estado de conservação dos elementos estruturais de madeira e inclusive determinar os valores característicos das propriedades físicas e mecânicas do material.

Desde os instrumentos mais tradicionais, tais como o martelo e o formão que podem dar indicações muito úteis acerca do estado de conservação dos elementos, quando usados por pessoas mais experientes, até ao uso de instrumentos mais sofisticados como o Resistógrafo, o Pilodyn ou os Sismógrafos, sendo possível determinar resultados mantendo as peças *in situ*.

Feio, diz ainda que «a inspecção e a avaliação *in situ* das propriedades da estrutura representam uma importante parte da conservação das estruturas históricas de madeira e os métodos não destrutivos são excelentes para atingir um bom nível de conhecimento na análise estrutural, diagnóstico e inspecção de construções antigas» (Feio, 2005).

Machado, refere que as técnicas não destrutivas são aquelas que «infligindo ou não danos mecânicos aos elementos inspeccionados, não condicionam significativamente a sua capacidade resistente». Este autor, refere a importância de uma grande quantidade de informação para ser interpretada correctamente e por isso estas técnicas devem ser feitas numa lógica em que o utilizador tenha acesso ao número suficiente de dados (Machado, et al., 2000).

4.5.1.2 Martelo e Formão

De modo a avaliar de uma forma expedita e prática a existência de danos nos elementos estruturais da madeira, usam-se o martelo e o formão (Figura 49).



Figura 49 - Avaliação da integridade de viga de madeira com o martelo (esq.) e com o formão (dir.) (Fonte: WCrep, 2013)

Essa avaliação é feita fazendo a comparação entre o som originado pelo embate de um martelo numa peça não deteriorada e uma deteriorada, e assim é possível perceber a existência dessa degradação, podendo ser vazios, degradações internas, fendas, entre outras.

Contudo, com a utilização do formão é possível avaliar a dureza superficial da madeira, analisando, de um modo rápido e expedito a sua integridade.

No entanto, é necessário ter em conta que com estes instrumentos é difícil quantificar a gravidade ou extensão da degradação, e mesmo a qualidade da madeira sendo que, no caso do martelo, diferentes seções transversais, teores em água na madeira e condições de apoio, podem levar o utilizador em erro (Machado, et al., 2000).

4.5.1.3 Humidímetro

O humidímetro (Figura 50) é uma técnica de aplicação em laboratório ou *in-situ*, que permite elaborar um rápido mapeamento da humidade de superfície do elemento analisado. É uma técnica sensível a sais-higroscópicos, não destrutiva, e permite obter um mapeamento da humidade no paramento (Serafim, 2012).



Figura 50 - Avaliação da integridade de viga de madeira com humidímetro (Fonte: Andrade, 2013)

O humidímetro é constituído na sua base por dois eléctrodos em borracha que em contacto com o material a ensaiar, cria um campo eléctrico que permite medir a resistência eléctrica do material conforme o seu teor em água, ou seja, este aparelho permite efectuar medições superficiais do teor de água das paredes com base na variação da resistência eléctrica (Coelho, 2010).

A este nível, as normas respeitantes à segurança estrutural actuais do Eurocódigo 5, estabelecem a existência de risco de ataque por fungos sempre que a madeira estiver exposta, valores de humidades superiores a 20%, sugerindo ainda que nas madeiras que já sofreram ataques de fungos, este limite deva ser reduzido para 18% (Feio, 2005).

Assim, com leituras periódicas com este aparelho, é possível actuar preventivamente, eliminando-se possíveis entradas de água, verificando zonas com maior potencial de ataques de fungos, que correspondem geralmente a detalhes construtivos que permitem a acumulação de humidade.

4.5.1.4 Resistógrafo

O Resistógrafo é um instrumento utilizado desde 1985 na inspecção de estruturas de edifícios antigos e na avaliação da degradação biológica de árvores, e relaciona a energia necessária na penetração de uma agulha, com a resistência da madeira a esta perfuração (Freitas, 2012).

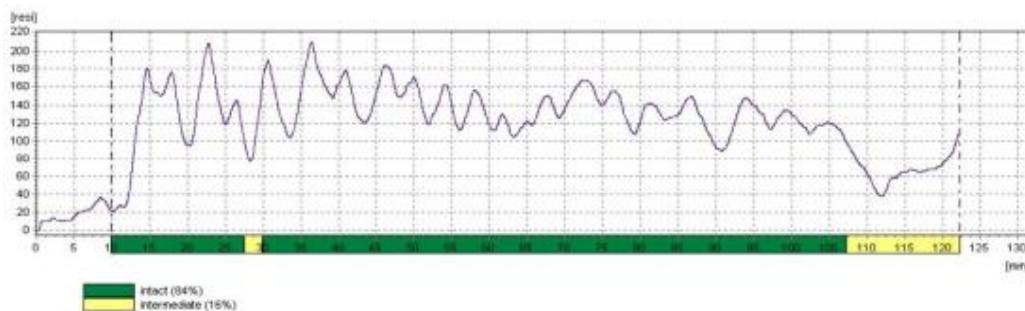


Figura 51 - Resultados gráficos obtidos do ensaio com o resistógrafo (Fonte: Dias, et al., 2013)

Este é dos métodos não destrutivos mais utilizados, pois as perfurações são praticamente imperceptíveis e sem influência qualquer sobre a resistência mecânica da peça. Os resultados são facilmente interpretados e deparam informação qualitativa de grande interesse pois fornecem um registo da variação da resistência à perfuração (Figura 51), permitindo identificar variações de densidade ao longo das secções dos elementos estruturais, zonas de degradação biológica, fendas, anéis de crescimento, fendas e vazios existentes nas peças, que não são perceptíveis por inspecção visual.

O tempo despendido com o tratamento de dados e no cálculo estatístico, assim como as limitações no fundamento do método que poderão induzir em erro, especialmente quando se pretende valores qualitativos, sendo assim uma das desvantagens do método.

É importante referir que o técnico deverá ter conhecimento das propriedades da madeira, de forma a ser capaz de interpretar os resultados correctamente (Figura 52), assim como identificar os anéis de crescimento, medições radiais e tangenciais, defeitos e zonas de lenho inicial e final (Dias, 2008).

Os valores retirados do Resistógrafo são relacionáveis com as suas propriedades mecânicas, tais como a densidade ou massa volúmica (ρ), o módulo de elasticidade na direcção do fio (E_0) e o módulo de ruptura na direcção do fio (f_m). Assim, de forma a ser possível extrair informação quantitativa da inspecção por este método, torna-se necessário estabelecer correlação numérica em função de cada espécie (Botelho, 2006).



Figura 52 - Resistógrafo, resultado de perfil de resistência à perfuração (Fonte: Andrade, 2013)

4.5.1.5 Pilodyn

O Pilodyn (Figura 53) é outro instrumento frequentemente utilizado na inspeção de estruturas de madeira, e permite conhecer alguns parâmetros físicos da madeira, tais como a massa volúmica, a partir de correlações com a dureza superficial e que consiste na introdução de um pino metálico que penetra na superfície da madeira por meio de impacto com energia conhecida (Feio, 2005).

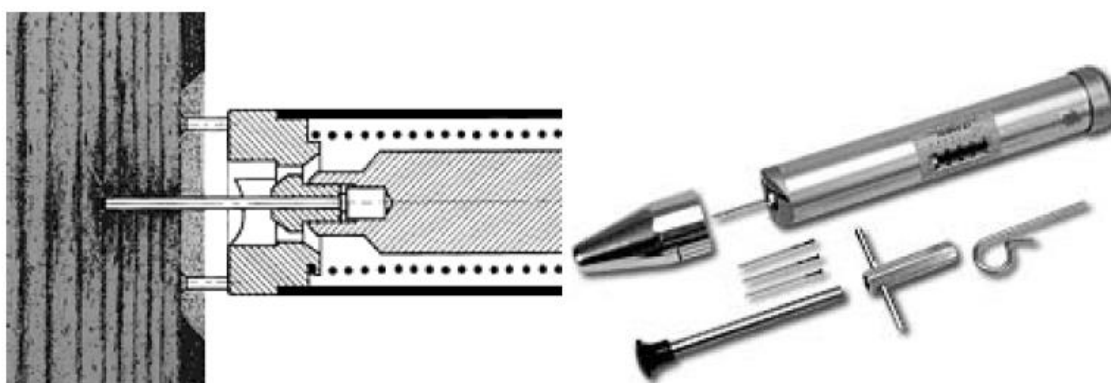


Figura 53 - Avaliação da integridade de viga de madeira com Pilodyn (Fonte: Magnus, 2008)

Este instrumento permite também a detecção de diferentes tipos de imperfeições, quando se associa a redução de resistência da madeira à profundidade de penetração da agulha.

Assim, é muito usado na obtenção prévia do aparecimento de doenças com o auxílio de medições periódicas e no estabelecimento de classes e categorias de resistência entre as várias espécies de madeira.

É importante ter em conta que a análise da madeira é realizada em pequenas profundidades e que as leituras permitem a deteção de bolsas de degradação no interior dos elementos de madeira (Cóias, 2006).

4.5.1.6 Videoscópio

O Videoscópio (Figura 54) é um instrumento que permite inspeccionar zonas de difícil acesso ou não visíveis directamente, e que possibilita a visualização da estrutura através de pequenos buracos, falhas ou aberturas.



Figura 54 - Avaliação da integridade de viga de madeira com Videoscópio (Fonte: Magnus, 2008)

4.5.1.7 Sismógrafos

Os sismógrafos (Figura 55) são aparelhos utilizados para avaliação de estruturas de edifícios antigos. São utilizados dois sismógrafos, que permitem o registo de acelerações em três direcções. Estas leituras são efectuadas em diferentes locais e a partir dos registos das acelerações de cada estação calcula-se as densidades espectrais de potência, fornecidas pelas frequências próprias de vibração do elemento estrutural em estudo (Dias, et al., 2013). Esta leitura das frequências próprias permite estimar a rigidez dos elementos estruturais, nomeadamente o seu módulo de elasticidade, o que permite fazer posteriormente uma avaliação do seu estado de conservação e da necessidade, se for o caso, de reabilitação ou reforço.

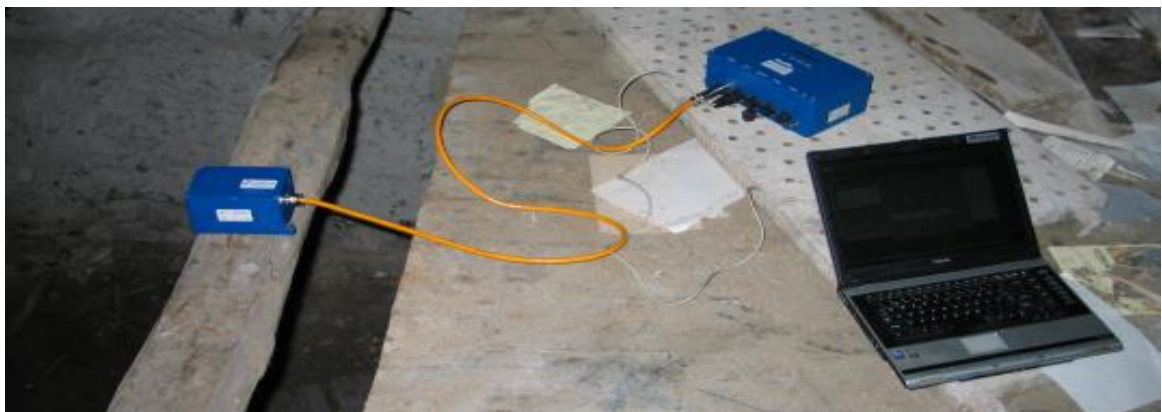


Figura 55 - Avaliação do pavimento de madeira com sismógrafo (Fonte: Dias, et al., 2013)

4.5.1.8 Ensaios de Carga

Os ensaios de carga (Figura 56) permitem de uma forma rigorosa, avaliar a deformabilidade de estruturas de madeira, sendo assim uma actividade muito corrente na inspecção de estruturas.

Com esta técnica é possível analisar o funcionamento e a capacidade de desempenho das estruturas dada uma determinada acção, já que simulam condições reais de carga, pois que, para realizar estes ensaios são utilizados recipientes com água, sacos de areia, ou cimento, de modo a simular as condições reais de carga (Dias, 2008).

Estes ensaios são normalmente realizados com cargas na ordem de 1,5 x a carga de serviço e consistem na aplicação de cargas crescentes e na medição contínua das deformações.



Figura 56 - Avaliação da integridade do pavimento de madeira com Ensaios de carga (Fonte: Dias, et al., 2013)

4.5.1.9 Georradar

O Georradar é uma técnica geofísica de alta resolução utilizada para a análise não destrutiva de meios materiais. Ainda que de funcionamento análogo, as suas potencialidades de inspecção são muito superiores aos métodos geofísicos clássicos, tais como os métodos sísmicos, magnéticos ou gravimétricos (Freitas, 2012).

O seu funcionamento baseia-se na análise da propagação de ondas electromagnéticas, na banda de frequências UHF-VHF (normalmente entre 100MHz e 1,5GHz), emitidas por impulsos de curta duração, sendo captadas por antenas. A propagação destas ondas é função da heterogeneidade do meio que atravessa, provocando fenómenos de reflexão, refacção e difracção. A antena receptora capta as diferenças de energia electromagnética, e assim pode-se caracterizar o meio atravessado, através das alterações das propriedades magnéticas dos materiais (Faria, 2006).

Resumindo, o Georradar é um método de inspecção de grande utilidade na área do património edificado, dada a sua natureza de método não destrutivo e a possibilidade de fornecer informação de grande

precisão e interesse como detecção de diferentes materiais, humidades e fendas em elementos como estruturas de madeira, alvenarias, pavimentos ou abóbadas (Freitas, 2012).

4.5.1.10 Dendocronologia

A dendocronologia consiste numa metodologia de inspecção a partir da qual se consegue apurar com grande precisão a idade de determinado elemento estrutural de madeira. O fundamento, do método consiste na análise dos anéis de crescimento da madeira, a partir dos quais e com base no estudo das características específicas da espécie em questão, é possível inferir o tempo de vida do elemento inspeccionado (Freitas, 2012).

A disposição dos anéis de crescimento pode ser observada na secção transversal da peça de madeira, o que não é, regra geral, possível em elementos de madeira de estruturas em serviço, pelo facto dos mesmos estarem ocultos nas alvenarias de suporte ou ligados topo a topo com outras peças de madeira. Desta forma, normalmente são retiradas pequenas carotes do elemento estrutural, no seu sentido transversal para análise dos anéis de crescimento.

Esta técnica tem bastante interesse na avaliação do valor e antiguidade do património histórico-artístico e pode, igualmente, fornecer informação qualitativa com grande utilidade na avaliação da capacidade resistente de elementos estruturais, nomeadamente na compreensão de fadiga e de fluência (Faria, 2006).

Por fim refira-se que a dendocronologia pode ser aplicada a espécies de formação lenhosa “uniforme”, ou seja, com a formação de anéis de crescimento definidos, como é o caso das madeiras resinosas e algumas espécies de folhosas (carvalho, entre outras) (Figura 57).

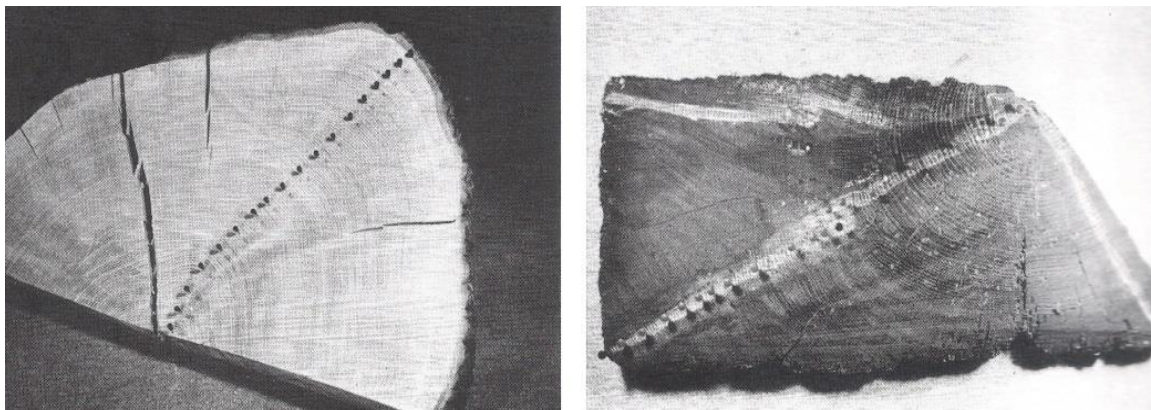


Figura 57 – Secções dendrocronológicas de carvalho; Direita, de estrutura do séc. XIII, com anéis de espessura extremamente variável, Courtesy Walter Horn, (Fonte: F.W.B. Charles, 2003))

4.5.1.11 Radiografia – Raios X e Raios γ

O raios X é uma tecnologia conhecida desde 1895, quando Roentgen formalmente anunciou a sua descoberta, mas o seu uso para inspecção de estruturas de madeira apenas se conhece a partir dos anos 60. Ainda assim, foi uma das primeiras técnicas a ser utilizada com este propósito.

O método baseia-se na transmissão de energia radiográfica através do material a inspeccionar, sob a forma de raios X, fornecendo uma imagem da sua constituição. Uma vez que a densidade do material condiciona a quantidade de radiação que o atravessa, o resultado consiste num esquema bidimensional da variação de densidade do elemento atravessado. Esta técnica tem sido bastante utilizada, pelo facto dos seus resultados permitirem identificar degradações, vazios e elementos diversos (ligadores, diferentes materiais, entre outros) sem perturbar o funcionamento da estrutura (Freitas, 2012).

No entanto, o seu elevado custo e possível perigosidade das radiações que emite, levou a que esta técnica fosse progressivamente abandonada, em detrimento da radiografia por raios γ (ou radiologia digital). Esta, por sua vez, tem diversas vantagens sobre a radiografia por raios X, quer pela menor perigosidade do tipo de radiações que utiliza, quer pelo menor custo, mas principalmente, por fornecer uma imagem do elemento em análise em tempo real, isto é, funcionando como uma câmara de filmar.

4.5.1.12 Outros factores que influenciam a resistência mecânica de madeira estrutural

Freitas, refere que, os “defeitos” das peças estruturais de madeira representam o principal factor que provoca a variação da sua capacidade resistente às acções mecânicas. Para além dos efeitos, os outros principais factores com influência importante na resistência dos elementos estruturais de madeira são (Freitas, 2012):

- A massa volúmica;
- O ângulo da direcção do esforço com o fio de madeira;
- O tempo de actuação das cargas (fluência);
- As dimensões das peças;
- A fadiga;
- A idade da madeira;

Apresentam-se, em seguida, um conjunto de indicações sobre a acção e a importância relativa de cada um desses factores.

MASSA VOLÚMICA

A massa volúmica é um dos factores mais importantes que pode servir de indicador de resistência de um elemento estrutural em madeira. Pode afirmar-se que para peças de resinosas, com defeitos equivalentes, existe uma proporcionalidade directa entre a resistência à flexão na direcção do fio (e em menor escala das restantes propriedades) e a massa volúmica da madeira das peças. Para madeiras da mesma espécie florestal, esta afirmação é totalmente aplicável (Freitas, 2012).

ÂNGULO DA DIRECÇÃO DO ESFORÇO COM O FIO DE MADEIRA

Dado que a madeira é um material anisotrópico, com um comportamento que pode ser aproximadamente definido como transversal isotrópico, a sua resistência diminui significativamente se a direcção da carga não é perpendicular à direcção do fio. Haverá que considerar sempre a redução de resistência para atuações de carga fazendo ângulo diferente de 90° com a direcção do fio (Freitas, 2012).

TEMPO DE ACTUAÇÃO DA CARGA (FLUÊNCIA)

A madeira está, em geral, sujeita a um processo de fluência quando submetida à acção de cargas elevadas. Pode afirmar-se que a velocidade de aumento da deformação é aproximadamente proporcional ao estado de tensão instalado, o que implica que a madeira se comporta melhor em situações em que está sujeita a estados de tensão baixos para cargas permanentes, aguentando bem aumentos localizados de tensões por períodos relativamente reduzidos de tempo.

Tendo em conta o referido, verifica-se que a influência da duração de carga na resistência e no aumento de deformação é maior nas peças de qualidade superior. Para eliminar o efeito do fator duração de carga nos ensaios, a norma EN 408 impõe que a rotura se processe no intervalo de 3 a 7 minutos, a contar do seu início (Freitas, 2012).

DIMENSÕES DAS PEÇAS

Em geral a resistência aumenta com a diminuição das dimensões das peças. Este efeito é considerado no Eurocódigo 5 para peças de muito pequenas dimensões.

FADIGA

O fenómeno de fadiga relaciona-se com a perda de resistência como resultado do efeito de variações alternadas e muito frequentes dos esforços a que uma peça está sujeita. É mais importante nos casos em que essa variação do esforço actuante implica alterações frequentes de estados de tensão de compressão para tração, como resultado por exemplo, da acção do vento e da vibração induzida por máquinas. A madeira tem um óptimo comportamento à fadiga, contrariamente ao que ocorre em materiais estruturais com estrutura quimicamente organizada (do tipo cristianismo) (Freitas, 2012).

IDADE DA MADEIRA

Estudos realizados nos últimos 50 anos indicam que, em princípio, a resistência da madeira não diminui de forma visível com a idade.

Alguns estudos chegaram à conclusão que, com a idade a madeira terá tendência a ficar com uma maior dureza superficial e resistência mecânica, mas a perder flexibilidade, tornando-se mais frágil. Sujeita a cargas permanentes, terá tendência a sofrer uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade.

Não existem no entanto estudos de investigação suficientes que permitam generalizar as afirmações acima indicadas a todas as espécies de madeira, sendo, por conseguinte prudente considerar uma ligeira perda de propriedades para madeiras antigas, o que será compensado pelo facto da madeira antiga ter, em geral, muito menos defeitos congénitos de formação. Os maiores problemas de resistência das madeiras antigas associar-se-ão sempre às fendas e à perda de material lenhoso resultante de ataques de fungos e de insectos xilófagos.

4.5.2 Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos, permitem uma caracterização mecânica dos elementos estruturais assim como perceber o estado de conservação dos mesmos. Entre estes destacam-se os ensaios laboratoriais em provetes pequenos isentos de defeitos e em provetes de tamanho real. Enquanto os ensaios pequenos isentos de defeitos, podem considerar-se de ensaios semi-destrutivos pois não implicam a utilização do elemento estrutural ensaiado por inteiro, os segundos implicam a destruição do elemento estrutural ensaiado.

Estes dois tipos de ensaios são descritos pelas seguintes normas:

- Os ensaios que utilizam provetes de pequena dimensão e isentos de defeitos, em Portugal, realizam-se segundo as normas (NP618, 1973) (NP619, 1973) ((NP620, 1973) (NP621) (NP622, 1973) (NP623, 1973)

- Os ensaios que utilizam provetes de tamanhos reais, contendo os defeitos naturais da madeira, podem ser executados segundo as normas europeias (EN338, 2003)

É muito diferente o comportamento mecânico da madeira quando se ensaiam provetes de pequena dimensão e isentos de defeitos e provetes de tamanho real e com defeitos, manifestando-se claramente no modo de rotura à flexão. É lógico que nem sempre é possível efetuar ensaios destrutivos, pois não permitem a preservação dos elementos estruturais.

4.5.2.1 Ensaios em provetes isentos de defeitos

A utilização de provetes de pequenas dimensões e isentos de defeitos foi muito frequente há 40 anos atrás e ainda continuam a ser adoptados estes ensaios nos dias de hoje para a obtenção das propriedades mecânicas da madeira. Os resultados obtidos nestes ensaios são afectados, normalmente, por correcções ou coeficientes de segurança, de forma a ter em conta o tamanho real da peça, existência de defeitos, entre outros. As normas em que se baseiam em Portugal são as seguintes:

- Ensaio de compressão axial (NP618, 1973)
- Ensaio de flexão estática (NP619, 1973)
- Ensaio de flexão dinâmica (NP620, 1973)
- Ensaio de tração transversal (NP621)
- Ensaio de fendimento (NP622, 1973)
- Ensaio de corte (NP623, 1973)

Apesar das normas portuguesas não referirem a aplicação aos resultados de factores correctivos, Alvarez, indica que sobre os valores obtidos se aplicavam alguns fatores corretivos, relacionados com o teor de humidade, duração da carga, dimensões da peça, qualidade da madeira e coeficientes de segurança (Alvarez, et al., 2000).

Alvarez, afirma que numa campanha experimental com o propósito de confirmar a validade como forma de prever o comportamento da madeira de tamanho real com defeitos, fazendo para isso um elevado número de amostras, estudou estes factores de correcção, chegando mesmo a ser conservativos e por isso a sua aplicação deveria ser tida em conta (Alvarez, et al., 2000).

Refere ainda, que o efeito da qualidade da madeira na resistência, em provetes livres de defeitos, é avaliado segundo factores que diminuem a resistência obtida em função da qualidade correspondente. Afirma que o facto de se considerar a mesma correcção para todas as espécies é errado, na medida em que o que acontece na realidade é diferente (Alvarez, et al., 2000)

Na realidade, segundo o mesmo autor, as espécies com nós pequenos e em grande quantidade comportam-se bastante melhor do que as espécies com nós grandes e em pequena quantidade. Sendo assim, o método de classificação é errado, uma vez que considera que o efeito dos nós é independente da espécie, ou seja, o efeito da frequência dos nós, que tem influência na resistência, é ignorada. Este autor refere inclusivamente, que a existência de ensaios com provetes de madeira de dimensões comerciais, levaram a concluir que “os sistemas de classificação baseados na redução da resistência da madeira livre de defeitos não correspondem exactamente à realidade”.

4.5.2.2 Ensaios em provetes de tamanho real

A madeira usada nos ensaios de tamanho real apresenta defeitos e variabilidade de qualidade. As normas para determinação das propriedades mecânicas de peças de madeira nestas condições são:

- EN408, 2003, Norma específica para o método de ensaio da determinação das propriedades mecânicas de peças estruturais de madeira maciça ou lamelada colada: módulo de elasticidade em flexão, módulo de distorção, resistência à flexão, módulo de elasticidade em tração paralela ao fio, resistência à tração paralela ao fio, módulo de elasticidade em tração perpendicular ao fio, resistência à tração perpendicular ao fio, módulo de elasticidade e, compressão perpendicular ao fio, resistência à compressão perpendicular ao fio e resistência ao corte, assim como descreve, também a determinação do teor em água e massa volúmica dos elementos de ensaio.
- EN384, 2004, Esta norma delibera o procedimento para a determinação dos valores característicos das propriedades mecânicas, assim como para a densidade e compreende relações que permitem depreender os valores característicos das propriedades mecânicas a partir de valores característicos da resistência à flexão.

Botelho, refere que o ensaio de peças com defeitos proporciona informações acerca do comportamento das estruturas de madeira, e por isso é fundamental perceber e analisar os vários aspectos relativos à qualidade das peças ensaiadas (Botelho, 2006).

4.5.2.3 Comparação entre ensaios com provetes isentos de defeitos e provetes de tamanho real

Em suma, pode concluir-se que a avaliação da resistência da madeira a partir de provetes pequenos e isentos de defeitos pode chegar a resultados muito próximos da realidade das peças com dimensões reais. Assim, a tendência será fazer ensaios de peças com as dimensões o mais parecidas com a realidade de modo a aferir as propriedades mecânicas o mais próximo da realidade.

Considera-se importante, para intervenções de reabilitação, ponderar a necessidade e interesse de fazer provetes isentos de defeitos, caso a estrutura permita a tal recolha (ensaios destrutivos), pois a avaliação resultante dessa recolha pode não ser qualitativa em comparação com outros métodos não destrutivos, inviabilizam a reabilitação da estrutura em causa.

4.5.2.4 Utilização dos resultados dos ensaios in situ e laboratoriais

Os parâmetros de dimensionamento dos elementos estruturais de madeira podem ser quantificados, através de ensaios não destrutivos, semi-destrutivos e destrutivos, sendo os resultados de grande importância e utilidade no fornecimento de dados para o dimensionamento ou verificação de segurança estrutural. Estes têm vantagens e inconvenientes, como se expõe de seguida:

- Os **ensaios não destrutivos**, através da utilização de várias técnicas, possibilitam obter o conhecimento de algumas características físicas e mecânicas da madeira, sendo o método mais apropriado para a quantificação destas características já que é rápido, prático e não destrutivo. Porém, apresenta como inconveniente a relativa falta de rigor ou mesmo a impossibilidade de obtenção de resultados quantitativos de características mecânicas;
- Os **ensaios semi-destrutivos**, são materializados através de ensaios em provetes pequenos e isentos de defeitos e permitem a aquisição de informação relativa às características mecânicas da madeira, sem no entanto inutilizarem as peças ensaiadas;
- Os **ensaios destrutivos**, são os realizados em laboratório em provetes à escala real, e transmitem informação rigorosa relativa às características mecânicas e físicas do material, mas provocam a destruição dos elementos, não podendo por isso ser, naturalmente, aplicados em todas as situações.

A opção mais natural em estruturas antigas de madeira será a utilização de ensaios não destrutivos.

Todavia, a maioria destes ensaios não caracteriza com a exactidão as propriedades mecânicas do material e por isso precisam de ser mais desenvolvidos, pois apontam apenas as suas propriedades físicas (massa volúmica, humidade, e geometria).

Machado, refere que outra limitação importante relativa a estes ensaios relaciona-se com a sua calibração, já que é necessário atender ao teor em água, à espécie de madeira, à massa volúmica, e à direcção da realização do ensaio (longitudinal, tangencial, radial) para interpretar os resultados obtidos (Machado, et al., 2000).

É importante referir ainda um eventual desleixo da sua utilização directa na avaliação da resistência à flexão das vigas, pois este não tem em conta a presença de defeitos localizados, que normalmente têm uma grande influência no valor da tensão de rotura à flexão.

Para contornar o facto de não existir nenhum ensaio não destrutivo que permita prever separadamente e com rigor as características resistentes da madeira, Dias, sugere a combinação dos dados obtidos através de várias técnicas não destrutivas, assim como o desenvolvimento de novas técnicas, tais como o Raio-X e a termografia (Dias, 2008).

Os ensaios não destrutivos podem ser um bom complemento, apesar de todos os inconvenientes na sua utilização, pois permitem alcançar um nível de confiança aceitável na análise de estruturas de madeira, particularmente tendo em conta que, devido à grande variação das características da madeira, mesmo entre elementos da mesma espécie, seria necessário um grande número de ensaios laboratoriais para caracterizar as propriedades de uma estrutura com alguma fiabilidade, Botelho, afirma que, mesmo para algumas espécies de madeira é possível obter valores numéricos, com alguma segurança, das principais propriedades mecânicas (f_m e E_o), desde que se realize um número alargado de ensaios não destrutivos e sejam utilizadas expressões conservadoras definidas por diferentes autores (Botelho, 2006).

4.6 DIAGNÓSTICO

4.6.1 Introdução

O diagnóstico é a fase da reabilitação de uma estrutura, que permite avaliar os sistemas estruturais, materiais, e interpretar as suas causas de modo a aferir a necessidade efectiva e a dimensão das medidas de intervenção.

A avaliação estrutural deve acompanhar a fase de diagnóstico, sendo duas fases consecutivas e relacionadas. Paupério, afirma que só a partir do conhecimento real do estado da estrutura e da sua avaliação estrutural será possível concluir de forma sustentada acerca da possibilidade de manutenção da estrutura, contemplando mais ou menos acções de reparação/reforço (Paupério, et al., 2001).

O diagnóstico é sempre uma fase difícil, dado que os dados disponíveis se referem aos efeitos, causa ou várias causas simultâneas que têm de ser determinadas. Assim, a intuição e a experiência são componentes essenciais no processo de diagnóstico.

Um diagnóstico correto é indispensável para uma avaliação apropriada da segurança e para um juízo racional sobre as medidas de tratamento a adoptar (Cóias, 2006). Appleton, acrescenta que, o diagnóstico deve requerer o exercício permanente da experiência dos técnicos que olhando, saibam “ler” o edifício, entendê-lo na sua complexidade, orientado e disciplinando desse modo o recurso às técnicas de inspecção. Combinar a observação e a reflexão com a realização de sondagens, inspecções e ensaios e com a interpretação dos respectivos resultados, é, então a tarefa mais difícil que cabe aos técnicos.

O autor concluiu ainda, que o diagnóstico deve ser alcançado a partir de uma combinação de esforços que resultam da aplicação do saber resultante da experiência do observador com a informação que deriva da utilização dos abundantes e sofisticados meios complementares de inspecção actualmente disponíveis (Appleton, 2003).

Devido à complexidade e combinação de vários factores distintos de análise, Freitas, defende que o diagnóstico deve ser realizado com cuidado, mediante um levantamento arquitectónico e estrutural e que inclua reconhecimento visual, por uma equipa multidisciplinar com experiência e qualificação no domínio da patologia e reabilitação de edifícios que permita avaliar com rigor o estado da estrutura.

Esta abordagem inicial permite começar a fazer o primeiro juízo sobre o estado de conservação das estruturas em geral e daí partir para uma avaliação mais detalhada dos diversos elementos estruturais em madeira presentes no edifício (Freitas, 2012).

4.6.2 Avaliação da Segurança e Modelos Estruturais adequados

Após a conclusão da fase de diagnóstico, segue-se a avaliação da segurança. Enquanto no diagnóstico o objectivo consiste em identificar as causas de degradação, na avaliação da segurança pretende-se verificar se os níveis de segurança são aceitáveis ou não, recorrendo a uma análise do estado actual da estrutura e dos materiais. É nesta fase que são tomadas decisões sobre a necessidade de medidas de intervenção estrutural (ICOMOS, 2004).

A avaliação de segurança é uma tarefa difícil dado que os métodos de análise estrutural utilizados para construções novas podem não ser aplicáveis directamente a estruturas antigas, podendo originar decisões inadequadas. A complexidade de uma construção antiga ou monumento, acaba por justificar a dificuldade em entender correctamente o funcionamento estrutural (ICOMOS, 2004).

Desse modo, e além de uma abordagem com modelos numéricos, deve-se optar por abordagens baseadas na recolha de informação, conforme descrito em 4.4.3.

Estes modelos numéricos devem, segundo Costa, descrever a estrutura e os fenómenos associados adequadamente, possibilitando uma correcta verificação estrutural das estruturas de madeira. Este modelo de cálculo permite uma previsão do comportamento das estruturas de madeira da fase linear até à rotura, sendo muito importante para compreender o seu comportamento estrutural (Costa, 2005).

Estes modelos estruturais, quando devidamente calibrados, segundo, Dias, permitem a comparação de danos teóricos produzidos por diferentes acções com os danos efectivamente observados na estrutura (Dias, 2008). Todavia, e de acordo com o que já foi referido anteriormente, a atribuição de um modelo

estrutural para construções novas, é pouco fiável e de difícil aplicação quando aplicado a estruturas antigas, podendo levar a resultados e decisões inadequadas. É então necessário materializar estes modelos através de novos modelos numéricos, que devem descrever a estrutura e os fenómenos associados adequadamente, possibilitando uma correta verificação estrutural.

Ainda o mesmo autor refere que a calibração dos modelos numéricos, objecto importante para uma reprodução adequada e fiável do comportamento da estrutura, pode ser realizada através do conhecimento das características físicas e mecânicas do material, obtidas através de ensaios realizados e por comparação entre frequências de vibração numéricas e experimentais, permitindo obter o módulo de elasticidade da madeira (Dias, 2008).

4.6.3 Avaliação da possibilidade de intervenção

Após a avaliação do estado de conservação do edifício e a análise da segurança de acordo com a legislação aplicável, essencialmente a verificação do Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Utilização (ELS) da estrutura, estabelecendo-se o cruzamento dos diversos dados e reúnem-se as condições, a tomada de decisão sobre a intervenção mais adequada.

Esta deliberação deve ser tomada ponderando a situação existente na estrutura e o que se pretende obter dela no futuro, ou seja, qual a função e a que cargas estará sujeita.

É também necessário ter em conta as recomendações do ICOMOS, no que diz respeito à manutenção do valor e autenticidade do património arquitectónico perante a opção de reabilitação/reforço, afirmando que:

«A escolha entre técnicas “tradicionais” e “inovadoras” deve ser decidida caso a caso, com preferência pelas técnicas que são menos invasivas e mais compatíveis com o valor patrimonial».

Freitas, corrobora, também, algumas recomendações que devem ser seguidas, no que se refere a materiais e soluções modernas, deve-se respeitar o passado, preservando tanto quanto possível os materiais existentes. Este afirma que se deve deixar boas indicações físicas da intervenção (por exemplo, parafusos de aço inoxidável à vista), não usar soluções inovadoras caso estas não estejam devidamente estudadas (Freitas, 2012).

4.7 METODOLOGIA DE INTERVENÇÃO

4.7.1 Introdução

A intervenção estrutural tem por objectivo a garantia da estabilidade das estruturas, salvaguardando-as. Quando essa intervenção envolve acções de reabilitação sobre o edificado antigo, deve ser orientada no sentido da manutenção dos esquemas estruturais e dos materiais existentes (Freitas, 2012).

Neste capítulo apresentar-se-á um resumo das principais técnicas de intervenção estrutural de elementos de madeira em edifícios antigos, a aplicar de acordo com a especificidade dos danos estruturais específicos.

Estes danos e, por conseguinte as técnicas de reabilitação associadas, serão divididos em dois grupos principais: locais e globais. Entende-se por *danos locais* aqueles que ocorrem ao nível dos elementos estruturais, quer nos apoios, quer ao longo do seu comprimento. Os *danos globais* são os que envolvem a totalidade dos pavimentos ou coberturas (Dias, 2008).

Todavia, existem outras soluções de intervenção não apresentadas, mostrando-se apenas as mais utilizadas dada a sua simplicidade bem como a sua economia.

Desta feita, tenta-se com este sub-capítulo propor soluções exequíveis e praticadas no mercado de trabalho. Após a definição do tipo e da profundidade da intervenção, há que actuar de uma forma adequada de acordo com as necessidades, salvaguardando sempre, a autenticidade original.

4.7.2 Recomendação Específicas para as Estruturas de madeira

As estruturas de madeira têm especificidades próprias que justificam a consideração de um sub-grupo autónomo em termos de reabilitação. Estas especificidades resultam essencialmente do facto de a matéria-prima de que são feitas ser de origem vegetal o que lhes confere um processo de degradação muito diferente do previsto para estruturas executadas com base em materiais de origem mineral (Freitas, 2012).

Apresenta-se em seguida um conjunto de regras que se deve aplicar em estruturas de madeira existentes:

- Verificar sempre previamente os outros sistemas estruturais (fundações, paredes, tirantes em aço) em termos de estabilidade e nível de degradação;
- Evitar desmontar os elementos estruturais em madeira: a futura montagem irá colocar esses elementos em diferentes estados de tensão, como resultado das novas ligações;
- Usar soluções robustas: usar coeficientes de segurança mais elevados que o corrente;

- Fazer inspecções periódicas às estruturas (controlar: temperatura, humidade, deformações e defeitos dos elementos estruturais);
- Melhorar as condições de serviço das peças de madeira (proceder a limpezas periódicas, evitar o contacto directo com o aço ou vidro se potenciar condensações, melhorar a ventilação geral dos espaços);
- Sempre que possível deixar após a intervenção estrutural, a possibilidade de todas as estruturas serem examinadas do ponto de vista físico ou visual nas próximas intervenções;
- Assegurar a ventilação adequada dos apoios evitando nesses locais, tanto quanto possível, o contacto directo com outros materiais que possam reter humidade ou impedir que a madeira “respire”;
- Evitar esconder os elementos estruturais de madeira com materiais de acabamento (tectos falsos, forros) para que a degradação seja detectável.

O que fazer em termos de autenticidade original?

No contexto de uma intervenção de restauro de estruturas em madeira põe-se o problema de decidir o que fazer no que diz respeito à hipótese de manter ou não a autenticidade original das soluções.

«Qualquer intervenção deve, até onde for possível, respeitar a concepção e as técnicas de construção originais, bem como o valor histórico da estrutura e evidência histórica que representa» (ICOMOS, 2004).

Como princípio geral, deverá tentar seguir-se a ideia de manter tanto quanto possível a estrutura no estado em que se apresenta, no momento de intervenção, em que o restauro deverá cingir-se à substituição das peças irrecuperáveis colocadas de novo de acordo com as técnicas antigas de montagem mas usando ligadores modernos, respeitando os materiais e técnicas antigas (em estruturas pouco danificadas) (Freitas, 2012). Algumas regras gerais que devem ser seguidas:

- Respeitar o passado, quando forem usados materiais e soluções modernas preservando sempre que possível os materiais existentes;
- Deixar boas indicações físicas da intervenção (por exemplo parafusos de aço inoxidável e o seu contexto);
- Não intervir de uma forma moderna em termos arquitectónicos tentando deixar uma marca profunda da intervenção, sendo a melhor solução aquela que introduzir o mínimo de alterações à solução encontrada em cada momento de reabilitação.

Como incluir instalações e serviços modernos?

Um dos problemas que se põe na reabilitação tem a ver com a necessidade de melhorar a funcionalidade e qualidade arquitectónica dos espaços reabilitados. Nestas situações põe-se o problema de modificar ou aumentar o nível de esforço das estruturas existentes (Freitas, 2012). Neste sentido, a solução a adoptar deverá seguir as seguintes regras fundamentais:

- Se necessário, introduzir uma segunda estrutura, sem nunca usar a capacidade residual das estruturas antigas em madeira;
- Projectar um “edifício novo” junto do “edifício antigo” .

Acção para aumentar a durabilidade das intervenções?

No momento de qualquer acção de reabilitação, coloca-se o problema de decidir o seu âmbito e programa a nível de custos associados. É fundamental intervir para que os eventuais problemas (causas de degradação) existentes sejam resolvidos, nomeadamente:

- Introduzir boas soluções de recolha de águas pluviais;
- Drenagem interior e exterior dos piso térreo;
- Impermeabilização da envolvente exterior (fachadas, emendas e coberturas).

4.7.3 Técnicas de Intervenção Estrutural mais Comuns

Num caso concreto de reabilitação de uma estrutura de madeira, podem ocorrer quatro situações específicas:

1. Reparação e substituição pontual de elementos degradados usando técnicas antigas;
2. Reparação e substituição pontual de elementos degradados usando técnicas antigas e materiais de ligação modernos;
3. Reparação e substituição de elementos da estrutura usando madeiras antigas e materiais e técnicas de reforço/ligação modernas ao longo do comprimento dos elementos de madeira;
4. Substituição integral por uma nova estrutura moderna

A solução ideal será normalmente a que corresponde às duas primeiras situações, porém, admite-se que a segunda solução assegura um desempenho melhorado (Freitas, 2012). Os materiais utilizados não devem limitar a durabilidade da estrutura, mas sim, apresentar um comportamento melhorado face aos existentes.

Deverá ser realçado que, para qualquer tipo de problema estrutural, existem sempre inúmeras técnicas de intervenção. A escolha da técnica mais adequada deverá ser feita tendo em conta variados factores, tais como os objectivos da intervenção, os custos, o grau de degradação e as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

4.7.3.1 Reparação e substituição pontual usando técnicas antigas

É a situação mais corrente e tradicional. Pressupõe que os diversos elementos em madeira se encontrem em boas condições (em geral), permitindo que a estrutura se mantenha no local e com a forma anterior à intervenção.

As ligações entre peças parcialmente substituídas serão feitas por samblagem e por ligadores do tipo cavilha, normalmente pregos, (Figura 58).

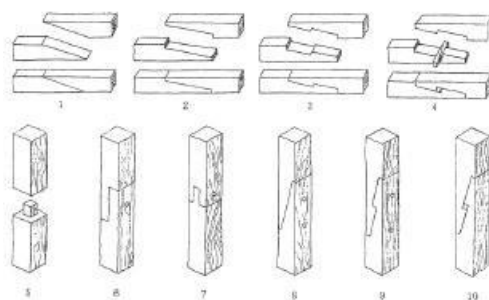


Figura 58 - Próteses de topo com elementos de madeira (Fonte: Freitas, 2012)

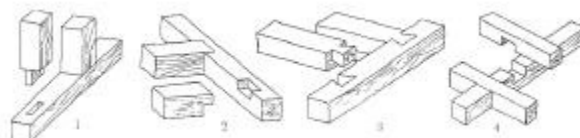


Figura 59 - Ligações por samblagem em elementos de madeira (Fonte: Freitas, 2012)

As peças integralmente removidas são substituídas por peças de dimensões análogas, ligadas às peças antigas por pregos. Devem usar-se madeiras antigas estabilizadas em termos de secagem e equilíbrio dimensional para as condições termo-higrométricas correntes (Freitas, 2012).

É necessário, por vezes, calçar as peças antigas de modo a obter estruturas geometricamente correctas, sendo muitas vezes utilizadas madeiras de fraca qualidade, o que é um erro grave. As madeiras usadas em calços, tacos e em outras condições adversas devem ser de muito boa qualidade em termos de dureza e durabilidade natural.

Os erros mais graves cometidos no passado com estruturas de madeira dizem respeito à deficiente ventilação da estrutura, sobretudo na zona dos frechais, o que implica a degradação biológica que se transmite também rapidamente aos apoios das peças.

4.7.3.2 Reparação e substituição pontual usando ligadores modernos

É uma situação em tudo análoga à anteriormente descrita, porém esta procura resolver os problemas das ligações recorrendo a métodos e técnicas modernas. Neste sentido, nos dias correntes, não faz sentido usar pregos galvanizados em que a corrosão é elevada quando comparativamente com parafusos de aço inoxidável que são muito mais duráveis e igualmente resistentes, e que para além disso, permitem a reversibilidade das montagens por desaparafusamento. É importante salientar que o aço inoxidável é geralmente mais fraco não sendo adequado para estruturas muito flexíveis pois pode, por corte, partir quando sujeito a movimentos.

As zonas de apoio apresentam frequentemente patologias. A possibilidade de ocorrerem elevados níveis de humidade e respectivos ataques biológicos é alta, levando à perda de secção do elemento de madeira, existindo a possibilidade de apresentarem défice estrutural por corte ou deficiente apoio dos elementos. Na existência de degradações nas zonas de apoio, é essencial intervir, sendo estas zonas fundamentais para o funcionamento da estrutura do pavimento, bem como para o funcionamento global do edifício.

Segundo Appleton, a existência de problemas de ligação entre pavimentos e as paredes resistentes é duplamente negativa, no que se refere a segurança dos edifícios, tanto para as acções verticais como para as horizontais devido ao défice de travamento no sentido perpendicular às fachadas e frontais. No que diz respeito às próteses de apoio, a solução a adoptar será influenciada pela dimensão dos ataques, em que se não houver limitações estéticas importantes, será em geral mais económica a utilização de próteses metálicas em situações de degradação exclusiva de apoios e de ligações de topo em peças à tracção (Appleton, 2003).

Todas estas operações implicam a remoção de telhas, ripas, forros e guarda-pós em coberturas e de tectos falsos e revestimentos em pavimentos de modo a colocar a estrutura à vista tanto pela parte superior como pela parte inferior.

Apresenta-se seguidamente algumas propostas/ soluções – tipo de intervenção estrutural.

4.7.3.2.1 Introdução de Frechal de Madeira Assente em Cachorros de Pedra

A solução de colocação de um frechal de madeira sobre cachorros de pedra previamente introduzidos na parede, (Figura 60) é, nos dias de hoje, pouco utilizada em intervenções de reabilitação. Este

tipo de solução era muito utilizado ainda em coberturas, e nesses casos as vigas degradadas (linhas das asnas) apoiavam directamente nos cachorros de pedra.



Figura 60 - Fixação de elementos às paredes para apoio do vigeamento – Frechal de madeira assente em cachorros de pedra fixados à parede (fonte: Dias, et al., 2013)

Para a realização deste método, usualmente, é necessário abrir cavidades nas paredes resistentes e, por isso mesmo, não deve ser aplicado em paredes dos edifícios antigos de pouca espessura. No entanto, a introdução de cargas com excentricidade nas paredes poderá provocar graves esforços de flexão, que resultam em roturas inesperadas.

Assim, para uma boa concretização deste método, deverão contemplar-se medidas de segurança, tais como: ter em atenção as paredes meias e a possibilidade de abrir rasgos naquelas, realizar apenas em paredes de boa qualidade; executar bem as ligações cachorro/parede, frechal/cachorro e proteger o frechal contra agentes bióticos.

4.7.3.2.2 Utilização de Cantoneiras Metálicas

Este método consiste na utilização de uma cantoneira metálica como reforço dos apoios do pavimento de madeira. A cantoneira é chumbada à parede com recurso a parafusos, assentando naquela as vigas de madeira (Figura 61).

É uma solução pouco intrusiva, em que a carga transmitida à parede é excêntrica, levando à transmissão de esforços de flexão de forma distribuída, e, se a parede for resistente, este esforço pouco elevado não trará problemas (Dias, 2008).

Pode ainda apresentar o inconveniente de ficar à vista, o que faz com que não possa ser aplicada em todas as situações. Por sua vez, o apoio e a ligação entre a viga e a cantoneira é muito importante, particularmente se estas forem de secção circular, sendo nesses caso necessário introduzir elementos adicionais (metálicos ou de madeira) para fazer a fixação das vigas.



Figura 61 - Fixação de elementos às paredes para apoio do vigamento – cantoneira metálica (Fonte: Freitas, 2012)

4.7.3.2.3 Utilização de Novas Peças de Madeira agrupadas às antigas

Esta solução contempla o agrupamento de novos elementos de madeira em boas condições, ligados às antigas através de pernos, parafusos, pregos, chapas ou cintas metálicas (Fig. 62).

A eficácia desta solução é definida através da relação entre a capacidade de carga da peça reparada e a da peça original. A grande vantagem deste método é a possibilidade de permanecerem os elementos originais, não existindo eventualmente a necessidade de serem efectuados escoramentos.

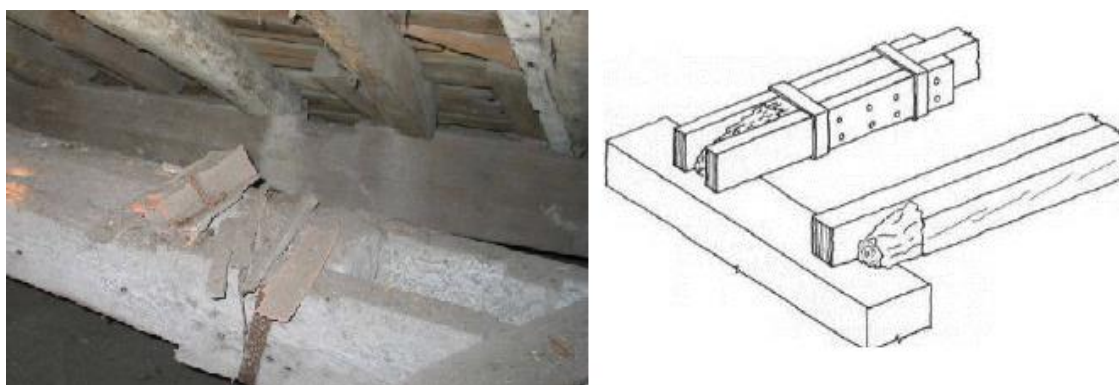


Figura 62 - Fixação de novas peças de madeira aos elementos degradados (fonte: Dias, et al., 2013)

Esta técnica é vulgarmente utilizada em elementos partidos, fissurados ou enfraquecidos, de forma a restabelecer uma capacidade resistente satisfatória. Deverão ser usadas madeiras e tratamentos preservadores avançados, dado que os novos elementos estarão em contacto directo com os elementos degradados (Appleton, 2003).

4.7.3.2.4 Utilização de peças de metal agrupadas às antigas de madeira

Esta técnica é semelhante à anterior, variando o material da nova viga agrupada. A introdução destes elementos metálicos requer uma ligação mais cuidada à parede, sendo necessário garantir um

sistema de fixação que degrade as cargas ao longo da alvenaria. A grande vantagem deste método, analogamente à técnica anterior, é a possibilidade de permanecerem os elementos originais, não existindo eventualmente a necessidade de serem efectuados escoramentos. Esta técnica é vulgarmente utilizada em elementos partidos, fissurados ou enfraquecidos, de forma a restabelecer uma capacidade resistente satisfatória.



Figura 63 - Utilização de peças metálicas agrupadas às vigas de madeira existentes num edifício na Praça do Príncipe Real 1-Lisboa (Fonte: Andrade, M., 2103)

4.7.3.2.5 Utilização de Empalmes

A utilização desta técnica justifica-se quando os elementos estruturais se encontram partidos ou fissurados em zonas junto ao apoio. São aplicados nestas zonas novos elementos de madeira, fazendo a ligação entre eles por meio de parafusos e porcas, (Figuras 64 e 65).

Por norma, os elementos novos a utilizar têm altura igual à dos elementos já existentes, e um comprimento que assegura a sua ligação a zonas não degradadas dos elementos antigos.

Estas ligações também podem ser efectuadas através de colas ou resinas epoxídicas, devendo os empalmes serem entalhados para que se proporcione uma maior aderência entre as duas peças (Costa, 2005).

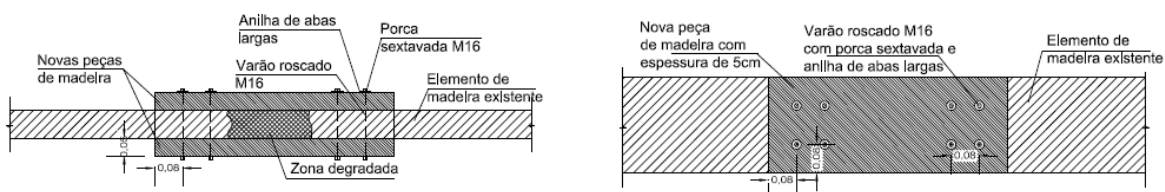


Figura 64 - Exemplo de uma ligação tipo empalme – Pormenor de projecto (fonte: Dias, et al., 2013)



Figura 65 - Exemplo de uma ligação tipo empalme (fonte: Dias, et al., 2013)

4.7.3.2.6 Fixação de Chapas e Perfis Metálicos

Esta solução preconiza a fixação de elementos metálicos às peças de madeira através de pernos ou parafusos de porca à parte sã da madeira, evitando assim a remoção de material degradado num comprimento de cerca de 50 a 80cm (Figura 66).



Figura 66 - Exemplo de uma ligação com fixação de chapas metálicas do convento Corpus Christi, Gaia, 2008 (fonte: Dias, et al., 2013)

Segundo Appleton, a utilização destas peças metálicas de reforço dos elementos de madeira origina uma viga mista com capacidades superiores à situação previamente existente.

No entanto, ao longo do tempo, esta solução perde grande capacidade resistente e pode sofrer elevadas deformações (Appleton, 2003).

Existem soluções no mercado com ligadores metálicos para a construção em madeira, como cachorros de 2 elementos (direito ou esquerdo), (Figura 67).

A aplicação de pregos na base de ambos elementos é indispensável à garantia de uma boa montagem. Esta solução preconiza a fixação de elementos metálicos às peças de madeira através de pernos ou parafusos de porca à parte sã da madeira (Negrão, et al., 2009).

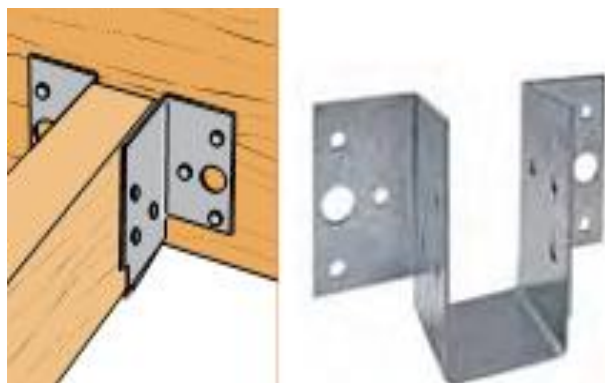


Figura 67 - Chapa metálica para reforço (fonte: Negrão, et al., 2009)

Esta solução, com a utilização de peças metálicas de reforço dos elementos de madeira origina uma viga mista com capacidade resistente bem superior à situação original sem reforço.

4.7.3.2.7 Introdução de Elementos Metálicos no Interior de Secções

Este método consiste na remoção da parte degradada da madeira da viga, sendo executado um corte na parte não afectada, sendo posteriormente introduzidos elementos metálicos de reforço.

É comum serem usadas chapas metálicas que, por sua vez, serão tapadas com novos elementos de madeira, tendo sempre que garantir um comprimento de ancoragem satisfatório.

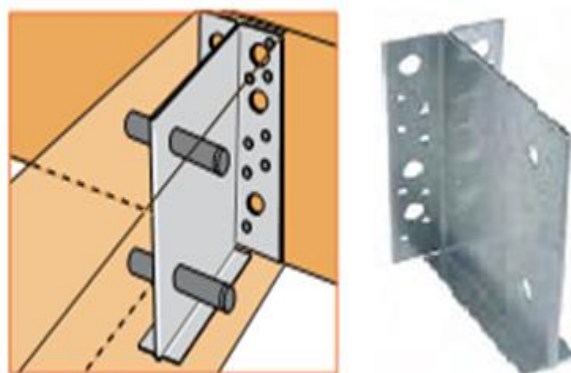


Figura 68 - Elemento metálico inserido na peça de madeira como reforço (fonte: Negrão, et al., 2009)

Esta solução exige a remoção da madeira degradada e a execução de um corte na parte sã da madeira, onde vão ser introduzidos os elementos metálicos de reforço, normalmente chapas (Figura 68).

Finalmente procede-se à aplicação de elementos de madeira a tapar os elementos metálicos, conferindo-lhes uma protecção ao fogo.

Nesta solução assume-se que os elementos metálicos passam a resistir a todas as solicitações aplicadas, sendo por isso importante garantir um comprimento mínimo de ancoragem na parte sã da madeira (Duarte; 2004).

4.7.3.2.8 Reforço de Apoios Comuns em Pavimentos Contínuos Bi-apoiados

No caso em as vigas dos pavimentos partilhem com outras o mesmo apoio estrutural, concorrendo as mesmas de topo, devem ser reforçadas essas ligações de forma a permitir uma maior rigidificação do nó, utilizando para o efeito elementos metálicos fixados às vigas, (Figura 69).

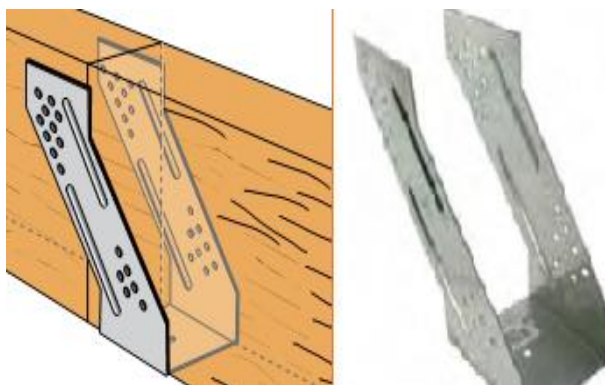


Figura 69 - Reforço de ligação entre duas vigas com reforço (fonte: Negrão, et al., 2009)

4.7.3.3 Substituição integral da estrutura usando madeiras antigas e materiais e técnicas de reforço/ligação modernas ao longo do comprimento dos elementos de madeira

Em alguns casos, por questões arquitectónicas ou construtivas, não é possível realizar o trabalho de restauro sem desmontar a estrutura. Nesses casos, desmontam-se cuidadosamente as peças e colocam-se de novo no local seguindo técnicas de ligação modernas recorrendo a madeiras usadas de igual espécie, qualidade e com idade semelhante.

Peças degradadas nos extremos podem ser aproveitadas para realizar outros elementos de menores dimensões. Deve-se salientar que uma peça estrutural de madeira antiga de uma espécie durável é um material estrutural de um elevado valor, devendo ser sempre cuidadosamente recolhido e guardado para futuras utilizações (Freitas, 2012).

A geometria de uma estrutura não é necessariamente coincidente com a estrutura original, devendo na medida do possível, seguir-se a traça original de modo a poder manter a memória do edifício.

4.7.3.3.1 Utilização de Chapas ao longo dos elementos de madeira

Quando os elementos de madeira apresentam fendas é recorrente o uso de chapas metálicas, tendo como principal objectivo reduzir e evitar a propagação das patologias ao resto do elemento.

As chapas são colocadas paralelamente ao plano das fendas nas duas partes opostas do elemento a reforçar, e ligadas entre si através de parafusos de porca, podendo o aperto destes ser ajustado ao longo do tempo (Figura 70). Esta é uma solução que permite uma maior continuidade do elemento e, ao mesmo tempo, um aumento da sua rigidez.

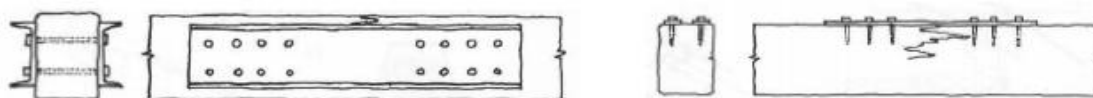


Figura 70 - Reforço com chapa (fonte: Dias, et al., 2013)

Através da introdução de perfis ou de chapas metálicas, que se unem à madeira mediante elementos de fixação mecânicos, como parafusos, consegue-se recuperar uma parte da continuidade da viga (Figura 71).



Figura 71 - Reforço com chapa (fonte: Dias, et al., 2013)

As peças metálicas, devido à sua maior rigidez, podem originar uma viga mista com bom comportamento estrutural.

Appleton, refere que se deve atender à relação entre os módulos de elasticidade do aço e da madeira de forma a homogeneizar a secção composta, sendo possível escolher, em função disso, a altura e a espessura das chapas e perfis (Appleton, 2003).

4.7.3.3.2 Utilização de cintas metálicas

Esta solução é semelhante à anteriormente apresentada, embora a utilização de cintas metálicas (Figura 72), ao contrário das chapas, não permita reajustes ao longo do tempo nos apertos, levando à ineficácia da solução em algumas situações devido às variações volumétricas da madeira.

Assim, segundo Appleton, esta é uma técnica pouco utilizada na reabilitação/reforço de pavimentos. Apesar disso, poderão ser usadas cintas, com sistema de aperto nas suas extremidades através de parafusos de porca, em alguns casos (Appleton, 2003).



Figura 72 - Reforço com cintas metálicas de reforço ao longo de um elemento de madeira (fonte: Dias, et al., 2013)

4.7.3.3.3 Utilização de parafusos

No reforço destes elementos estruturais é recorrente a utilização de parafusos de porca perpendicularmente ao plano das fendas (Figura 73). Esta solução requer o ajuste do aperto dos parafusos com alguma regularidade.



Figura 73 - Reforço com parafusos (fonte: Dias, et al., 2013)

Apesar disso, é uma solução rápida, simples e económica (Dias, et al., 2013). Esta é uma solução que vulgarmente é efectuada em obra conjuntamente com a aplicação de colas epoxídicas para assim permitir uma maior solidez e eficácia da intervenção.

4.7.3.3.4 Aumento de secção dos elementos

Em edifícios antigos são frequente as vigas de madeira possuírem perda de secção, fendas ou degradação. Este facto leva a que existam problemas de deformação, sendo necessário intervencionar. Frequentemente, são adicionadas novas peças que se encontram ligadas ou intercaladas com as originais. Devido ao facto de os elementos com problemas apresentarem já grandes deformações permanentes, é possível serem encontradas algumas dificuldades na colocação de novos elementos (Dias, 2008).

Vulgarmente, o aumento de secção dos elementos de madeira é realizado através da pregagem ou do aparafusamento de novas peças de madeira aos elementos existentes (Figura 74), podendo a localização destes variar consoante as condicionantes do local. É usual colocar as novas peças de madeira na sua parte superior, quando se pretende aumentar a inércia dos elementos. Estas podem ter a largura dos existentes, ou uma largura maior e, assim, originar vigas em “T”. Se este facto ocorrer, deverão ser previstos ligadores de absorção de esforços de corte, em toda a extensão das vigas.

É um método que apresenta algumas vantagens, nomeadamente o facto de ser pouco intrusivo. A grande desvantagem prende-se com as dificuldades de implantação, devido ao facto dos elementos novos terem deformações e teores em água diferentes dos antigos.

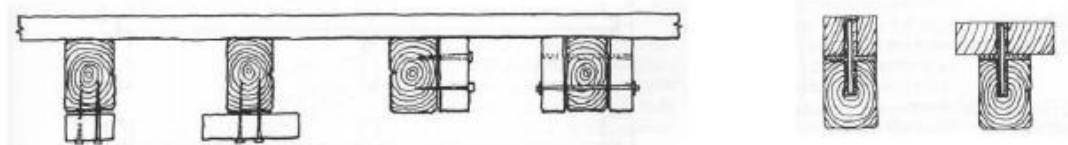


Figura 74 - Reforço por aumento de secção (fonte: Arriaga, 2002)

4.7.3.3.5 Divisão de espaçamento entre vigas

Quando os elementos de madeira estruturais se encontram em bom estado mas onde se evidenciam grandes deformações, é possível a introdução de novas vigas de madeira que dividam o espaçamento entre elas (Figura 75). Relativamente aos vigamentos a empregar, é necessário ter em atenção a espessura do pavimento, podendo haver uma limitação arquitectónica em termos de altura de elementos (Freitas, 2012).

Por outro lado, as novas vigas de reforço passam a receber parte da carga do pavimento, o que provoca uma necessidade de reforço nos apoios destas nas paredes de alvenaria, assim como a devida protecção de padieiras de portas e janelas.



Figura 75 - Divisão de espaçamento entre vigas (fonte:Dias, et al., 2013)

Será também necessário ter em atenção as entregas destes elementos. Terá que ser garantido um bom comprimento e uma correcta ligação dos vigamentos às paredes de alvenaria. Os novos elementos poderão ser em madeira ou em metal, dependendo do resultado do cálculo efectuado para a verificação do pavimento ou cobertura.

4.7.3.3.6 Introdução de soalho sobre o existente

A aplicação de um novo soalho perpendicularmente ao existente, introduz uma maior rigidez ao pavimento, atribuindo-lhe características de diafragma.

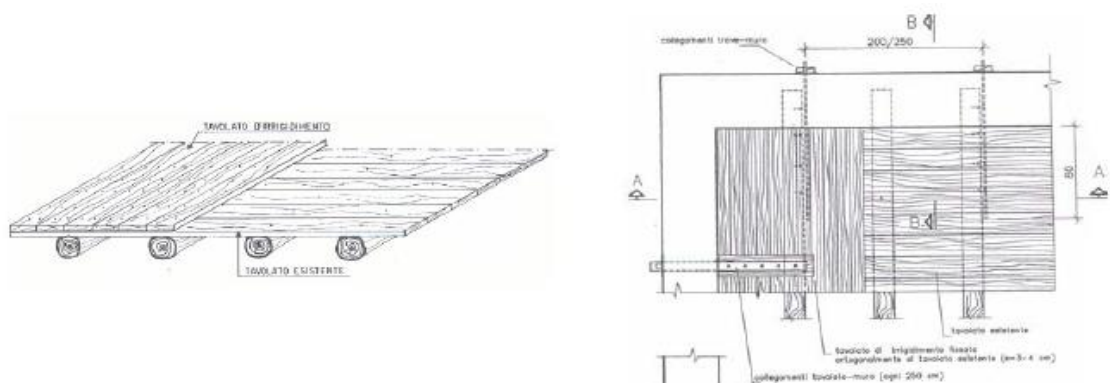


Figura 76 - Aplicação de soalho duplo e ligação do mesmo as paredes (fonte:Dias, et al., 2013)

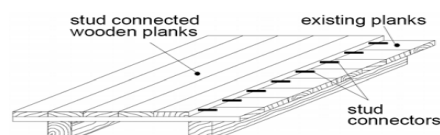


Figura 77 - Introdução de peças metálicas sobre as tábuas a liga-las (fonte:Dias, et al., 2013)

A aplicação de um novo soalho exige que o antigo esteja devidamente nivelado, para que a aplicação seja mais fácil. Esta técnica deverá ser utilizada quando os elementos existentes se encontram todos em bom estado de conservação, carecendo estes apenas de rigidez (Dias, 2008).

Dias, indica uma solução semelhante a esta, mas com a introdução de peças metálicas horizontais embebidas nas tábuas a ligá-las, referindo a comprovação experimental da sua eficiência, indicando no entanto que é necessário um maior refinamento para que possa ser aplicada na construção (Figura 77) (Dias, 2008).

4.7.3.3.7 Introdução de placas de derivados de madeira tipo OSB

Este método aplica-se nas mesmas condições do método anteriormente apresentado, e tem a mesma finalidade. A introdução de placas de derivados de madeira, tipo OSB, introduz um melhor comportamento do pavimento às deformações bem como a acções horizontais (Figura 78).

Estas placas são unidas ao pavimento bem como às paredes usando para o efeito elementos metálicos que garantam esta união, permitindo o funcionamento destes novos elementos de uma forma interligada à estrutura existente, permitindo um comportamento monolítico.



Figura 78 - Introdução de placas de OSB (fonte: Andrade, M.,2013)

4.7.3.3.8 Colocação de Escoras de Suporte

A redução dos esforços actuantes nos elementos estruturais deve-se ao facto da colocação de escoras. Em pavimentos e pisos térreos, por vezes, é comum utilizar-se escoras em madeira (devidamente protegidas da humidade) apoiadas no terreno, e a meio vão dos barrote ou das vigas (Figura 79).

Estas escoras deverão ser dimensionadas para resistir aos esforços de compressão a que vão estar sujeitas, e todo o cálculo de esforços da estrutura deverá ser revisto devido à introdução desses elementos.

A redução do vão dos elementos estruturais vai, de facto, ajudar na redução das deformações da estrutura. Através da colocação de elementos de suporte ligados aos elementos estruturais, por nós

realizados por samblagem ou através de pontes de equilíbrio, haverá uma transmissão de esforços entre elementos e, ao mesmo tempo, um impedimento à deformação do elemento estrutural.



Figura 79 - Introdução de escoras de modo a criar pontos de apoio intermédios (fonte: Dias, et al., 2013)

Em casos de deformações exageradas ou em caso de secção insuficiente devido a cargas ou ataque biológico, este tipo de intervenção estrutural é fácil e económico.

Os novos elementos a adicionar deverão ser, de preferência, da mesma espécie lenhosa do resto da estrutura, e deverão estar devidamente tratados e secos. A grande desvantagem deste método é a alteração dos esforços na estrutura, do funcionamento e da estética da mesma.

Arriaga, refere que outra solução comum de introdução de escoras é a criação, através de um entalhe ou de uma peça que permita a transmissão de cargas horizontais de um ponto de encaixe da escora na viga. As cargas são descarregadas nas paredes e, por isso mesmo, estas últimas devem estar dimensionadas para resistir a estas cargas (nomeadamente as horizontais) (Arriaga, 2002).

4.7.3.3.9 Utilização de Tirantes Metálicos para Reforço

Este tipo de solução pode ser utilizada para a correcção de deformações em vigas de grande vão. Os tirantes metálicos colocados na parte inferior das peças permite melhorar o estado de tensão na madeira e aumentar a inércia das mesmas, ficando assim o tirante traccionado e o elemento estrutural comprimido (Figura 80).

Esta solução permite aumentar simultaneamente a capacidade de carga da viga, tendo como única grande dificuldade a colocação dos tirantes nas extremidades dos elementos que, em alguns casos, se torna de difícil execução exigindo, por vezes, o desmonte da viga (Arriaga, 2002).

A aplicação de pré-esforço neste tipo de intervenção pretende criar uma contra-flecha no elemento para, assim, anular a deformação existente na peça e contrariar todas as acções externas de sentido oposto.



Figura 80 - Introdução de escoras de modo a criar pontos de apoio intermédios (fonte: Dias, et al., 2013)

4.7.3.3.10 Introdução de uma lajeta de betão

Este tipo de solução tem como objectivo reforçar os pavimentos em madeira, para que as cargas exercidas sobre os pavimentos seja repartida transversalmente, e no caso de algum elemento de madeira degradado, a lajeta de betão absorve esse esforço e mantém a continuidade e solidez do pavimento devido à existência de ligadores entre os dois (Dias, 2008).

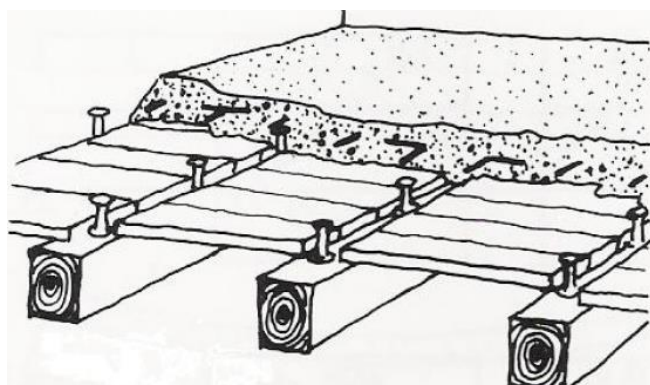


Figura 81 - Colocação de lajeta de betão sobre pavimento em madeira (fonte: Arriaga, 2002)

Hoje em dia a utilização deste método tem como principal razão a crescente preocupação com a resistência sísmica e a tentativa de melhorar o comportamento dos pavimentos a estas acções e, assim, reforçar o sistema de diafragma destas estruturas e reduzir o seu nível de vibração e deformação em geral (Figura 81).

A eficácia desta solução está claramente dependente da eficiência da ligação entre estes dois materiais: madeira e betão. O betão resiste muito bem a esforços de compressão, enquanto que a madeira tem comportamentos à tracção e à compressão aproximadamente iguais, o que faz com que, para haver uma boa distribuição de esforços na laje mista, seja necessário uma adequada ligação entre as duas camadas e reduzir (se possível anular) os deslocamentos entre elas (Branco, et al., 2004). Para isso existem diversos

tipos de ligadores, sendo de destacar os do tipo cavilha (como pregos, parafusos ou varões metálicos dobrados), os de superfície (tubos metálicos, ligadores dentados ou de anel) e por último, mas não finalmente, o recurso a ligações coladas com colas epoxídicas.

Arriaga, refere que as principais vantagens são a obtenção de cerca do dobro da capacidade resistente de carga em relação ao original, o triplo ou o quádruplo da rigidez à flexão, e o funcionamento como diafragma aumentar indefinidamente. Assim sendo, associado ao facto de passar a existir um aumento significativo da massa do pavimento, o nível de vibrações diminui, o isolamento acústico e térmico aumenta de forma considerável e a resistência ao fogo é maior. Para além disso, é um método bastante fácil e económico de implementar em obra (Arriaga, 2002).

Quanto às desvantagens, as principais a destacar são o brusco aumento de peso e altura do pavimento e a complexidade na execução das ligações entre a laje e a parede e entre o betão e a madeira do pavimento. De facto, a má execução das ligações neste tipo de estruturas mistas poderá provocar graves danos na estrutura do pavimento devido ao mau funcionamento à flexão e, assim, a madeira não suporta o peso da lajeta de betão. Se não houver solidarização estrutural, a lajeta de betão funciona apenas como massa adicional, não tendo qualquer contribuição para a resistência do conjunto. Qualquer falha na execução dos trabalhos pode ainda ter consequências muito graves no desempenho do pavimento após reabilitação.

4.7.3.4 Substituição integral por uma nova estrutura moderna

Esta é uma solução limite a adoptar apenas em situações extremas de ausência de materiais antigos ou em casos onde os projetistas entendam não se justificar a realização de uma estrutura com materiais antigos, normalmente de custo mais elevado. Em geral, não se justifica o recurso a esta solução se for possível recorrer à terceira hipótese. É uma solução extremamente aliciante em casos de reabilitação urbana onde é possível, por exemplo, aproveitar as madeiras provenientes das coberturas para outros fins (no local ou em obras futuras) e conceber uma cobertura totalmente nova com recurso a soluções em lamelado colado, por exemplo (Freitas, 2012).

A substituição das estruturas de soalhos e coberturas de madeira por soluções em betão armado apoiadas nas alvenarias de pedra existentes é, em geral, uma solução limite que apenas se justifica quando a intervenção alternativa for anti-económica ou o edifício em questão tiver um reduzido interesse patrimonial (esta solução obriga a ter uma atenção especial sobre o comportamento global da estrutura de modo a perceber as implicações associadas ao incremento de peso próprio da nova solução). Em geral será sempre mais económico manter pelo menos os vigamentos dos soalhos desde que reutilizáveis em mais de 50%. O problema da solução a adoptar é essencialmente um problema de Arquitetura que deverá considerar, para

além dos contributos da engenharia estrutural, diretrizes claras de intervenção no património histórico ou urbano a definir pelas entidades licenciadoras e/ou gestoras do património.

4.7.3.4.1 Substituição integral da cobertura

Saber avaliar o nível limite de degradação a partir do qual é preferível substituir um elemento estrutural em vez de o reabilitar é sempre um problema e uma dificuldade, na fase de decisão anterior à intervenção. A substituição de elementos é por vezes a melhor solução, particularmente nos casos em que a degradação é tão elevada que a manutenção de um elemento reabilitado/reforçado levaria a uma intervenção excessivamente intrusiva.

Nas situações em que a degradação atinge a totalidade dos pavimentos e cobertura, obrigando à sua substituição, é possível proceder de diversas formas, nomeadamente, a introdução de um novo vigamento de madeira maciça, lamelada colada ou de outro tipo de derivado de madeira, introdução de perfis metálicos leves, introdução de laje aligeirada de betão armado, entre outros. Para além da substituição dos pavimentos ou cobertura com a remoção total dos elementos de madeira, existem situações em que o vigamento é mantido apenas com uma função estética, sendo substituído na sua função estrutural por outros elementos.

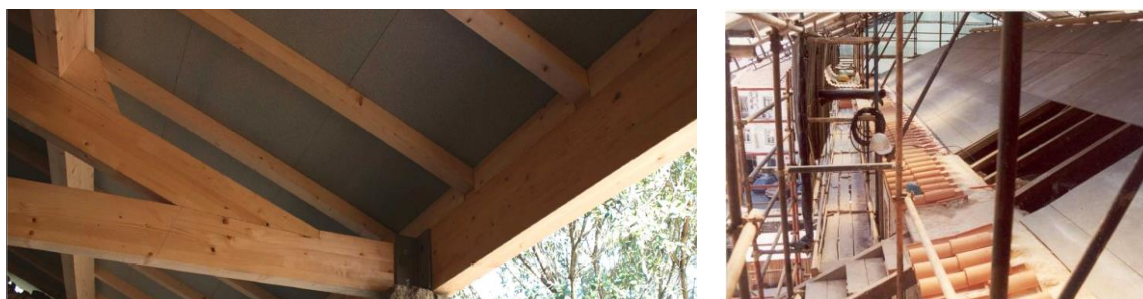


Figura 82 - Substituição da cobertura por elementos compatíveis (fonte: Dias, et al., 2013; Appleton, 2007)

Muitas vezes, uma reabilitação profunda implica uma alteração radical das coberturas, através da sua reconstrução, facilitando a introdução do reforço do isolamento térmico, incorporando entre o forro e o tecto uma camada isolante térmica.

5



AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA ESTRUTURAL DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

5.1 INTRODUÇÃO

Sendo um material natural e renovável, transformável à custa de um baixo custo energético, a madeira goza de uma imagem favorável face às actuais preocupações ambientais e de economia de energia. A sua utilização na construção poderá representar um meio para a conservação e revitalização da floresta mundial. Sem esquecer o efeito benéfico para o meio ambiente que daí resulta, nomeadamente, pelo processo de fotossíntese (Cachim, 2007).

No capítulo faz-se uma abordagem às propriedades físicas e mecânicas da madeira, assim como apresentar o Eurocódigo 5, fundamental para a verificação estrutural de elementos de madeira simples, expondo a metodologia para a verificação de estabilidade de estruturas.

A sua utilização na construção é muito antiga. Na verdade, cronologicamente e como anteriormente referido, a madeira foi o primeiro material à disposição do Homem capaz de resistir simultaneamente a esforços de tracção e de compressão. Tratando-se de um material produzido em condições naturais, apresenta uma maior variabilidade de propriedades, não só de espécie para espécie mas também entre populações, espécimes e, nestes, ao longo do comprimento e da secção transversal.

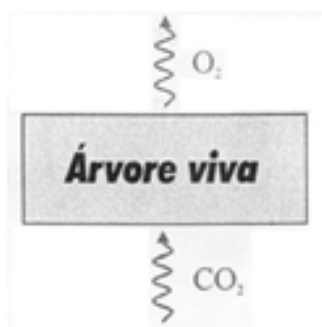


Figura 83 - Efeito favorável das florestas (Fonte: Negrão, 2001)

A madeira é um material anisotrópico, isto é as propriedades variam segundo os três eixos, e onde as propriedades físicas e as suas características mecânicas, dependem da direção do esforço em relação à orientação das fibras (Cachim, 2007). Importa ainda referir que a resistência da madeira é variável, e que esta tem em conta a espécie, florestal, seja ela resinosa ou folhosa, pois apresentam estruturas anatómicas bastante distintas

A verificação de segurança, segundo o Eurocódigo 5 é efectuada com base em coeficientes parciais de segurança, que têm em atenção diversos aspectos como a variabilidade e fiabilidade em serviço (Cruz, et al., 1997). Os valores das tensões/deformações actuantes são determinados com base nas combinações de acções adequadas, definidas no Regulamento de Segurança e Acções para Edifícios e Pontes (RSA), enquanto que os valores das tensões resistentes são determinadas segundo o Eurocódigo 5.

5.2 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas da madeira são consideradas as características que influenciam o seu comportamento face a acções externas. São incluídas nas propriedades físicas a massa volúmica e densidade volúmica, teor de água, higroscopicidade, retracção e inchamento e os efeitos térmicos (Cachim, 2007).

O conhecimento destas propriedades é fundamental, face à significativa influência que exercem no comportamento e nas resistências mecânicas da madeira empregue em aplicações estruturais.

5.2.1 Massa Volúmica e Densidade Volúmica

A massa volúmica, dada pela relação entre a massa e o volume, é uma importante propriedade da madeira face às relações existentes com a maior parte das propriedades físicas e mecânicas. O valor da massa volúmica pode ser determinado tendo em conta a norma portuguesa (NP618, 1973):

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \quad (5.1)$$

Em que:

ρ_H - massa volúmica da madeira;

m_H - massa;

V_H - volume;

Usualmente indicada em kg/m^3

A forma mais generalizada para o cálculo da massa volúmica recorre aos valores da massa e do volume referentes a um teor em água de 12%. Este valor é aceite como a massa volúmica padrão, dado corresponder sensivelmente à humidade média de equilíbrio ao ar das madeiras situadas em interiores de edifícios (Dias, et al., 2009).

A variação da massa volúmica é significativa entre espécies de madeira, em que pode variar entre os 300kg/m^3 e 1200kg/m^3 para espécies leves. As espécies mais utilizadas na construção são resinosas, em que as massas volúmicas podem variar entre os 400kg/m^3 e os 500kg/m^3 , para as folhosas 600kg/m^3 e os 700kg/m^3 .

5.2.2 Teor de Humidade

O teor de humidade da madeira H , define-se como o quociente entre o valor percentual do peso de água da amostra em relação ao peso seco desta, após secagem em estufa a mais de $100\text{ }^\circ\text{C}$, determinado através da norma portuguesa (NP614, 1973).

$$H = 100 \times \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (5.2)$$

Em que:

m_h - massa da madeira húmida;

m_s - massa da madeira seca;

O valor de referência para o teor em água padrão, para o qual são determinadas as propriedades da madeira foi convencionalmente definido como sendo $H=12\%$. O teor de água da madeira condiciona significativamente o comportamento e as propriedades da madeira. Há alterações significativas na maioria

das propriedades físicas e mecânicas da madeira quando as trocas de água se dão abaixo do ponto de saturação das fibras. Essas alterações, podem ser a retracção ou a dilatação da madeira, e por vezes, distorções e empenamentos, variando a resistência e o módulo de elasticidade da madeira.

Quando as trocas de água se dão acima do ponto de saturação das fibras, as propriedades mantêm-se praticamente inalteráveis (Cachim, 2007).

5.2.3 Higroscopicidade

A madeira perde e ganha humidade em função das alterações de temperatura e de humidade do ar, sendo por isso um material higroscópico. É importante por isso ter o conhecimento da variação do teor de água da madeira e quais as consequências que a variação do teor em água da madeira tem nas suas restantes propriedades.

A dessorção e a absorção de água por parte das paredes das células que constituem a matéria lenhosa provocam variações dimensionais da madeira, que podem originar empenos e fendas (Cachim, 2007).

O teor de humidade deve ter sido em conta no dimensionamento dos elementos com função estrutural, pois os riscos de degradação por agentes biológicos vêm em função do valor do teor de humidade (M9, 1997).

5.2.4 Retracção e Inchamento

As variações do valor do teor em água da madeira produzem variações das suas dimensões. Aumentando o teor de água, a madeira sofre inchamento e com a diminuição do teor de humidade, retrai. Essa instabilidade ocorre para valores do teor de água inferiores ao ponto de saturação das fibras.

Estas variações dimensionais ocorrem de modos diferentes, em direcções axial, radial e tangencial, pois a madeira é um material anisotrópico (Cachim, 2007).

O maior valor ocorre para a direcção tangencial e o menor na direcção longitudinal, que é muito reduzido e é considerado como desprezável. O valor radial é aproximadamente 60% do que apresentado pela retracção tangencial. A razão entre os valores de retracções transversais, denominam-se como anisotropia de retracção e expõe a propensão da madeira empenar (M9, 1997).

5.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas dos materiais são as características de resposta à aplicação externa de forças, como as propriedades elásticas, que caracterizam a resistência, as deformações e as distorções, e as propriedades de resistência, definidoras da resistência à aplicação de cargas (Windasdy, 1994).

Estes valores são obtidos a partir de ensaios normalizados, sobre provetes de madeira isentos de defeitos que poderiam reduzir a resistência, como são exemplo os nós, as fendas, as bolsas de resina, entre outros.

5.3.1 Tração paralela as Fibras

Na direcção das fibras, a madeira tem uma elevada resistência à tração. Os resultados exibidos em provetes de madeira sem defeitos são superiores aos apresentados pelas resistências à flexão e à compressão. Porém, o comportamento à tração da madeira é fortemente influenciado pela existência de defeitos e anomalias, pelo que na prática, pode-se admitir valores idênticos para a resistência à compressão (na direcção das fibras) e para a resistência à tracção (Cachim, 2007).



Figura 84 - Tracção paralela às fibras (Fonte: WNcrep, 2013)

Em boa verdade, os valores característicos vêm reduzidos por coeficientes de segurança, não só pelas razões já expostas, mas também pela natureza frágil da rotura à tração. Para a realização dos ensaios de tração paralela às fibras, utilizaram-se provetes com a secção de $5 \times 20 \text{ mm}^2$ e um comprimento de 200mm.

5.3.2 Compressão paralela as Fibras

A resistência da madeira sujeita a compressão na direcção longitudinal (paralela às fibras) revela valores de resistência significativos, apresentando um comportamento próximo do linear até ao máximo da resistência rotura que é dúctil.

Em provetes de madeira isenta de defeitos, os valores da resistência à tração na direção das fibras, são superiores aos exibidos pela resistência à compressão na mesma direção. Porém, para valores característicos esta relação inverte-se. A existência de nós não influencia significativamente a resistência à compressão, contrariamente à resistência à tração que é fortemente influenciada (Cachim, 2007).

A determinação da resistência à compressão da madeira livre de defeitos pode ser feita com base na norma portuguesa.

Esse valor pode ser também determinado com base na fórmula empírica do Wood Handbook (NP619, 1973):

$$\sigma = \frac{49000 \times (G/1000)^{1.11}}{1000} \quad (5.3)$$

Em que G corresponde ao valor da massa volúmica da madeira, kg/m^3 , e σ vem em MPa.



Figura 85 - Compressão paralela às fibras (Fonte: WNcrep, 2013)

5.3.3 Tração perpendicular as Fibras

A resistência à tração na direção perpendicular as fibras é muito reduzida, cerca de 30 a 70 vezes menor que na direção paralela as fibras. A justificação da baixa resistência é pelo escasso número de fibras que a madeira possui na direção perpendicular ao eixo das árvores, e logicamente, pela falta de travamento transversal das fibras longitudinais.

$$\sigma = \frac{10500 \times (G/1000)^{1.37}}{1000} \quad (5.4)$$

Em que G corresponde ao valor da massa volúmica da madeira, kg/m^3 , e σ vem em MPa.

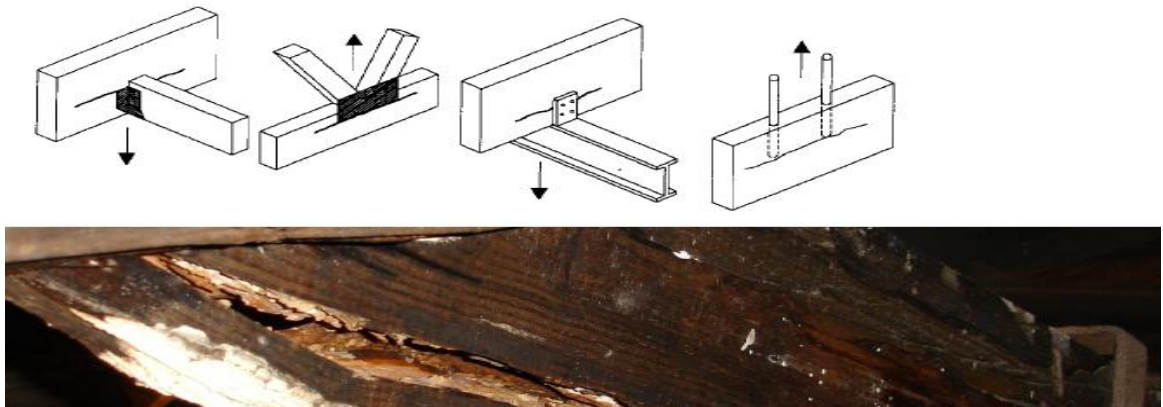


Figura 86 - Perpendicular às fibras (Fonte: WNcrep, 2013)

Deve por isso evitar-se este tipo de solicitações nas estruturas. O valor da resistência da madeira à tração perpendicular às fibras pode ser estimado com base na fórmula empírica do Wood Handbook (Madison, 1999).

5.3.4 Compressão perpendicular as Fibras

A resistência à compressão perpendicular às fibras, como para qualquer das resistências nesta direcção, é inferior ao valor na direcção paralela.

Esta é melhorada quando a compressão é localizada, sendo a resistência à compressão na direcção perpendicular às fibras dependente à distribuição da carga no provete ou na peça.

As fibras são apertadas entre si até que seja atingida a tensão correspondente ao esmagamento das fibras caso a peça esteja toda comprimida (Cachim, 2007).

A relação tensão-deformação evidencia um comportamento inicialmente linear em que se atinge a rotura por plastificação sem que se observe uma rotura clara da peça. Este esforço é característico nas zonas de apoio das vigas, onde a carga aplicada é concentrada em pequenas áreas que devem ser capazes de transmitir a reacção de apoio sem sofrer deformações relevantes e plastificação (Cachim, 2007).

O valor da resistência da madeira à compressão perpendicular às fibras pode ser estimado com base na fórmula empírica do Wood Handbook (Madison, 1999):

$$\sigma = \frac{18500 \times (G/1000)^{2.48}}{1000} \quad (5.5)$$

Em que G corresponde ao valor da massa volúmica da madeira, kg/m³, e σ vem em MPa.



Figura 87 - Compressão Perpendicular às fibras (Fonte: WNcrep, 2013)

5.3.5 Flexão

A resistência da madeira apresenta valores elevados para a resistência à flexão, comparada com a sua massa volúmica. A flexão resulta de um momento fletor que produz na peça tensões de tração e de compressão, na direção paralela às fibras.

Sendo, o módulo de elasticidade em tração e compressão, da mesma ordem de grandeza, pode admitir-se que o diagrama de tensões normais é linear adotando valores máximos para as fibras mais extremas.

Quando é elevada a ordem de grandeza dos momentos aplicados, a distribuição das tensões normais na secção transversal deixa de ser linear: o valor das tensões aumenta até atingir o valor da resistência à compressão, para as fibras comprimidas, e da resistência à tração na zona tracionada da peça (Cachim, 2007).

O valor da resistência à flexão da madeira livre de defeitos pode ser determinado pela norma portuguesa (NP619, 1973), assim como também pode ser estimado com base na fórmula empírica do Wood Handbook (Madison, 1999):

$$\sigma = \frac{118700 \times (G/1000)^{1.16}}{1000} \quad (5.6)$$

Em que G corresponde ao valor da massa volúmica da madeira, kg/m^3 , e σ vem em MPa.

FLEXÃO SIMPLES

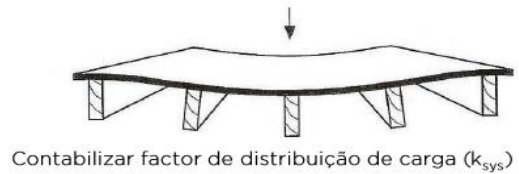


Figura 88 - Flexão (Fonte: WNcrep, 2013)

5.3.6 Corte

A resistência ao corte da madeira não é elevada, originando tensões tangenciais que atuam segundo diversos modos, podendo as tensões de corte ocorrer na direcção das fibras, provocando deslizamento entre fibras, ou na direcção perpendicular às fibras, provocando a rotura localizada das fibras.



Figura 89 - Corte e torção (Fonte: WNcrep, 2013)

Quando os elementos são submetidos à flexão e ao corte, simultaneamente, desenvolvem-se tensões tangenciais, quer de corte, quer de deslizamento. A rotura ocorre segundo o plano mais fraco, o que normalmente implica uma rotura por deslizamento, sendo o valor para a resistência por deslizamento transversal cerca de 20 a 30 % da resistência do deslizamento longitudinal (Cachim, 2007).

O valor da resistência ao corte da madeira livre de defeitos pode ser determinado pela norma Portuguesa NP-623 (1973). Esse valor pode ser também estimado com base na fórmula empírica do Wood Handbook (Madison, 1999)

$$\sigma = \frac{17800 \times (G/1000)^{1.24}}{1000} \quad (5.7)$$

Em que G corresponde ao valor da massa volúmica da madeira, kg/m³, e σ vem em MPa.

5.3.7 Módulo de Elasticidade e Distorção

O módulo de elasticidade da madeira não é igual em tração e em compressão. O valor do módulo de elasticidade, na direcção paralela às fibras que se utiliza, é um valor médio, entre o de tração e o de compressão, que pode variar entre os 7 e os 16 GPa para as resinosas e entre os 10 e os 20 GPa para as folhosas, na madeira classificada (Cachim, 2007).

O valor da distorção, na direcção perpendicular, é 30 vezes inferior ao da direcção paralela no caso das resinosas, podendo estar compreendido entre os 0,23 e os 0,53 GPa e no caso das folhosas é 15 vezes inferior, podendo estar compreendido entre os 0,64 e os 1,33 GPa, para a madeira classificada.

Dentro de uma espécie, o valor para o módulo de elasticidade pode variar muito (Cachim, 2007). Um dos factores que influencia o seu valor, por exemplo é o teor em água.

5.4 VERIFICAÇÃO DA SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS DE MADEIRA

5.4.1 Eurocódigo 5. Generalidades

Presentemente, a regulamentação recomendada para a verificação de segurança de estruturas em madeira é realizada segundo o EC5 (1995-1:2005, 2004). Esta norma define regras e divide-se em três partes:

- EN 1995-1-1:2004 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings;
- EN 1995-1-2:2004 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design;
- EN 1995-2:2004 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 2: Bridges.

A primeira parte mostra além de modelos de cálculo, diversos formulários aplicados especificamente à análise da capacidade resistente de peças estruturais em madeira, para a verificação dos estados limites

últimos e estados limites de utilização (ou serviço). Apresenta ainda regras geométricas de dimensionamento para os vários tipos de elementos de ligação aplicados a estruturas em madeira.

As regras de carácter geral de verificação das estruturas de madeira em caso de incêndio, são definidas na segunda parte, sendo abordadas várias metodologias de aplicação para os elementos presentes neste tipo de estruturas.

Por último, na terceira parte, mostra-se um conjunto de regras aplicadas especificamente ao caso das pontes correntes.

5.4.2 Bases de cálculo de projecto de Estruturas de Madeira

A verificação de segurança realizada segundo o EC5, implica a verificação em relação aos Estados Limites em conjunto com o método dos coeficientes parciais, sendo ambos os processos desenvolvidos mais a frente. Conforme o caso, os modelos de cálculo para os estados limites devem ter em conta os seguintes aspectos:

- Distintas propriedades dos materiais (por exemplo: resistência e rigidez);
- Diferentes comportamentos dos materiais ao longo do tempo (duração das acções e fluência);
- Variadas condições climáticas (temperatura, variações de humidade);
- Situações de cálculo distintas (fases de construção, alterações das condições de apoio).

De um modo geral, a verificação de estabilidade pode ser realizada recorrendo a valores médios na determinação de parâmetros de rigidez (E_{mean} , G_{ser} , K_{ser}). Todavia, os elementos devem apresentar as mesmas propriedades em função do tempo e devem efectuar-se análises lineares elásticas de primeira ordem.

No que se refere aos estados limites, deve abordar-se para o estudo da estrutura: as deformações ocorridas nas peças estruturais; os efeitos consequentes de vibrações incómodas provenientes do uso corrente ou do funcionamento de equipamentos existentes; as limitações impostas ao deslizamento das ligações entre elementos.

O comportamento de uma estrutura, relativamente às deformações resultantes dos efeitos das acções a que está sujeita e de acordo com a variação do seu teor de água, devem ser controlados e manter-se dentro dos limites adequados.

Caso contrário, poderão decorrer, destas deformações, danos em elementos não estruturais, ao nível de revestimentos, dos tectos, dos pavimentos, das divisórias e de acabamentos, alterando-se o seu aspecto visual e o nível de exigências de carácter funcional.

5.4.3 Estados Limites

Quando uma estrutura ou parte dela atinge um estado limite, de modo definitivo ou parcial, deixa de satisfazer as condições previstas para a sua utilização.

Deduzir, naturalmente, que uns dos requisitos esperados numa estrutura seja que a mesma reúna condições apropriadas ao nível da segurança e durabilidade.

Será necessário recorrer ao cálculo da resistência mecânica, devendo ter-se ainda em conta que a duração das acções e o teor de água afectam as características de resistência e de rigidez dos elementos de madeira.

Assim, quando uma estrutura manifesta um desempenho que não corresponde eficazmente às condições enunciadas, considera-se que esta terá atingido um estado limite. Deste modo, uma construção pode atingir um estado limite do tipo funcional ou estrutural, ou seja, respectivamente:

- Estado limite último (ou de colapso).
- Estado limite de utilização (ou de serviço);

5.4.3.1 Estado Limite Último (ELU)

Os estados limites últimos estão relacionados com um colapso, ou qualquer outro tipo de falha estrutural, que cause a paralisação da construção.

5.4.3.1.1 Tracção e Compressão

A madeira é um material anisotrópico, pelo que apresenta distintas propriedades quando solicitada em diferentes direcções, nomeadamente, na direcção perpendicular e paralela à direcção das fibras (Figura 90).

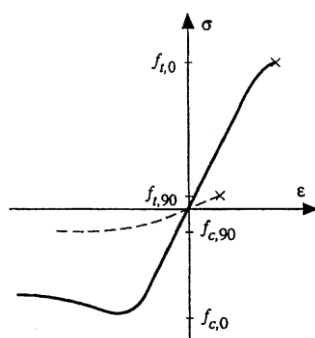


Figura 90 - Curva tensão– extensão, em madeira isenta de defeitos, na direcção das fibras (contínuo) e na direcção perpendicular às fibras (tracejado) (Edlund, 1995)

5.4.3.1.2 Flexão. Cálculo da tensão resistente

Como efeito das suas características físicas e mecânicas, a madeira exhibe uma elevada relação resistência à flexão versus peso. O seu uso em elementos submetidos à flexão é frequente, encontrando-se inúmeros exemplos nas aplicações estruturais correntes. Entre estes, distinguem-se os elementos sujeitos a: flexão simples (vigas de pavimentos); flexão desviada (vigas de pórticos) e flexão composta (pilares de fachadas).

O procedimento de cálculo de elementos em madeira submetidas à flexão, onde a direcção das fibras é paralela ao vão, inclui as seguintes verificações (Choo, 1995):

- Valor máximo da tensão de flexão actuante de cálculo;
- Risco de instabilidade lateral-torsional ou bambeamento
- Valor máximo da tensão de corte actuante de cálculo;
- Esmagamento transversal nos apoios ou cargas concentradas;
- Estado limite de deformação, no caso de vigas;
- Estado limite de vibração, no caso de pavimentos.

Na quantificação dos valores de cálculo das tensões resistentes, a utilizar na verificação da segurança da estrutura, dever-se-á, tal como para os restantes valores de cálculo, seguir-se o Art.º 2.2.3.2. do Eurocódigo 5. Contudo o mesmo regulamento, sugere alterações na quantificação dos valores de cálculo da tensão resistente em determinadas situações, nomeadamente:

- Para madeira maciça e alturas da secção transversal em flexão ou para larguras em tracção paralela ao fio, inferiores a 150mm, os valores característicos $f_{m,k}$ e $f_{t,0,k}$ determinados de acordo com os projectos EN 338 e EN 384 podem ser multiplicados pelo factor k_h , onde:

$$K_h = \min \left\{ \begin{array}{l} (150/h)^{0.2} \\ 1,3 \end{array} \right. \quad (5.8)$$

Com h em mm, para a altura em flexão ou a largura em tracção (ENV1995-1-1).

- Em peças de madeira lamelada colada, para alturas da secção transversal em flexão ou larguras em tracção paralela ao fio, inferiores a 600 mm, o valores característicos $f_{m,k}$ e

$f_{t,0,k}$ determinados de acordo com o projecto pr EN 1194 podem ser multiplicados pelo factor k_h , onde:

$$K_h = \min \left\{ \begin{array}{l} (600/h)^{0.2} \\ 1,15 \end{array} \right. \quad (5.9)$$

Com h em mm, para a altura em flexão ou a largura em tracção (ENV1995-1-1).

- Assim, os valores de cálculo para a tensão resistente à flexão deverão ser obtidos a partir da equação (5.10).

$$f_{m,d} = K_h \frac{K_{mod} \times f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (5.10)$$

Em que, K_h é o coeficiente que tem em conta o efeito de volume, k_{mod} é o coeficiente que atende ao efeito da duração das acções e do teor de água classe de serviço e γ_M o coeficiente parcial de segurança material.

5.4.3.1.3 Capacidade resistente da secção. Flexão simples e desviada

Flexão Simples

Em peças sujeitas a flexão simples, a verificação da segurança de determinada secção transversal é validada pela seguinte fórmula:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \quad (5.11)$$

Sendo M_d o valor de cálculo do momento flector e W o módulo de flexão.

Flexão Desviada

Nas estruturas correntes, é frequente a necessidade de dimensionar peças solicitadas à flexão desviada. No seu cálculo é exigido que sejam satisfeitas simultaneamente as seguintes condições

$$\begin{aligned}
 K_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &< 1 \\
 \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &< 1
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

Em que $\sigma_{m,y,d}$ e $\sigma_{m,z,d}$ são valores de cálculo das tensões correspondentes aos esforços actuantes em flexão em torno dos eixos principais, $f_{m,y,d}$ e $f_{m,z,d}$ são valores de cálculo das tensões correspondentes aos esforços resistentes e K_m é o factor de resistência à flexão desviada, que tem em conta as tensões em torno dos dois eixos principais.

Flexão Composta com tracção paralela ao fio

Muitas vezes, os elementos estruturais de madeira estão submetidos a esforços de distintas naturezas. Em vigas submetidas à flexão composta com tracção paralela ao fio é necessário que sejam satisfeitas as seguintes condições.

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\
 \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1
 \end{aligned}
 \tag{5.13}$$

Em que $\sigma_{t,0,d}$ é o valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço actuante à tracção e $f_{t,0,d}$ é o valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço resistente à tracção.

Flexão Composta com Compressão paralela ao fio

Mais frequente que a situação do ponto anterior, no cálculo de flexão composta com compressão paralela ao fio exige-se a satisfação, em simultâneo, das seguintes condições:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \\ \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} &\leq 1 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Em que $\sigma_{c,0,d}$ é o valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço actuante à compressão e $f_{c,0,d}$ é o valor de cálculo da tensão correspondente ao esforço resistente à compressão.

Nestes casos, é necessário averiguar o risco de ocorrência de encurvadura. O Eurocódigo 5 considera existir o risco de encurvadura quando os valores da esbelteza relativa, para as direcções em que haja a possibilidade de encurvadura, forem inferiores a 0.5. Na quantificação dos valores das esbeltezas relativas, para as diferentes direcções, normalmente, z-z e y-y, deverão ser utilizados os coeficientes de esbelteza relativos são definidos por:

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}} \quad (5.15)$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,z}}} \quad (5.16)$$

Sendo $f_{c,0,k}$ o valor característico da tensão correspondente ao esforço resistente à compressão e σ_{crit} , a tensão crítica de Euler, dada por:

$$\sigma_{c,crit,y} = \frac{\pi^2 \times E_{0,05}}{\lambda_y^2} \quad (5.17)$$

$$\sigma_{c,crit,z} = \frac{\pi^2 \times E_{0,05}}{\lambda_z^2} \quad (5.18)$$

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} \quad (5.19)$$

Em que $E_{0,05}$ é o valor característico do módulo de elasticidade paralelo ao fio e λ a esbelteza da peça na direcção pretendida.

5.4.3.1.4 Instabilidade lateral – torsional (Bambeamento)

Considere-se uma viga com secção rectangular, simplesmente apoiada submetida a flexão constante M , provocada por dois momentos flectores aplicados nas suas extremidades, (Figura 91) (a), denominada viga padrão (Alvarez, et al., 2000).

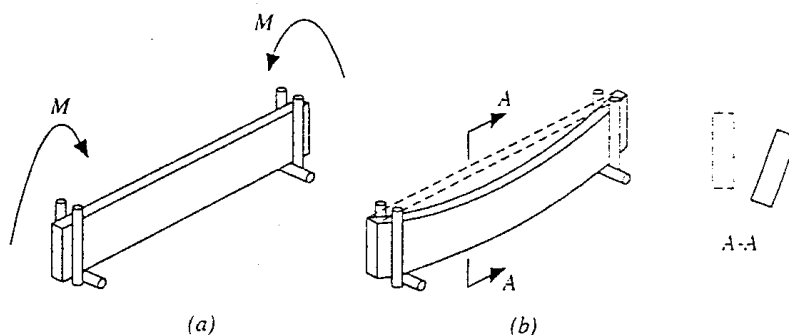


Figura 91 - Viga padrão (a) e o fenómeno de Bambeamento (b) (fonte: Alvarez, 2000)

Quando o valor de M é inferior a $M_{crit.}$, a viga deforma-se no plano vertical, como consequência da flexão segundo o eixo perpendicular ao da viga. No entanto, quando atinge o valor de $M_{crit.}$, sofre também deslocamento horizontal por rotação, originado pela encurvadura da zona comprimida. O momento crítico elástico para uma viga simplesmente apoiada, sob acção de um momento uniforme é dado por:

$$M_{crit} = \frac{\pi}{l_{ef}} \times \sqrt{\frac{E \times I_z \times I_{tor} \times G}{1 - \frac{I_z}{I_y}}} \quad (5.20)$$

Em que, I_z é o momento de inércia (eixo fraco), I_{tor} é o momento de inércia torsional, $E_{0,05}$ é o valor característico do módulo de elasticidade, $G_{0,05}$ é o valor característico do módulo de distorção e l_{ef} o comprimento de encurvadura.

5.4.3.1.5 Corte

O esforço de corte origina tensões tangenciais que actuam sobre as fibras da madeira segundo diversos modos. Na (Figura 92), apresentam-se as distintas formas de tensões tangenciais que podem ocorrer na madeira, em função, da orientação da fibra em relação ao esforço de corte:

- a) tensões tangenciais de corte: as fibras são cortadas transversalmente por este esforço. Esta rotura ocorre por esmagamento;
- b) tensões tangenciais de deslizamento longitudinal: a rotura é produzida pelo deslizamento entre as fibras na direcção longitudinal;
- c) tensões tangenciais de deslizamento transversal: a rotação das fibras entre si leva à rotura localizada.

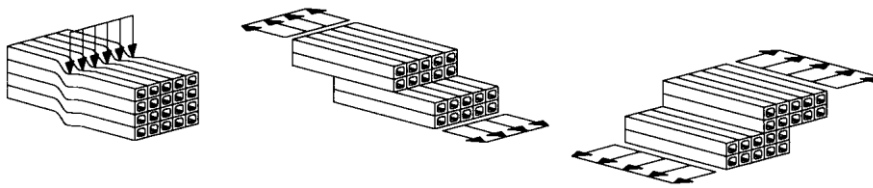


Figura 92 - Esq: Tensões tangenciais de corte. Centro: Tensões tangenciais de deslizamento longitudinal, Dir: Tensões tangenciais de deslizamento transversal

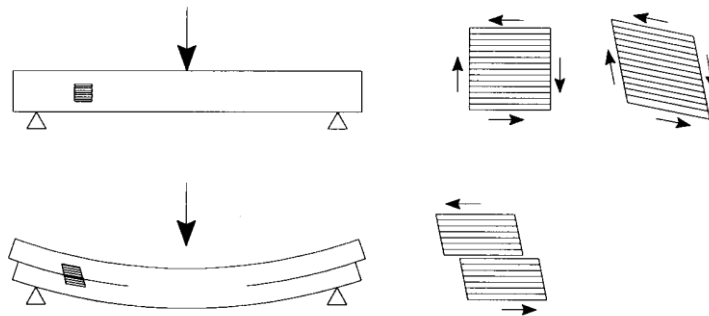


Figura 93 - Tensões tangenciais de corte e de deslizamento (Alvarez, 2000)

Nos elementos submetidos, simultaneamente, à flexão e ao corte, desenvolvem-se tensões tangenciais quer de corte quer de deslizamento. A rotura ocorre segundo o plano mais fraco, que é o mesmo que afirmar, que a rotura se dá por deslizamento.

Pela desigualdade (5.21) pode-se verificar se a barra está em segurança ao corte:

$$\frac{\tau_{v,d}}{f_{v,d}} \leq 1 \Rightarrow \tau_{v,d} \leq f_{v,d} \quad (5.21)$$

Em que τ_{sd} é o valor de cálculo da tensão tangencial máxima e $f_{v,d}$ o valor de cálculo da tensão resistente ao corte.

No cálculo da tensão tangencial máxima, assumem-se como válidas as expressões da resistência dos materiais, para materiais homogêneos e isotrópicos:

Através da expressão (5.22) determinamos “ τ_d ”.

$$\tau_d = \frac{1.5 \times V_d}{A} \quad (5.22)$$

Em que V_{sd} é o valor de cálculo para o esforço transversal actuante e A a área da secção transversal da viga.

Nas extremidades das vigas, o efeito do esforço de corte total de cargas pontuais, situadas a uma distância igual ou inferior $2h$, isto é, ao dobro da altura da secção transversal da viga, vem reduzido e é obtido pela modificação da sua linha de influência.

Para as dimensões correntes, fixadas, normalmente, pela verificação dos Estados Limites de Deformação e Ruptura por Flexão, o corte não se assume como determinante, salvo em peças de secção variável, em vigas curtas com cargas pontuais elevadas ou vigas com entalhes nas extremidades.

5.4.3.2 Estado Limite de Serviço ou utilização (ELS)

O desempenho de uma estrutura deve ser avaliado segundo dois níveis. O primeiro, quanto à segurança, normalmente expresso em termos de capacidade resistente, e o segundo, quanto à utilização, referente à capacidade do sistema estrutural e seus elementos de assegurar satisfatoriamente o seu uso (Negrão, et al., 2009).

Enquanto a violação dos critérios de resistência geralmente, provoca a perda de vidas humanas, a violação dos requisitos de utilização raramente provoca vítimas humanas e usualmente envolve pequenas perdas económicas. Porém, a maioria das patologias observadas nas construções são resultado do incumprimento dos estados limites de utilização. Daí a importância requerida por estes na fase de projecto.

No caso de elementos horizontais de madeira, os estados limites de utilização contemplam a verificação da deformação e o controlo da vibração, o que muitas das vezes, condiciona o seu cálculo.

5.4.3.2.1 Combinações de Acções

As combinações de acções para a verificação de segurança em relação aos estados limites de utilização deverão, em princípio, ser calculados pela expressão:

$$S_d = \sum_{j=1}^m G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i=2}^n \Psi_{1,i} \times Q_{k,i} \quad (5.23)$$

Em que:

$G_{k,j}$ - valor característico das acções permanentes;

$Q_{k,1}$ - valor característico de uma das acções variáveis; $Q_{k,i}$ - valores característicos das outras acções variáveis; ψ_1 - coeficiente ψ_1 (RSA).

5.4.3.2.2 Deformação Final

A madeira é um material que dada a sua natureza viscoelástica, apresenta uma fluência considerável. A sua deformação final, pode atingir o dobro do valor da flecha instantânea, se as condições de teor de água, de humidade relativa, e duração da carga assim o proporcionar (classe de serviço 3).

Na filosofia de dimensionamento segundo o Eurocódigo 5 (1995-1:2005, 2004), a quantificação das deformações sofridas pelos vários elementos, divide-se em deformações instantâneas e finais, e dentro destas, subdivide-se nas provocadas pelas acções permanentes e nas resultantes das acções variáveis.

Geralmente, calcula-se a deformação em função da deformação instantânea, afectando-a de um factor que atende à fluência que a madeira apresenta ao longo da sua vida. Assim, a deformação final, provocada por uma acção deverá, em princípio, ser calculada por:

$$u_{fin} = u_{ins} (1 + k_{def}) \quad (5.24)$$

Onde k_{def} é um factor que tem em conta o aumento da deformação ao longo do tempo em consequência do efeito combinado da fluência e do teor de água.

Deverão, em princípio, ser usados os valores de k_{def} incluídos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Valores de K_{mod} para madeira maciça (fonte: Adaptado 1995-1:2005, 2004)

Material	Norma	Classe de serviço	Classe de duração das acções				
			Acção permanente	Acção de longa duração	Acção de média duração	Acção de curta duração	Acção instantânea
Madeira maciça	EN 14081-1 (2005)	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Tabela 5.2 Valores de k_{def} para madeira maciça (fonte: Adaptado 1995-1:2005, 2004)

Material	Norma	Classe de serviço		
		1	2	3
Madeira maciça	EN 14081-1 (2005)	0,60	0,80	2,00

5.4.3.2.3 Flechas Máximas Admissíveis

As principais razões que justificam a limitação das deformações admissíveis prendem-se com exigências a nível (Negrão, et al., 2009):

- de uso e de aspecto – limitar anomalias visuais evitando ondulação do pavimento;
- funcionais – evitar danos em elementos não estruturais tais como paredes divisórias, portas, janelas, etc.;
- equipamentos – garantir o funcionamento apropriado de equipamentos, canalizações, instalação eléctrica, ar-condicionado, etc..

A verificação dos Estados Limites de Utilização realizada consta de um modo geral em verificar se a flecha máxima da madre ultrapassa o máximo admissível de $\frac{L}{200}$. Esta verificação é portanto uma verificação simples.

$$y_{\max} = \frac{L}{200} \quad (5.25)$$

Mas antes é necessário verificar a deformação inicial para as acções variáveis, através a seguinte expressão (6.45):

$$u_{2,ins} \leq \frac{L}{300} \quad (5.26)$$

6



DIAGNÓSTICO E METODOLOGIA DE INTERVENÇÃO.

“POUSADA MEDIEVAL DA GRALHEIRA” – CASO DE ESTUDO

6.1 INTRODUÇÃO

No presente capítulo faz-se um enquadramento histórico do edifício estudado “Pousada Medieval da Gralheira”, caracterização arquitectónica e inspecção e diagnóstico de modo a permitir o levantamento de dados relevantes à futura análise do comportamento estrutural e estado de conservação das estrutura de madeira.

Com o objectivo de conhecer as características mecânicas, realizou-se uma campanha de ensaios destrutivos e não destrutivos, no pavimento e cobertura de madeira, cuja oportunidade surgiu pelo facto do edifício em estudo existente ser sujeita a uma demolição parcial por parte dos donos de obra.

Os ensaios mecânicos realizados em laboratório com provetes isentos de defeitos, que resultaram da madeira retirada do pavimento, foram executados com a finalidade de determinar as propriedades físico-mecânicas da madeira, nomeadamente a massa volúmica, tensão de rotura à flexão na direcção do fio e módulo de elasticidade na direcção do fio.

Em simultâneo, foram realizados ensaios não destrutivos, com recurso ao Resistógrafo e Humidímetro, de modo a avaliar o estado de conservação da madeira. A análise da do pavimento em

madeira foi completada com a realização de um modelo numérico com o intuito de analisar o comportamento da estrutura.

6.2 OS CAMINHOS DE SANTIAGO. ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

A cultura da madeira está desde há muito associada às construções antigas e de grande importância ao nível cultural no nosso país. Representação deste aspecto pode ser encontrada nos Caminhos de Santiago e nas pousadas seculares existentes ao longo de todo o seu percurso. No Caminho português podemos destacar a Pousada da Gralheira, no concelho de Vila Pouca de Aguiar, como um dos marcos presentes neste trajecto.

A história em torno dos caminhos de Santiago vem desde o ano 44, data em que Santiago foi preso e decapitado a mando do Rei Herodes Agrippa, segundo a história católica. Dois dos seus discípulos roubaram o corpo e embarcaram numa viagem até à Galiza e aí o sepultaram.

Não há uma data concreta para a descoberta do sepulcro mas crê-se que entre as datas de 813 e 820. Conta-se que se observou durante noites seguidas “Chuva de Estrelas”. O Bispo de Iria Flávia avisado deste fenómeno celeste, dá ordem para realizarem as escavações e encontrou os ossos do Santo Santiago e dos seus discípulos (www.cpsisantiago.pt).



Figura 94 - Caminho Português interior (Fonte: www.chaves.pt)

Foi erguida uma capela em honra deste santo no “Campus Stellae” (de onde provém a palavra Compostela) pela sua resistência cristã aos ataques dos Mouros.

À partir do ano 1000 surgem os primeiros relatos de peregrinos que viajam até Compostela tornando-se um dos principais centros de peregrinação cristã daquela época a par de Roma e Jerusalém.

Aqui surge, também, a popularização do Caminho Francês, sendo este o mais utilizado, aquando da publicação do primeiro guia do peregrino o qual é associado ao Papa Calixto II, que anuncia o dia do Santo

Santiago a 25 de Julho, num domingo. Após este anúncio chegam grupos de peregrinos vindos de toda a Europa desenvolvendo as cidades por onde iam passando.

Assim, o Caminho de Santiago, apelido desta forma pelo Papa Calixto II, “é em terra o desenho da Via Láctea, porque esta rota se situa diretamente sob a Via Láctea que indica a direção de Santiago, servindo assim, na Idade Média, de orientação durante a noite aos peregrinos”.

De entre os vários caminhos possíveis para ir ao encontro de Santiago de Compostela, o mais conhecido é o Caminho Francês, pois é este que atravessa a fronteira Franco-Espanhola e atravessa todo o norte de Espanha.

Um dos possíveis caminhos é nomeado como Caminho Português Interior de Santiago o qual se estendo por uma distância de 205 Km, em território português, o qual avança por território espanhol até chegar a Santiago de Compostela. Este traçado atravessa os municípios de Viseu, Castro Daire, Peso da Régua, Santa Marta de Penaguião, Vila Real, Vila Pouca de Aguiar e Chaves.



Figura 95 - Traçado do Caminho Português interior (foto: Andrade, M.,2013)

O Caminho Português Interior de Santiago tem o privilégio de dar a conhecer aos peregrinos o antigo caminho medieval do interior de Portugal, o que contribui para a preservação dos espaços históricos, tal como a manutenção da memória histórica e a cultura das tradições.

Assim, o Caminho de Santiago percorre esta zona numa viagem suave e agradável, vivendo profundamente um ambiente rural e áreas naturais classificadas na Rede Natura 2000. Nesta caminhada é possível observar as Serras do Alvão e da Padrela, tal como as extensões de terrenos agrícolas e das floresta que os rodeiam. Este caminho coincide com uma via medieval, referenciada no Séc. XIX, que ligava o país de Norte a Sul. Esta vida medieval era conhecida como Estrada Régia, a qual atravessava o Parque Termal de Pedras Salgadas.

Ao longo desta caminhada é, ainda possível, observar o Castelo Roqueiro de Aguiar da Pena, situado no cimo de uma rocha granítica, de onde se pode observar todo o vale. Aqui temos um vislumbre sobre todas as albergarias, pousadas e igrejas que pertencem ao caminho de Santiago.

Em Abril de 1255, foi dada *Carta de Foro* de Gralheira [P.M.H.L.C., I Vol., p.650] (Vila Pouca de Aguiar), por D. Afonso III; nessa carta podemos confirmar a existência de uma pousada naquela zona rural:

“...faço carta de firmeza perpétua a vós, povoadores de Gralheira que aí quiserdes povoar. Dou-vos quanta herdade aí tenho, a qual divide pela água das Cortinhas, entra no Corgo, vai pela costa acima e dirige-se para Pena Cabral; ... Dareis este pão desde o dia primeiro de Agosto até a festa de São Miguel de Setembro na eira. ... Que não seja cavaleiro nem de alguma ordem religiosa. Nem o meu Rico-homem nem o seu prestameiro façam pousa na vossa vila nem o seu mordomo entre aí para vós fazer injúria.”



Figura 96 - Caminho de Santiago, perto da aldeia de Gralheira, e a Pousada Medieval (foto: Andrade, M., 2013)

Segundo a história, o traçado entre Vila Real e Chaves era um dos mais complicados de realizar. Nas portas da aldeia de Gralheira, existia uma pousada onde os peregrinos podiam curar as suas dores. Esta encontra-se, ainda hoje, em frente ao cruzeiro que ainda se mantém de pé e localizada na Rua da Estalagem. No percurso dos Caminhos de Santiago o descanso era uma das condições fundamentais para os peregrinos. A construção das pousadas para este efeito era executada principalmente por uma estrutura de alvenaria de pedra e madeira que ao longo dos tempos sente a sua durabilidade contaminada. Assim, cabe ao estudioso da área da reabilitação ajudar na sua conservação para que estes marcos não se percam para os muitos peregrinos que todos os anos realizam este percurso.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO – CASO DE ESTUDO

6.3.1 Introdução

“A casa-bloco do Alvão, consiste, fundamentalmente, num edifício similar à “casa latina” que Veiga de Oliveira identificou em França. Tem um piso térreo, destinado ao gado bovino e suíno, adega e arrumações e, por cima, o andar de habitação. Mas para além desta estrutura, a casa engloba outras dependências anexas, como lagares, currais, estábulos, palheiros, espigões e eiras cobertas e descobertas, agrupadas em torno de pátios de lavoura, por vezes cercados de muros. Este modelo de habitat rural aproxima-se muito da casa rural medieval” (Salavessa, 2004).

A construção da arquitectura do passado revela-nos um “saber” decorrente de um apuramento de formas de construir que perduraram durante vários séculos, recorrendo a um leque restrito de matérias, de natureza telúrica, de entre os quais se destacam a pedra e a madeira. Através deste “saber”, conseguimos encontrar a essência, princípios e a universalidade de uma prática, concretizados nas diversas formas de resolver os vários desafios que lhe impuseram (Cóias, 2009).

É justamente nesse conhecimento que reside a intemporalidade e a actualidade da construção tradicional. Designamos construção tradicional ao conjunto de procedimentos relacionados com determinadas formas de manuseamento de certos materiais, resultantes em técnicas e sistemas de construção de edifícios até às primeiras décadas do século XX, período a partir do qual se dá início a uma lenta incorporação de novos materiais e conhecimentos científicos.

A construção tradicional é pois o resultado de um “saber” empírico, traduzido numa relação íntima do homem com os materiais, revelada na capacidade inventiva e perícia de mestres construtores (Cóias, 2007). Nas formas rudimentares dos diversos exemplos que ainda persistem, podemos observar um edifício e as distintas problemáticas que envolvem a sua execução, no que diz respeito às estruturas, aos revestimentos, as impermeabilizações, caixilharias e até as instalações. Numa abordagem mais específica, a construção tradicional materializa-se em tantas formas quantas as épocas, os estilos, os contextos geográficos e socioculturais.

6.3.2 Caracterização arquitectónica

“A diversidade de soluções de habitação são o reflexo dos meios de produção usados, as diferenças do meio físico, factores culturais e formas construtivas que perduraram ao longo dos séculos e ainda do comportamento humano face às mudanças e forma de vida destes” (Salavessa, 2004).

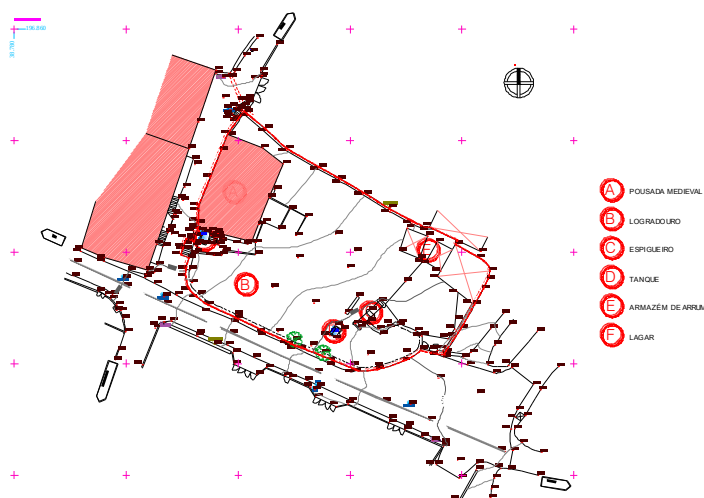


Figura 97 - Levantamento topográfico do local de implantação do edifício

A caracterização arquitectónica da *Pousada Medieval da Gralheira*, em Vila Pouca de Aguiar, é então, um edifício de grande importância por fazer parte da passagem do "Caminho de Santiago", o que de certa forma se torna inseparável de todos os edifícios da envolvente, tendo como base uma raiz de arquitectura medieval e com valor histórico e cultural.



Figura 98 – Aspectos exteriores e interiores do edifício (foto: Andrade, M.,2013)

É apresentado o levantamento topográfico, (Figura 98) que consiste na representação, planimétrica ou altimétrica, em carta ou planta dos pontos notáveis assim com dos acidentes geográficos e outros pormenores de relevo de uma porção de terreno. Está igualmente representada a implantação do edifício.

O sequeiro, o espigueiro e a eira (logradouro), formam outro conjunto destinado ao armazenamento e transformação de cereais e outros produtos agrícolas. Nas traseiras do sequeiro fica instalado o moinho e, logo ao lado, o tanque.

Neste estudo, como em outros similares torna-se imprescindível efectuar um levantamento arquitectónico, através de levantamento topográfico, plantas, cortes e alçados que tornam a volumetria e a envolvente claramente tipificadas.

Pela observação da organização deste edifício e também pelo relato dos seus proprietários conclui-se que esta caracteriza-se por uma arquitectura elementar, sendo a sua construção composta por paredes de alvenaria de pedra aparelhada com os silhares assentes a seco e cobertura constituída por estrutura de madeira revestida a telha. Em termos de dimensões, apresenta uma forma rectangular, com acesso exterior por escada em pedra (Figuras 96).

Em termos de espaço interiores, na cave, normalmente ficavam as cortes arrecadações e no primeiro andar, a cozinha, sala e quartos (Figuras 99).

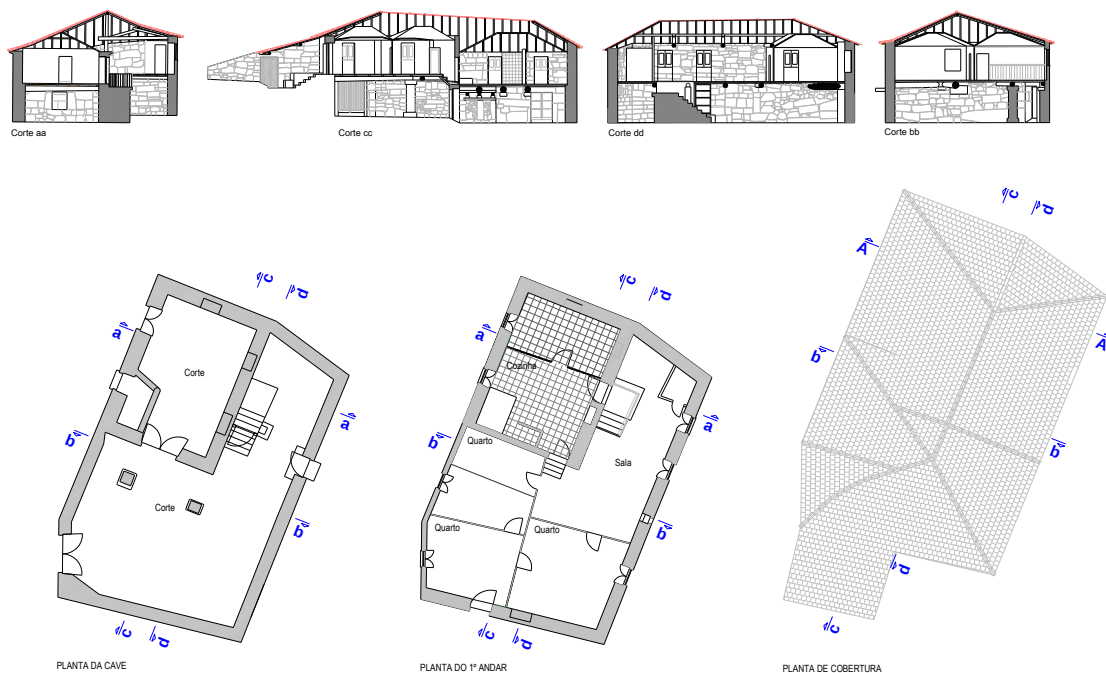


Figura 99 - Levantamento arquitectónico do edifício: plantas de apresentação dos pisos e cobertura e cortes

Assim, regra geral, a “*Pousada Medieval da Gralheira*”, em termos de organização funcional do espaço interior, tal como referido anteriormente, era constituído pelas seguintes peças:

- No piso térreo, localizavam-se a antiga loja do ferreiro com “janela vial” e com vão de ligação interior (actualmente entaipado) à cavalaria, a corte, a arrecadação de alfaia agrícola e uma zona de armazenamento de produtos agrícolas (batata, cereais, castanha, entre outros);
- O acesso ao sobrado, sempre que a topografia permite, faz-se directamente da rua com a cota semelhante; aonde a rua atinge cota superior, a comunicação ao primeiro andar é feita através de uma escada em granito exterior, paralela à fachada, com um alpendre em madeira e guarda em madeira; é interessante verificar que, na casa de traços quinhentistas, o acesso ao andar superior da habitação (talvez do próprio ferreiro) se fazia pela fachada posterior do edifício dessa época;
- No andar superior, encontra-se a cozinha com forno, uma sala com dois a três quartos abertos para a sala com divisórias em tabuado e o mobiliário rustico;
- A corte ocupa (na altura em que se fez o levantamento) a generalidade de toda a área térrea e tem acesso independente da habitação, o pavimento é normalmente em terra batida, sendo as divisórias em alvenaria de pedra para separação dos animais, que eram normalmente vitelos e porcos;
- A cozinha, como referido anteriormente, situa-se no primeiro andar, em compartimento de acesso independente do resto da habitação, com lareira encostada a um ângulo da casa e dotada de “chupão” e chaminé, e é constituída por uma laje de granito, mais alta ligeiramente que o sobrado. O forno de cozer o pão fica a um canto da cozinha, de um modo geral, incorporado na casa, perto da lareira, sobre esta, pende o caniço, a caldeira, suspensa por cremalheira, e os enchidos e, perto da lareira, um escano;
- Os quartos são separados por paredes em madeira, ou seja, panos de “tabuado” vertical e são mobilados com uma cama, uma arca para a roupa, por vezes um guarda-fatos e lavatório de ferro ou uma bacia de água;
- Na sala, normalmente, existe uma mesa com cadeias, arcas e por vezes uma cama.

Apresentam-se anteriormente os cortes (Figura 99), que resultam da informação obtida com o levantamento arquitectónico, que constitui um trabalho moroso que foi elaborado por topógrafo com experiência neste domínio da arquitectura tradicional da região.

Quando se trabalha com este tipo de edifícios com décadas de história e com registos valiosos das múltiplas intervenções de conservação, consolidação e ampliação é possível mapear em planta e alçados

(Figura 98) o “percurso histórico” do edifício, as diferentes fases da construção, neste caso, do Edifício “Pousada Medieval da Gralheira”, desde o tempo Medieval até ao século XIX.

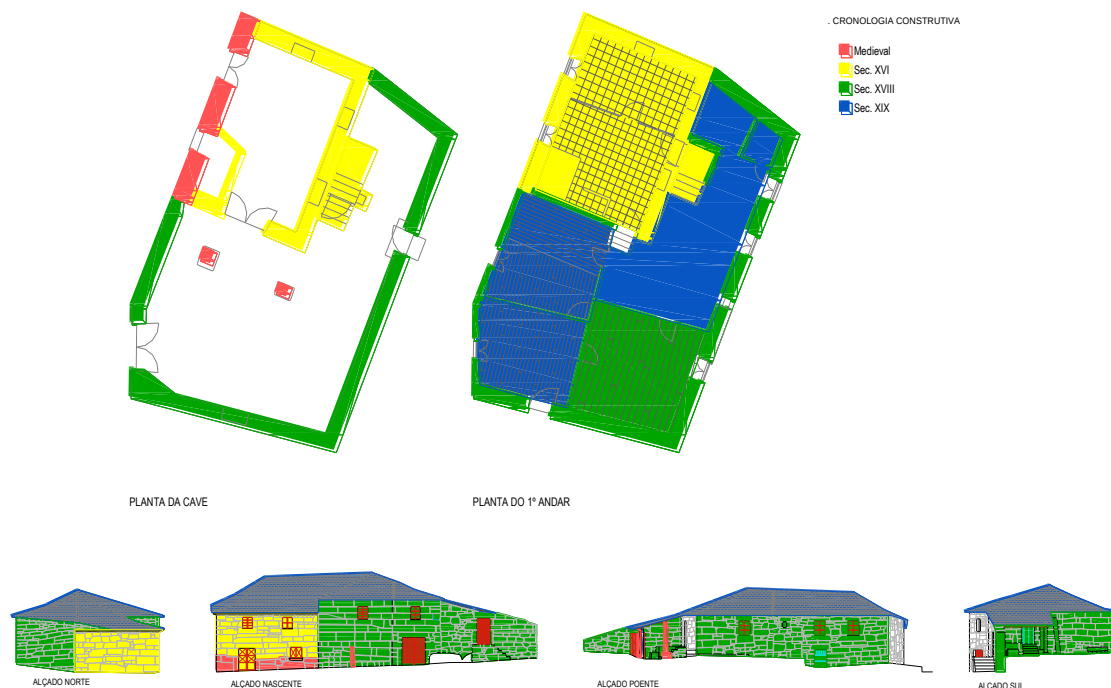


Figura 100 - Mapeamento construtivo

6.3.3 Caracterização estrutural

Os edifícios antigos são todos aqueles que foram construídos antes do aparecimento do betão, que surgiu no início dos anos 40 do século XX, alterando completamente a forma e as técnicas com que os edifícios eram construídos até então. Até ao aparecimento do betão, ao longo de vários séculos mantiveram-se padrões semelhantes na construção, utilizando apenas um pequeno número de materiais naturais pouco modificados (Património, 2012).

No levantamento e caracterização estrutural de um edifício são necessárias várias fases: a pesquisa do projecto original do edifício, ou na sua ausência, do registo das intervenções ocorridas ao longo dos tempos, o levantamento dos materiais estruturais, a sua caracterização física e, se possível, mecânica e, ainda, o levantamento e desenho final dos esquemas estruturais.

Após este trabalho, deverão ser registadas nas plantas estruturais agora desenhadas, os danos estruturais e não estruturais observados. Deverá ser ainda efectuada uma análise crítica da influência dos danos observados no comportamento dos elementos estruturais e, consequentemente, do comportamento estrutural geral do edifício.

A descrição que se apresenta segue uma estrutura composta pelos elementos principais da construção dos edifícios, organizados de acordo com uma hierarquia baseada na sua função e importância dentro do sistema construtivo. Esta estrutura procura ainda aproximar-se do que poderá ter sido a sequência de execução dos trabalhos de construção de edifícios tradicionais.

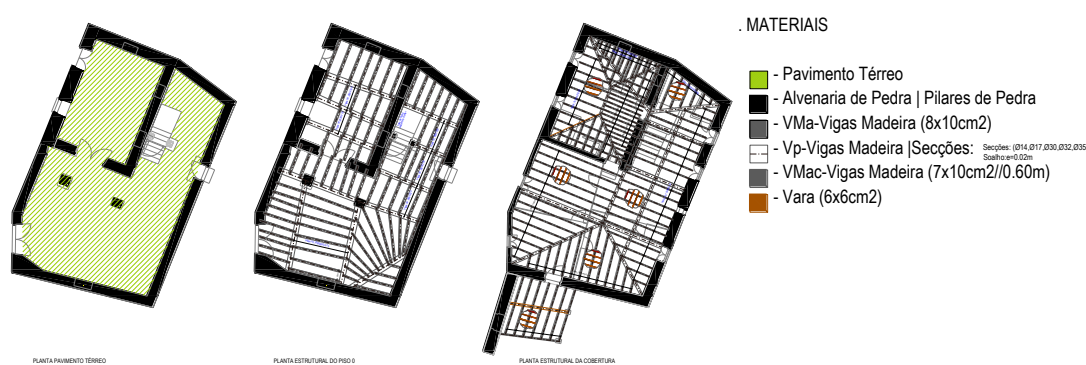


Figura 101 - Plantas do Piso Térreo, planta estrutural do piso 0 e da cobertura

6.3.3.1 Fundações

Uma das características comuns às casas tradicionais do Norte de Portugal, independentemente da data da sua construção, é o tipo de fundações, que se apresentam executadas em alvenaria de pedra, preferencialmente constituída por travadouros ou perpianhos, dispostas de forma a constituírem o alargamento exigido às sapatas, que alcançam as profundidades necessárias até encontrarem terreno firme.

Devido à falta de dados e de meios para efectuar sondagens do terreno de fundação, não foi possível confirmar a profundidade das fundações nem as suas dimensões, embora se considere que estas existem no alinhamento das paredes de alvenaria do piso de rés-do-chão, que atingem o terreno firme e que são executadas com blocos irregulares de pedra.

Deste modo, podemos considerar que a largura e profundidade determinada para as fundações, embora de forma empírica, estão directamente dependentes da qualidade do terreno onde se implanta o edifício.

Appleton, afirma que, as fundações apresentam uma sobrelargura em relação á parede de alvenaria. O material que constitui as fundações é basicamente o mesmo que constitui as paredes de alvenaria de pedra, embora constituída por uma alvenaria mais pobre. Estas para serem identificadas com clareza, necessitam da realização de trabalhos de prospecção, uma vez que pela própria natureza destes elementos de construção, não se encontram acessíveis à observação directa (Appleton, 2003).

Por inspecção visual denota-se que solo que constitui o terreno de fundação é um solo rochoso, não sendo necessário, por isso, recorrer a fundações que assentem num engradado de troncos de madeira,

dispostos sobre estacas. Esta técnica construtiva é usada no caso do terreno de fundação ser constituído por aluviões ou argilas.

Sendo assim, as fundações do edifício serão provavelmente constituídas por alvenaria de pedra com uma largura superior à das paredes resistentes. Esta hipótese pode ser confirmada pela observação de construções nas mesmas condições. As fundações do edifício foram construídas da seguinte forma: depois de abertos os caboucos, estes enchem-se até atingirem aproximadamente o nível do terreno, a fim de se estabelecer o ensoleiramento.



Figura 102 - Fundações contínuas das paredes de alvenaria de pedra (foto: Andrade, M.,2013)

6.3.3.2 Paredes Exteriores

“ As fachadas, mais sóbrias e severas no século XVII, mais graciosas e movimentadas no século XVIII, e cujas linhas se simplificam consideravelmente no século XIX, perdendo praticamente os motivos ornamentais e tornando-se pobres e monótonas, compõem-se fundamentalmente de combinações variadas e harmoniosas de janelas, óculos e varandas, sendo estas, umas vezes, individuais e, outras corridas a toda a largura de prédio, dispostas de modo diverso nos seus diferentes pisos.” (Veiga de Oliveira, 1992)

As paredes de alvenaria ou paredes resistentes são paredes que representam um papel relevante na estrutura do edifício, no que se refere a resistência de cargas verticais, nomeadamente as de natureza gravítica, e também a forças horizontais, como por exemplo, o vento e os sismos.

Tal como outros edifícios da época, estas paredes são de grande espessura e constituídas por materiais heterogéneos, resultando assim em elementos rígidos e pesados, cuja principal característica mecânica é a baixa resistência à tracção.

Estruturalmente, as paredes de pedra das fachadas apresentam sempre espessuras consideráveis, pelo facto de serem autoportantes e de grande parte da sua superfície conter aberturas. Decorrente da evolução do desenho das fachadas e das técnicas construtivas, observa-se uma progressiva harmonização

entre as dimensões destas paredes e a configuração geométrica dos elementos construtivos associados aos vãos.

No edifício em estudo, a dimensão das paredes resistentes do piso térreo e piso superior são de 0,70m e são compostas por pedras de granito. A dimensão das do 2º piso, são de aproximadamente 0,50m. Segundo João Segurado, estas paredes são denominadas de paredes de alvenaria aparelhada (Segurado, 1908).



Figura 103 - Parede Exterior de Alvenaria de Pedra (foto: Andrade, M., 2013)

A título de exemplo, refira-se que nas casas datadas do século XIX, a espessura das suas paredes relaciona-se directamente com as dimensões dos vãos e dos elementos que lhes servem de protecção, como portas, janelas e portadas interiores. Assim, para larguras de vãos que rondam 1,25m temos uma espessura de parede dividida em duas partes: 0,20m para a janela, correspondente ao aro da gola, e 0,4 a 0,5m para as portadas, ficando as suas folhas habitualmente em número de duas, perfeitamente ajustadas a estas espessuras.

6.3.3.3 Sobrados

A estrutura dos pisos ou sobrados é constituída por um vigamento de tronco de madeira, que passaremos a designar por paus ralados, com diâmetros que variam entre os 0,14 e os 0,35m e comprimentos que dependem da largura das casas, nunca ultrapassando os 7m.

Segurado, afirma que os paus rolados apresentam-se aparados ou falqueados em duas faces, para receberem os revestimentos do pavimentos e do tecto, podendo nalguns casos, junto às paredes serem utilizadas vigas falqueadas em quatro faces. Antes da colocação, os topos das vigas eram pintadas com tinta de óleo, zarcão ou alcatrão, para sua protecção (Segurado, 1908).

No edifício em estudo, o vigamento encontra-se apoiado nas paredes de alvenaria de pedra, com uma entrega de cerca de dois terços da espessura destas paredes, chegando nalguns casos a apoiar-se em

toda a sua espessura. Os paus rolados são dispostos paralelamente entre si, com afastamentos que variam entre os 50 e os 70 cm.

Esta foi a forma de construir os sobrados durante muitos séculos. Só no início do século XX é possível encontrar exemplos de vigamentos constituído por vigas de madeira esquadriadas, com dimensões que variam entre os 8 a 12 cm de largura, por 10 a 25 cm de altura e espaçamentos entre si nunca superiores a 50 cm.



Figura 104 - Sobrado de madeira apoiado em paredes de alvenaria de pedra (foto: Andrade, M.,2013)

6.3.3.4 Pavimentos e tectos

Os pavimentos são revestidos por um tabuado – soalho – normalmente em madeira de carvalho, com espessuras que variam entre os 2 cm e os 5 cm, larguras entre os 12 e os 30 cm e comprimentos que podem alcançar os 10m. As habitações mais antigas apresentam, regra geral, um tabuado de maiores dimensões, que vai diminuindo ao longo do século XIX.



Figura 105 - Soalho (foto: Andrade, M.,2103)

Na sua forma de execução tradicional, as tábuas de soalho, depois de assentes, unidas por encaixe (em forma de macho-fêmea ou meia madeira, ou “sôlho à inglesa”) e pregadas ao vigamento, eram afagadas manualmente a fim de se obter uma superfície uniforme.

Até aos finais do século XVIII, os tectos no norte de Portugal apresentam-se constituídos tradicionalmente em madeira, utilizando um tabuado directamente pregado ao vigamento, em forma de forro de esteira, ou sobreposto em duas camadas, em forma de “saia e camisa”, (Figura 106).

O tabuado, em boa madeira de castanho, toma a forma de masseira ou caixotões, sendo de forma simples, sem molduras ou ricos ornatos em talha.

Esta tradição nunca desapareceu, tendo antes diminuído drasticamente a sua utilização, em resultado da sua progressiva substituição pelo estuque, continuando apenas a ser utilizada em alguns casos muito particulares.



Figura 106 – Tecto tipo “Saia Camisa” (foto: Andrade, M.,2013)

A invenção de uma técnica, para suporte dos revestimentos e acabamentos em gesso dos tectos, que consiste na concepção de uma estrutura de ripas trapezoidais de pequena dimensão – fasquios – dispostas em forma de grelha, constitui uma das principais evoluções do sistema construtivo.

6.3.3.5 Coberturas

“Pode-se dizer que, salvas raríssimas excepções, até meados do século XIX, as casas do norte de Portugal têm telhados de quatro águas de telha e caleira portuguesa – o que significa que os oitões terminam horizontalmente, na mesma linha do beiral frontal. Nas casas mais estreitas, esse telhado é tão baixo que não permite o aproveitamento do seu vão para qualquer sótão”. (Salavessa, 2004).

As estrutura destes telhados é de origem ancestral, tendo a sua forma rudimentar perdurado e até coexistido com soluções de asnas mais complexas, devido à simplicidade da sua construção e ao facto de

permitir o aproveitamento do vão da cobertura que se encontra liberto de elementos estruturais. Esta estrutura é constituída por uma armação simples de duas barras ou pernas, dispostas em forma de tesoura (unidas superiormente a meia madeira) e apoiadas numa viga transversal ou linha que, por sua vez, se apoia nas paredes de alvenaria de pedra.



Figura 107 - Estrutura de madeira na cobertura (foto: Andrade, M., 2013)

Frequentemente, esta armação é travada transversalmente por outra barra de menor dimensão – nível – colocada a cerca de dois terços da altura, e apoiada nas pernas ou tesoura, por encaixe a meia madeira. Para travamento longitudinal, localizam-se superiormente, ao nível da cumeeira e meio vão das duas pernas, o pau de fileira e as madres, respectivamente.

Na transição das vertentes principais com a a tacaniça, temos uma viga – rincão – que se apoia na fileira e no contrafrechal situado entre as paredes de meiação e as paredes de fachada.

Todas as barras que compõem esta armação são em tudo semelhantes às vigas dos sobrados – paus rolados – embora algumas apresentem diâmetros inferiores.

Sobre estas estruturas são pregadas as varas ou caibros, também realizadas com troncos de madeira de menor dimensão, aparados em duas faces, sobre os quais está pregado longitudinalmente o tabuado de guara pó, ao qual é finalmente pregado um ripado, para o apoio das telhas.

6.4 FUNCIONAMENTO ESTRUTURAL

O comportamento estrutural de uma estrutura é influenciado por três factores principais: a forma e as ligações da estrutura, os materiais de construção e as forças e deformações impostas.

O comportamento real de uma construção é normalmente tão complexo que obriga a que seja representado através de um “esquema estrutural” simplificado, ilustrando o modo como a construção

transforma as acções e, tensões e como garante a estabilidade, podendo o esquema original ter sido alterado devido a danos (fendas, etc..), ou alterações da construção.

O esquema adoptado para análise estrutural resulta habitualmente de um compromisso entre um esquema próximo da realidade, mas demasiado complexo para calcular, e um esquema simples de calcular, mas demasiado afastado da construção real.

Estruturalmente o edifício é suportado por paredes periféricas de alvenaria de pedra, as fachadas. Interiormente esta é composta por paredes de pedra (cave) e também paredes interiores em tabuado (andar).

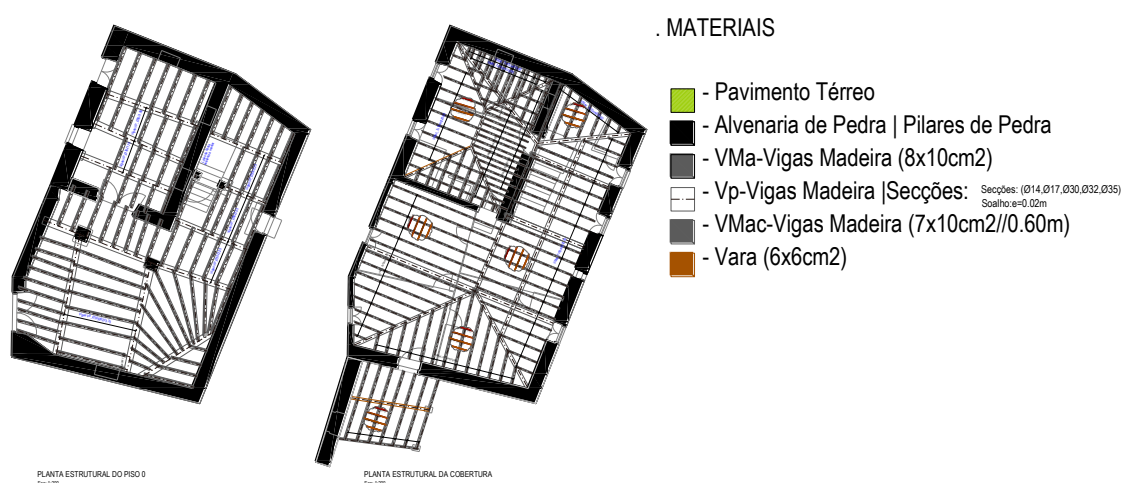


Figura 108 - Estrutura de madeira: Plantas Estruturais

Os pavimentos, como referido em 6.3.3.4, são constituídos por vigamentos de madeira com secção rectangulares 8x10 cm2 e são revestidos por soalho de madeira com 2cm de espessura.

Os vigamentos encontram-se por sua vez apoiados em vigas de madeira com secção varável pois resultavam de “troncos de árvores”, porém a secção média vai variando entre Ø14cm a Ø35cm conforme plantas estruturais (Figura 108). Estas vigas, por sua vez, estão apoiadas nas paredes de fachada de alvenaria de pedra e nos pilares de pedra (Figura 109).

A Estrutura de cobertura, como referido em 6.3.3.5, têm a sua forma rudimentar perdurada e até coexistindo com soluções de asnas mais complexas, devido à simplicidade da sua construção e ao facto de permitir o aproveitamento do vão da cobertura que se encontra liberto de elementos estruturais.

Esta estrutura é constituída por uma armação simples de duas barras ou pernas, dispostas em forma de tesoura (unidas superiormente a meia madeira) e apoiadas numa viga transversal ou linha que, por sua vez, se apoia nas paredes de alvenaria de pedra. Em termos de secções, estas são variáveis, sendo

pois resultavam de “troncos de árvores”, todavia a secção média vai variando entre Ø14cm a Ø35cm conforme plantas estruturais (Figura 108).



Figura 109 - Vigamento do pavimento de madeira (foto: Andrade, M.,2013)



Figura 110 - Apoio da asna de madeira em parede de pedra e varas assentes em vigas de madeira (foto: Andrade, M.,2013)

Sobre as vigas de madeira que constituem as asnas de madeira, apoiam outras vigas com secção 7x10 cm² afastadas a 60cm. Sobre estas umas varas 6x6cm² onde assenta a telha (Figura 110).

Esta estrutura interna de paredes em tabuado, juntamente com os pavimentos e as coberturas de madeira, contribui fortemente para o comportamento dos edifícios, particularmente às acções horizontais. Sendo assim, é importante assegurar uma boa ligação entre estes elementos para garantir um bom e estável comportamento global.

6.5 ESTADO DE CONSERVAÇÃO / DANOS OBSERVADOS

O registo pormenorizado dos danos revela-se de grande utilidade pois permite uma visão global dos problemas, auxiliando na avaliação do seu interrelacionamento, assim como o conhecimento completo dos

materiais que compõem o edifício e dos esquemas estruturais, permitindo estabelecer uma correlação entre os elementos construtivos e os fenómenos observados (Ornelas, et al., 2006).

A visita à obra permitiu a detecção de algumas anomalias existentes na estrutura do pavimento de madeira e cobertura, tratando-se de uma análise visual, como referido em 4.4.2, em que (Brites, 2011) refere que a inspeção visual é um método usual de inspeção e diagnóstico para estruturas de madeira devido à facilidade de examinação pois através do contacto directo ou a uma curta distância permite a detecção e registo de grande parte das anomalias, defeitos e ataques existentes nas peças (Brites, 2011).

A impossibilidade de levantamento de soalhos para inspeção das partes superiores dos vigamentos e a impossibilidade de fazer uma inspeção visual cuidada nos elementos que compõe a cobertura foram obstáculos que impediram a realização de um “Estado de Conservação” não pormenorizado no caso da cobertura.

Desta forma, na realização do relatório de inspeção, no âmbito do tratamento e sistematização da informação, optou-se por apresentar de uma forma gráfica de modo a ter uma facilidade de exposição e compreensão da informação recolhida.

Além desses esquemas relativos ao sistema construtivo, foram também elaborados mapas de danos em que é possível visualizar a informação relativa às diferentes patologias identificadas e o local da sua ocorrência.

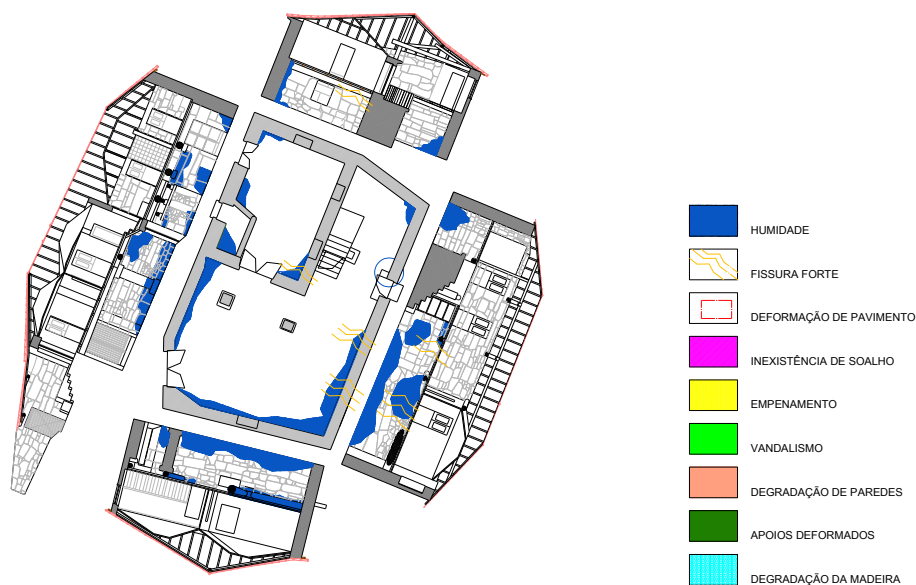


Figura 111 - Levantamento de Danos na planta da Cave

Com o resultado da entrada de água pela cobertura ao longo dos anos, o pavimento e a cobertura apresentam alguns danos, verificando-se em particular a existência de zonas de soalho com degradação

acentuada, algumas vigas que entraram em ruína e presença de manchas de humidade tanto no tabuado da cobertura, como do soalho. No Inverno, podemos ainda, encontrar um lençol de água, no andar térreo. Através da informação gráfica (Figura 111) verifica-se uma percepção mais completa dos problemas existentes, fornecendo uma percepção mais completa dos danos observados. No piso da cave (térreo) observou-se a existência de paredes com grande presença de humidade, assim como em algumas vigas de madeira do pavimento, fruto precisamente da entrada de água pela cobertura e também pelas fissuras fortes em algumas paredes exterior junto da escada interior (Figura 112).

A presença de degradações nas caixilharias de janelas e portas, a presença de manchas no tabuado da cobertura, a facilidade de quebra das vigas ou a mudança de cor das madeiras são sinais óbvios da presença de patologias nessas peças.



Figura 112 – Esq: Fissura forte junto ao apoio das escadas interiores; Dir: Humidade nos elementos de madeira do pavimento e fundações



Figura 113 - Levantamento de Danos na planta da piso

De facto, são alguns problemas que foram detectados nos elementos de madeira, tanto no pavimento, como na cobertura, sendo de destacar a presença de humidade, fungos de podridão, fissuras de grande espessura, apoios parcialmente degradados, inexistência de soalho, empenamento do tabuado vertical.

Com a informação gráfica, (Figura 113), verifica-se uma percepção mais completa dos problemas existentes, fornecendo uma percepção mais completa dos danos observados no 1º andar, piso e cobertura.

Com esta informação gráfica tem-se uma percepção em que o ponto “mais fraco” a apontar, localiza-se junto da janela da sala, que devido ao mau isolamento às intempéries, fez com que alguma humidade entrasse e prejudicasse partes do pavimento e cobertura mais próximos (Figura 114).

Algumas das patologias mais comuns nos vigamentos deste piso são as excessivas deformações encontradas a meio vão dos elementos e também problemas de empenamentos e fendas existentes em algumas peças.

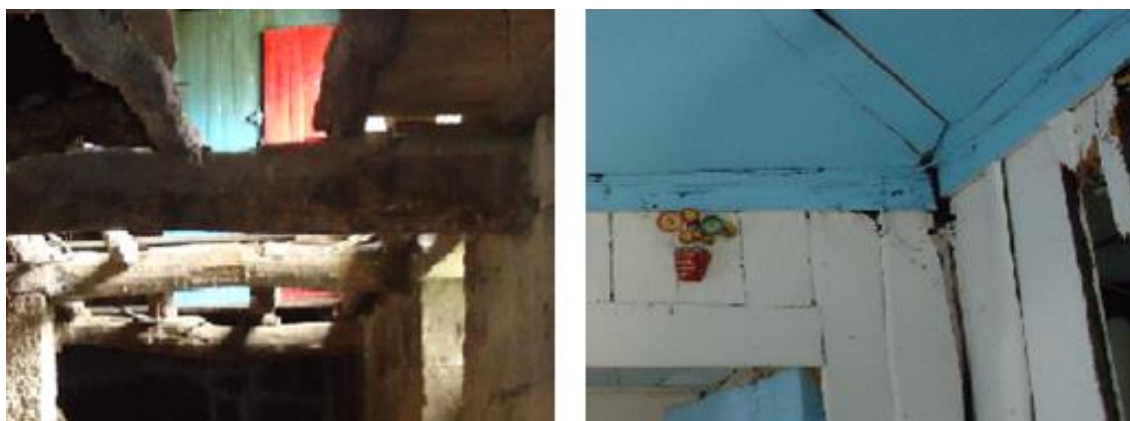


Figura 114 - Esq: Inexistência de soalho; Dir: Humidade na cobertura (foto: Andrade, M.,2013)



Figura 115 - Esq: Deformação excessiva do pavimento de madeira; Dir: Degradação do apoio da viga (foto: Andrade, M.,2013)

Estas deformações acontecem muito por causa da degradação do apoio, que por ser deficiente, devido à degradação da parede, perda de secção do elemento de madeira, acaba por sofrer um assentamento diferencial arrastando consigo as vigas que nas paredes se apoiam, deformando-se globalmente (Figura 114).

Em algumas zonas, nomeadamente nos apoios, verifica-se a ocorrência de um estado de degradação mais avançado nomeadamente devido à ocorrência de fungos de podridão e degradação da parede de apoio das vigas de madeira. Este facto é devido essencialmente à falta de estanquidade à água nessas zonas e à pouca ventilação existente (Figura 116).



Figura 116 - Esq: Fungos e Podridão branca; Dir: Degradação do apoio da viga de cobertura (foto: Andrade, M., 2013)

6.6 ENSAIOS IN SITU NÃO DESTRUTIVOS

6.6.1 Introdução

O que permite direccionar a inspecção de modo a obter a informação relevante e interpretar de forma correcta as observações efectuadas, resulta essencialmente numa avaliação correcta da estrutura e conhecimento do material. Existem algumas técnicas auxiliares de diagnóstico, capazes de fornecer informação útil especialmente para esclarecer algumas questões suscitadas pela observação visual e análise directa da madeira (com um martelo e formão, técnica descrita em 4.5.1). Apesar de auxiliares muito úteis para uma definição mais rigorosa da resistência dos elementos de madeira, a utilização destes equipamentos resulta da interacção com as técnicas não destrutivas não tradicionais, não fazendo sentido a sua utilização independente (Machado, et al., 2000).

Neste ponto irá apenas ser abordada a vertente não destrutiva dos ensaios *in situ*, e os meios de avaliação baseiam-se genericamente na realização de um conjunto de técnicas para identificar possíveis danos estruturais que comprometam o seu desempenho. A opção por esta abordagem deve-se à utilidade que estes prestam quando se realiza a inspecção de estruturas com considerável valor patrimonial e histórico, pois

permitam fornecer dados sobre as características mecânicas dos elementos a ensaiar sem comprometer a integridade da estrutura.

Assim, para avaliar de forma expedita e pouco intrusiva o estado de conservação dos elementos de madeira e as características físicas e mecânicas dos respectivos elementos estruturais, realizaram-se alguns ensaios não destrutivos, através da utilização de alguns dos equipamentos referidos no capítulo 4, Martelo (técnicas de inspecção tradicionais), Resistografo e Humidímetro.

6.6.2 Técnicas de inspecção tradicionais

Como já foi referido, capítulo 4.6, antes de propor qualquer solução de intervenção numa estrutura existente, há que elaborar um diagnóstico cuidadoso da estrutura existente. Esta abordagem inicial permite começar a fazer um primeiro juízo sobre o estado de conservação das estruturas de madeira em geral e daí partir para uma avaliação mais detalhada.

Assim as técnicas de inspecção tradicionais permitem uma avaliação directa, tanto visual como tátil, da zona de madeira degradada. Procuram-se os sinais que podem ter deixado os agentes bióticos na superfície de madeira e é dada especial ênfase aos locais críticos e de risco elevado.



Figura 117 - Utilização de martelo na avaliação de danos (foto: Andrade, M.,2013)

Os instrumentos incluídos neste grupo são também uma ferramenta essencial à observação visual, proporcionando uma melhor identificação e caracterização dos elementos de madeira e do espaço envolvente.

Assim, durante a inspecção com o uso do martelo foi possível avaliar de forma expedita a existência de danos em elementos estruturais de madeira (Figura 117). A comparação entre o som originado pelo embate de um martelo numa peça sã e numa deteriorada, permite perceber a existência de partes degradadas (vazios, degradações internas, fendas, etc.) e assim perceber o estado de degradação.

6.6.3 Resistógrafo

6.6.3.1 Equipamento utilizado

O Resistógrafo foi utilizado, de modo a detectar zonas de degradação biológica nos elementos, existência de fendas e vazios que não são visíveis por inspecção visual, assim como variações de densidade ao longo da secção da peça, procurando-se obter um registo desenhado da variação da resistência à perfuração (Dias, 2008).

Com esse objectivo utilizou-se um aparelho resistógrafo, modelo F-400S, da marca IML (Figura 118). O ensaio de perfuração controlada consiste na introdução de uma agulha que realiza um micro-furo, com uma velocidade constante, medindo a resistência oferecida pela madeira à rotação e à progressiva penetração em que o perfil da peça de madeira é registada em papel. Este registo permite detectar zonas de madeira com variações anormais de densidade devidas a descontinuidades físicas (fendas ou degradação biótica).



Figura 118 - Utilização de resistógrafo (foto: Andrade, M.,2013)

Estes resultados são de interpretação simples e proporcionam informação qualitativa de grande interesse. Isto deve-se ao facto da informação ser apresentada num registo desenhado da variação da resistência à perfuração, permitindo reconhecer variações de densidade ao longo das secções dos elementos estruturais, anéis de crescimento, zonas de degradação biológica, fendas e vazios existentes nas peças, normalmente não visíveis por inspecção visual (Dias;2008).

(Freitas, 2012),corrabora dizendo que esta técnica se apresenta como um método de inspecção não destrutivo bastante interessante para a aplicação sobre estruturas em serviço, principalmente quando estas têm interesse patrimonial. Isto porque as perfurações realizadas são quase impercetíveis e sem qualquer influência na resistência mecânica da peça, permitindo assim detetar defeitos internos, variações de

densidade e seções dos elementos estruturais, quando tal não é possível medir ou avaliar visualmente de forma direta.

6.6.3.2 Resultados obtidos

O resistógrafo foi utilizado para se conhecer o estado de conservação dos elementos de madeira que constituíam o edifício.

Esse aparelho foi utilizado em zonas especificamente escolhidas do pavimento e cobertura com o objectivo de confirmar se o bom estado de conservação aparente da maioria dos elementos estruturais de madeira, obtido através da inspeção visual e utilização do martelo, correspondia a um efectivamente a um bom estado de conservação estrutural, equivalente à totalidade da seção transversal das peças.



Figura 119 - Localização dos pontos onde foram realizados os ensaios com o resistógrafo (foto: Andrade, M.,2013)

Foram realizados no total 9 ensaios com este equipamento (Figura 119), ao longo do piso e cobertura, tendo apresentado resultados com uma grande homogeneidade na gama de valores obtidos, existindo em alguns casos degradações superficiais e pontualmente, degradações internas.

Os resultados obtidos, com um registo desenhado da variação da resistência à perfuração, proporcionaram informação qualitativa de grande interesse. Nas figuras seguintes é possível observar a saída de resultados do Resistograph em algumas vigas de pavimento e cobertura (Ver anexo A04).

A (Figura 120), refere-se a uma inspecção realizada numa viga no pavimento, R1 junto ao apoio de modo a perceber o estado de conservação do apoio. Como é possível verificar pela análise gráfica, o elemento ensaiado encontrava-se em bom estado de conservação e sem aparente degradação,

apresentando apenas uma ligeira degradação superficial como é possível verificar no eixo das abcissas quando a agulha atravessava a peça a 5cm, possivelmente devido a uma fenda.



Figura 120 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R1

A (Figura 121), refere-se a uma inspecção realizada numa viga no pavimento, R2 junto ao apoio de entrega na parede, com o objectivo de perceber o estado de conservação da viga na entrega. Como é possível verificar pela análise gráfica, o elemento ensaiado encontrava-se em mau estado de conservação, apresentando uma degradação constante ao longo sua sua secção transversal como é possível verificar no eixo das abcissas quando a agulha atravessava a peça a 6cm, onde atingiu a resistência máxima à penetração ao longo da peça possivelmente devido a zonas de podridão que resultaram de um teor humidade na peça. Intersectando a informação obtida com o resistógrafo com o levantamento de danos (Figura 111), verifica-se que a viga ensaiada apresentava por inspecção visual alguma humidade e daí o resultado do perfil resistográfico.

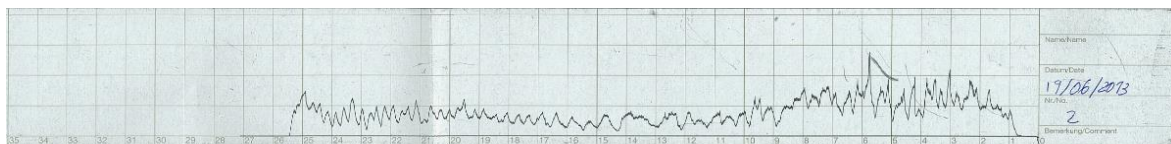


Figura 121 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R2

A (Figura 122), refere-se a uma inspecção realizada numa viga no pavimento, R3 junto ao apoio de entrega na parede, onde por inspecção visual se notava uma zona com presença de humidade. Como é possível verificar pela análise gráfica, o elemento ensaiado encontrava-se em mau estado de conservação, apresentando uma degradação constante ao longo sua sua secção transversal como é possível verificar no eixo das abcissas quando a agulha atravessava a peça a 6cm, onde atingiu a resistência máxima à penetração ao longo da peça entre os 5cm a 9cm. A restante secção transversal a peça mantinha uma resistência constante. O que pode ter acontecido, foi o ensaio coincidir com algum nó, não visível pois a peça atinge níveis de resistência à penetração elevados e quando atinge um “nó” a resistência desce para metade.

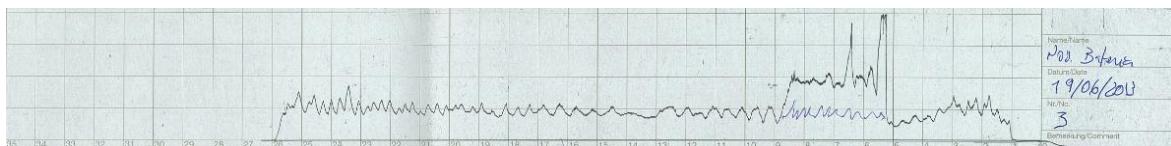


Figura 122- Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R3

A (Figura 123), refere-se a uma inspeção realizada numa viga no pavimento, R4 junto ao apoio de entrega na parede, onde por análise visual se notava uma zona com presença de humidade, analogamente a outras inspeccionadas. Como é possível verificar pela análise gráfica, o elemento ensaiado encontrava-se em mau estado de conservação.

Ao longo da secção transversal da peça, como é possível verificar no eixo das abcissas a peça atinge resistência à perfuração elevada nos primeiros 8 cm, a partir daí até mais ou menos metade da secção perfurada, nota-se uma diminuição da resistência, devido a uma possível zona de podridão. Após esta zona degradada, temos novamente um “pico” de resistência que após 3cm volta a diminuir para cerca de metade da resistência. O que pode ter acontecido, foi a localização do ensaio coincidir com algum nó, zona de podridão não visível pois a peça atinge níveis de resistência à penetração elevados em dois instantes correspondendo a cerca de 15 cm no total da secção transversal, a restante secção apresenta uma resistência à penetração constante.

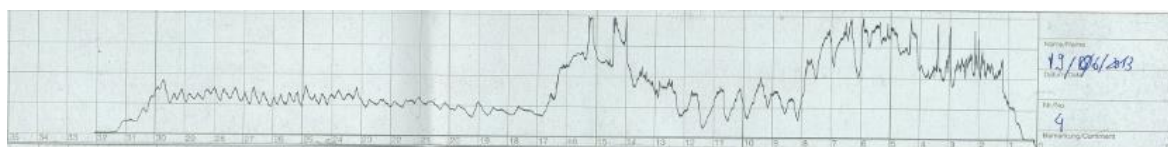


Figura 123 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R4

A (Figura 124), refere-se a uma inspeção realizada numa viga no pavimento, R5 junto ao apoio de entrega na parede junto de uma janela. Como é possível verificar pela análise gráfica, o elemento ensaiado encontrava-se em mau estado de conservação numa zona onde o solho já não existia, devido ao mau isolamento às intempéries (Figura 114).

Ao longo da secção transversal da peça, como é possível verificar no eixo das abcissas a peça atinge resistência à perfuração quase residual pois com a presença de humidade e fendas que são visíveis no perfil resistográfico.

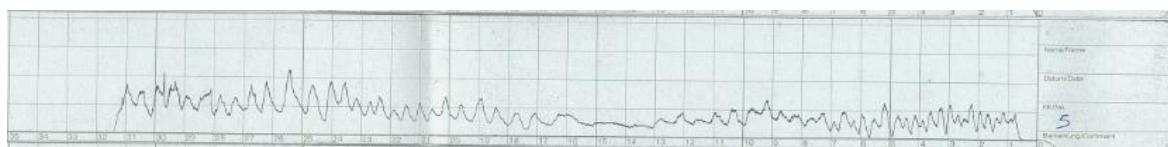


Figura 124 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R5

A (Figura 125), diz respeito a uma inspeção realizada numa viga no pavimento, R6 junto ao apoio de entrega na parede junto de uma janela. Como é possível verificar pela análise gráfica, o elemento ensaiado encontrava-se em mau estado de conservação numa zona onde o solho já não existia, devido ao mau isolamento às intempéries (Figura 114).



Figura 125 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R6

Ao longo da secção transversal da peça, como é possível verificar no eixo das abcissas, a peça atinge resistência à perfuração elevada nos primeiros 5 cm de secção transversal, a partir daí além das fendas que se verificam no perfil resistográfico com uma clara perda de resistência. A partir dos 9cm a resistência à penetração é nula o que mostra uma zona apodrecida, sendo a secção efectiva da peça cerca de metade daquela que se verifica visualmente.

A (Figura 126) refere-se a uma inspecção realizada numa viga no pavimento, R7 junto ao apoio de entrega na parede. Como é possível verificar pela análise gráfica, o elemento ensaiado encontrava-se em mau estado de conservação numa zona onde o solho e a viga apresentavam uma mudança de cor que são sinais óbvios da presença de patologias.

Ao longo da secção transversal da peça, como é possível verificar no eixo das abcissas, a peça atinge resistência à perfuração elevada nos primeiros 3 cm de secção transversal, a partir daí além das fendas que se verificam no perfil resistográfico, até aos 7cm a peça vai tendo uma resistência à penetração reduzida até atingir o valor nulo, o que mostra que no meio da secção da viga de madeira existe podridão ou outro tipo de patologia que faz com que a peça não tenha resistência.

A partir dos 20cm a resistência à penetração aumenta mas com a presença de fendas.



Figura 126 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R7

A (Figura 127), refere-se a uma inspecção realizada numa viga da cobertura, R8. Como é possível verificar pela análise gráfica, o elemento ensaiado encontrava-se em bom estado de conservação e sem aparente degradação, apresentando apenas uma ligeira degradação superficial como é possível verificar no eixo das abcissas quando a agulha atravessava a peça a 7cm, possivelmente devido a uma fenda.

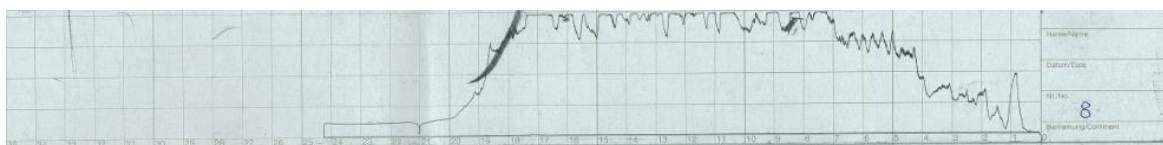


Figura 127 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R8

A (Figura 128), refere-se a uma inspecção realizada numa viga na cobertura, R9. Como é possível verificar pela análise gráfica, o elemento ensaiado encontrava-se em mau estado de conservação. Ao longo da secção transversal da peça, como é possível verificar no eixo das abcissas a peça atinge resistência à perfuração quase residual pois com a presença de humidade e fendas que são visíveis no perfil resistográfico.

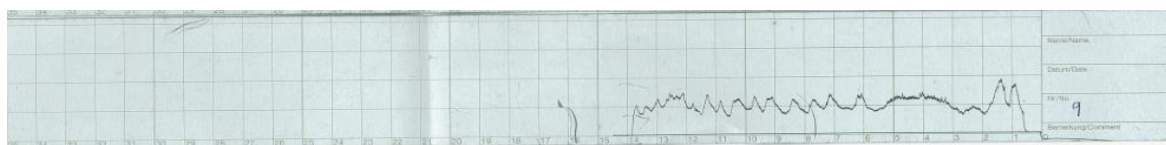


Figura 128 - Gráfico obtido com o Resistografo em vigas do pavimento R9

6.6.4 Humidímetro

6.6.4.1 Equipamento utilizado

O humidímetro é constituído na sua base por dois eléctrodos em borracha que em contacto com o material a ensaiar, cria um campo eléctrico que permite medir a resistência eléctrica do material conforme o seu teor em água, ou seja, este aparelho permite efectuar medições superficiais do teor de água dos elementos de madeira com base na variação da resistência eléctrica (Coelho, 2010).

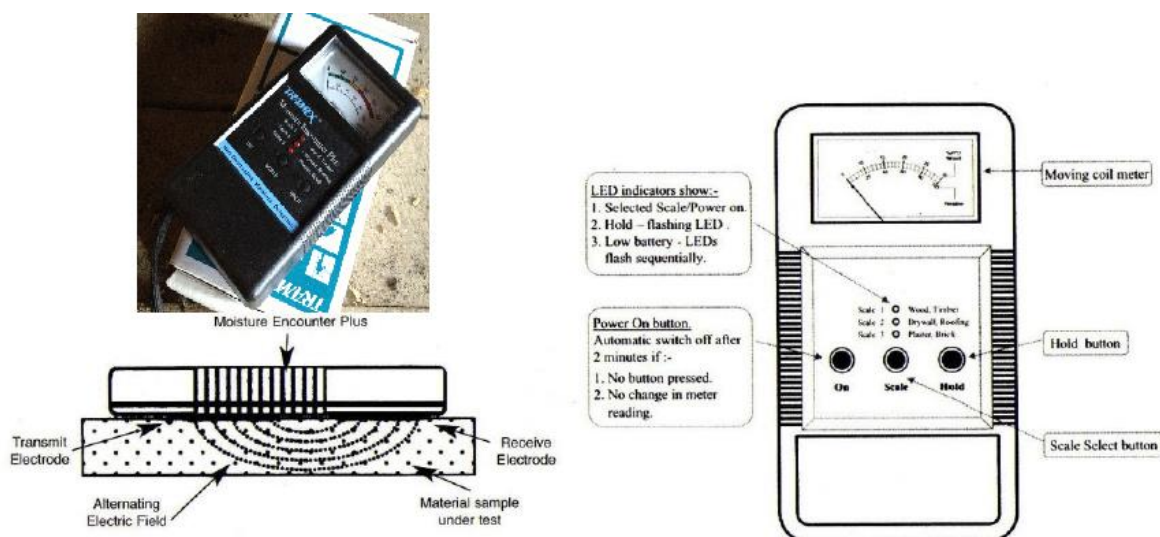


Figura 129 - Descrição do Humidímetro e modo de funcionamento (Fonte: Coelho, 2010)

Com o recurso a aparelhos como o Humidímetro (da marca TRAMEX modelo MEP) procedeu-se á determinação da humidade nos elementos de madeira. Este aparelho permite efectuar medições em alguns

tipos de materiais, tendo para esse efeito três escalas de leituras que dependem do material onde são efectuadas essas medições.

Conforme referido em 4.5.1.3, as normas respeitantes à segurança estruturais actuais, o eurocódigo 5, estabelecem a existência de risco de ataque por fungos sempre que a madeira estiver exposta, valores de humidades superiores a 20%, sugerindo ainda que nas madeiras que já sofreram ataques de fungos, este limite deva ser reduzido para 18% (Feio, 2005).



Figura 130 - Inspeção de vigas do pavimento de madeira

Assim, com leituras periódicas com este aparelho, é possível preventivamente actuar, com leituras periódicas com o humidímetro, verificando zonas com maior potencial de ataques de fungos, que correspondem geralmente a detalhes construtivos que permitam a acumulação de humidade.

6.6.4.2 Resultados obtidos

Apresenta-se a organização da informação relativa ao levantamento das características geométricas e do estado de conservação das vigas do pavimento de madeira no âmbito da sua caracterização estrutural.

Na planta estrutural (Figura 131), apresentam-se as vigas onde foram realizadas as inspecções. Em cada zona foi registado, para cada viga a secção média, estado geral, apoios à esquerda e direita de cada peça, teor de humidade e o seu estado de conservação através da inspecção visual. As medições foram realizadas no dia 19/6/2013.



Figura 131 - Planta Estrutural com as vigas principais (foto: Andrade, M.,2013)

Apresenta-se na tabela 6.1 o resultado do ensaio realizado com o Humidímetro.

Tabela 6.1 - Registro de informação para o piso e cobertura com o Humidímetro no dia 19/06/2013

Designação	Secção Média, Ø (Cm)	Estado actual	Apoio Esq	Apoio Dir	Teor Humidade (%)	Observação Visual
H1	30	Degradado	Degradado	Degradado	13	Fenda
H2	30	Razoável	Razoável	Bom	13	Nó
H3	30	Razoável	Degradado	Bom	13	Fenda
H4	30	Razoável	Razoável	Razoável	10	Fenda
H5	30	Degradado	Degradado	Razoável	18	Fenda Apoio A Nó a ½ vão
H6	30	Razoável	Razoável	Razoável	16	Fenda
H7	30	Degradado	Degradado	Bom	14	Fenda
H8	30	Razoável	Razoável	Razoável	23	Fenda
H9	30	Razoável	Degradado	Degradado	23	Fenda
H10	30	Degradado	Degradado	Degradado	23	Nó a ½ vão
H11	32	Degradado	Degradado	Degradado	13	Nó a ½ vão
H12	35	Razoável	Bom	Degradado	12	Fendas e Nós
PM01	24	Razoável	Razoável	Bom	22	Fendas e Nós
PM02	24	Degradado	Degradado	Degradado	18	Fendas e Nós

Esta informação foi organizada de forma sistemática e a sua análise permitiu numa escala de bom, degradado e razoável classificar o estado geral de cada viga, indexando-lhe uma cor. Estes elementos permitem uma fácil leitura do estado do pavimento, constituindo uma boa ferramenta gráfica de auxílio à decisão.

Nas zonas do pavimento em que as vigas se encontravam mais expostas à chuva foi registado um teor de humidade mais elevado, tendo-se por isso comparado sempre as leituras com do Humidímetro com as leituras do Resistógrafo nesses mesmos elementos.

As vigas junto aos vãos (VP05 e VP06) onde já não existia solho, apresentavam um mau estado de conservação devido ao mau isolamento às intempéries. Os ensaios realizados nessas vigas, nomeadamente H5 e H6 apresentam um teor de humidade elevado comparativamente com as restantes vigas ensaiadas. As vigas VP8 e VP09 também apresentavam um teor de humidade elevado devido a uma infiltração que existia na cobertura (H08 e H09) respectivamente.

Por conseguinte a viga VP10, tendo sido feito o ensaio junto do apoio (H10) e sendo uma viga junto a um vão apresentava um teor de humidade elevado, devido à entrada de água pela cobertura. O valor mais baixo de teor de humidade que se registou foi no ensaio H04 com 10%, sendo o valor mais elevado de 23%.

6.7 IDENTIFICAÇÃO DA ESPÉCIE DA MADEIRA

O castanheiro produz madeira de excelente qualidade, o castanho, muito usada no passado na construção em Portugal, nomeadamente na região norte do país. É ainda hoje muito utilizada em mobília e decoração interior. Desde tempos remotos que é conhecida na Península Ibérica.

Por forma a ser identificada a espécie da madeira existente no local, foram removidas algumas vigas na zona do pavimento que visualmente apresentavam maior degradação com dimensão suficiente à realização de 18 provetes. Através dos provetes removidos foi realizada a identificação da espécie de madeira no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD).

Foi possível identificar a espécie de madeira como sendo de castanho (*Castanea sativa* Mill), apresentando “camadas de crescimento distintas à vista desarmada pela espessa zona porosa de primavera e transição brusca de diâmetro dos poros; zonas de primavera e de Outono perfeitamente distintas” (Cachim, 2007).

A madeira observada apresentava porosidade em anel, com grandes poros elípticos na zona de primavera e com poros pequenos e em grupos radiais sinuosos na zona de Outono. Nas figuras seguintes

apresentam-se os cortes da madeira efectuados no micrótopo, segundo as direcções radial, tangencial e transversal (Cachim, 2007).

6.8 ENSAIOS LABORATORIAIS EM PROVETES ISENTOS DE DEFEITOS

6.8.1 Introdução

Foram executados, no Laboratório do Departamento de Engenharias da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), ensaios mecânicos sobre provetes de madeira pequenos e isentos de defeitos. Os ensaios foram efectuados com o objectivo de determinar as propriedades físico-mecânicas da madeira proveniente da estrutura de madeira do edifício objecto de estudo.

Estes ensaios foram realizados de acordo com as normas (NP619; 1973) (flexão estática), tendo sido avaliada a tensão de rotura à flexão na direcção do fio (f_m), assim como o módulo de elasticidade em flexão (E_m). Foi determinada a massa volúmica e o teor em água da madeira, de acordo com as normas (NP616; 1973) e (NP614; 1973).

Estas vigas foram removidas do pavimento de madeira do edifício, que posteriormente foi utilizada para executar os provetes usados nos ensaios experimentais.

A atribuição deste tipo de ensaios, destrutivos, pode não ser a mais correcta, pois a remoção dos elementos estruturais para a realização de provetes, impossibilita a utilização da mesma peça de madeira.

6.8.2 Determinação da massa volúmica e teor em água

Com vista a determinação da humidade relativa da madeira foram preparados 9 provetes prismáticos de $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$. Cada provete foi numerado, efectuando-se também um registo da sua massa húmida. Os provetes foram posteriormente colocados numa estufa para secar, a uma temperatura de $100 \pm 3^\circ\text{C}$, durante aproximadamente 2 dias (23/05/2013 até 25/05/2013).

Assim, de forma a determinar a massa volúmica e o teor de humidade, apresentam-se os provetes, bem como os equipamentos utilizados (Figura 132).

Durante este tempo foram registadas as suas massas até se constatar um valor constante, sendo este valor designado por massa seca. A massa volúmica (ρ_H) dos provetes foi determinada tendo em conta a norma portuguesa NP-616 (1973), através da seguinte equação (6.1):

$$\rho_H = \frac{m_H}{V_H} \quad (6.1)$$



Figura 132 - Apresentação dos equipamentos utilizados na determinação da massa volúmica e teor de humidade, Esq: Estufa, Centro: Balança digital, Dir: Provetes (foto: Andrade, M., 2013)

Nos mesmos provetes determinou-se o teor de água (H), de acordo com a norma portuguesa NP-614 (1973), através da seguinte expressão (6.2):

$$H = 100 \times \frac{m_h - m_s}{m_s} \quad (6.2)$$

Tabela 6.2 Medições de Massa Húmida, Seca e Humidade relativa

Espécie	M _h (g)	M _s (g)	H (%)	Média dos valores	ρ (kg/m ³)
H1	6,19	5,58	10,93	Carvalho	780,59
H2	6,12	5,52	10,87		753,58
H3	6,77	6,10	10,98		751,15
H4	5,96	5,38	10,78		750,13
H5	6,11	5,51	10,89		748,96
H6	6,29	5,68	10,74		747,66
H7	6,03	5,43	11,05		756,882
H8	6,89	6,21	10,95		780,59
H9	6,30	6,02	4,65		12,53033878
				Media	756,882
				Máximo	780,59
				desvio-padrão	12,53033878

Na Tabela 6.2 apresenta-se a humidade relativa de cada provete. O valor mais baixo da humidade relativa de 4,65%, sendo o valor mais elevado de 10,95%. A média dos valores da massa volúmica é 756,8 kg/m³.

O Gráfico 6.1, representa a massa medida ao longo do tempo dos provetes ensaiados. É possível observar, no gráfico que o provete H9, H3 e H8 têm uma massa superior aos restantes provetes, que têm aproximadamente a mesma massa.

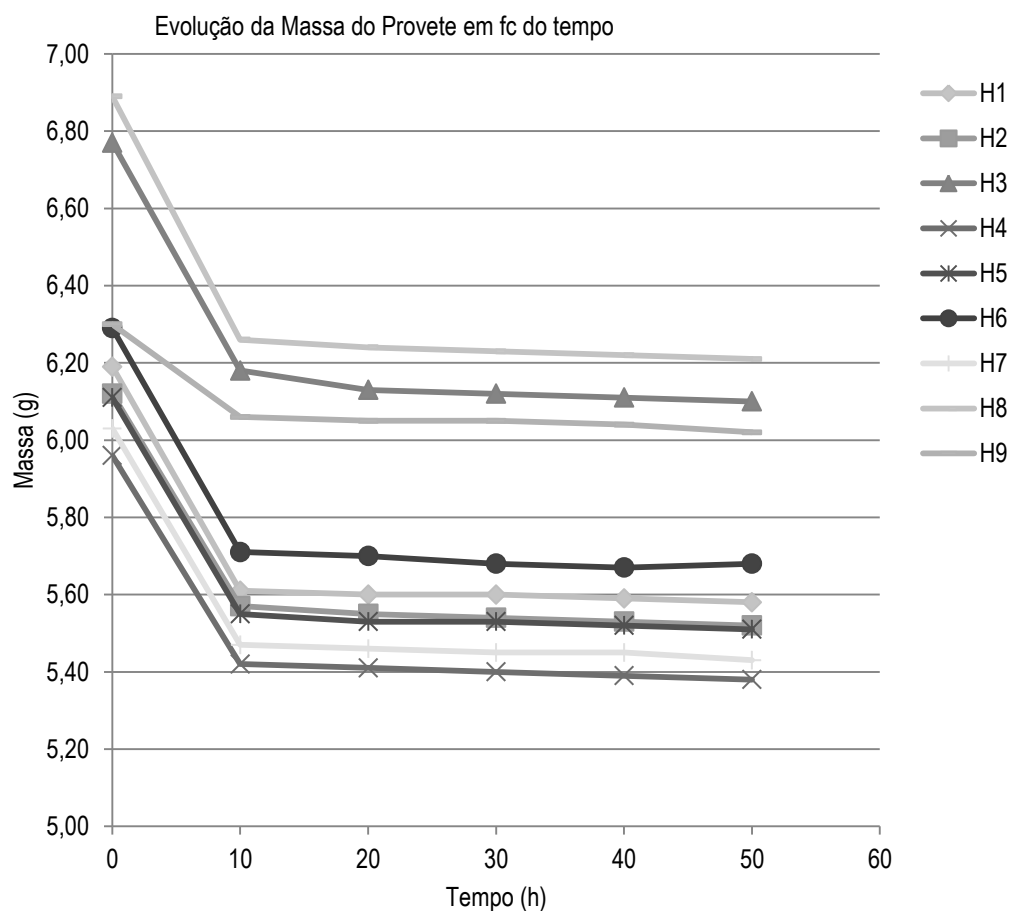


Gráfico 6.1 Medições de Massa Úmida, Seca e Humidade relativa

6.8.3 Ensaios de flexão

6.8.3.1 Esquema de ensaio

O ensaio de flexão foi realizado segundo a norma (NP619; 1973), em que o ensaio consiste na transmissão de uma carga vertical sobre o provete com as dimensões 20x20x340 mm³, estando este centrado com o ponto de aplicação da carga.

Utilizou-se um dispositivo constituído por dois apoios para o provete, com os eixos paralelos e afastados de 240mm, e por um cutelo (cilíndrico) de eixo paralelo ao dos apoios e situado a meia distância entre eles. Pode-se observar o dispositivo de carga indicado pela norma, bem como o equipamento utilizado no ensaio (Figura 133).



Figura 133 - Ensaio de flexão realizados, segundo a norma NP618, 1973 (foto: Andrade, M., 2013)

De modo à realização do ensaio, colocaram-se os provetes sobre os apoios, procurando-se que o seu eixo ficasse perpendicular aos eixos dos apoios e orientados de modo a que a força fosse aplicada segundo a direcção tangencial da madeira. Ensaaiaram-se assim, nove provetes com as dimensões médias de $20 \times 20 \times 340 \text{ mm}^3$, definidas na norma, em que após o posicionamento definido do provete, aplicaram-se forças progressivas crescentes a uma velocidade constante de ensaio de 5 mm/min até atingir a rotura do provete.

6.8.3.2 Resultados obtidos

A resistência à flexão da madeira é provavelmente a propriedade mais importante da madeira uma vez que a maior parte dos elementos estruturais se encontram submetidos a este tipo de esforço (Cachim, 2007).

Apresenta-se seguidamente, o gráfico força – deslocamento relativo aos nove provetes ensaiados. É possível verificar que os provetes apresentam comportamento linear elástico, ou seja, as deformações são proporcionais às cargas até aos 4mm de deslocamento, sendo que a partir desse deslocamento perde-se essa proporcionalidade e inicia-se uma zona de grandes deformações.

Verificou-se ainda que o provete F7 apresentou uma carga de rotura na ordem dos 1.8 kN, tendo o provete F8 atingido a rotura aos 1.25 kN. Observou-se alguma heterogeneidade no comportamento dos restantes provetes.

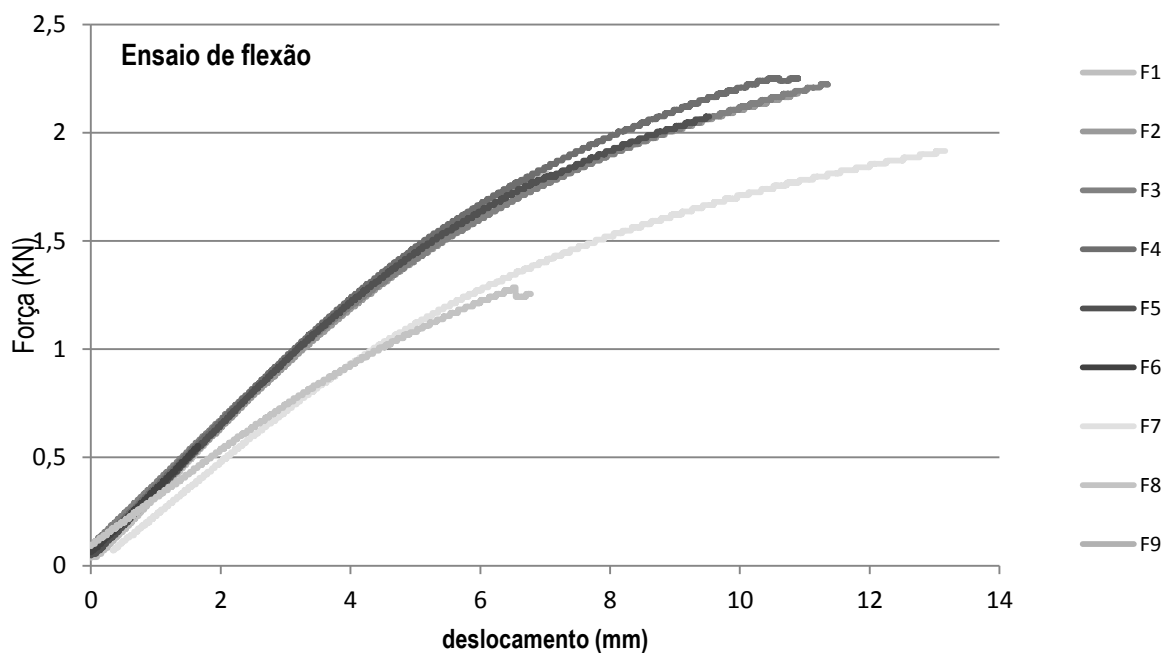


Gráfico 6.2 Medições de Massa Húmida, Seca e Humidade relativa

6.8.3.3 Modos de rotura dos provetes submetidos à flexão

Os esforços de flexão provocam fundamentalmente tensões de tracção e compressão paralelas ao fio nas secções das peças, a resistência à flexão não pode ser determinada directamente a partir das tensões de rotura à tracção ou compressão sendo por isso mais convenientemente falar-se de uma resistência à flexão (Cachim, 2007).

Na (Figura 134), apresenta-se a rotura de um provete ensaiado segundo a norma NP619, 1973.



Figura 134 - Rotura de flexão dos provetes ensaiados segundo a norma NP619, 1973 (foto: Andrade, M.,2013)

O início da rotura de um provete isento de defeitos acontece na zona comprimida, onde se dá a plastificação das fibras, sendo que em seguida se alcança a rotura das fibras traccionadas através da descida da posição do eixo neutro. A rotura dá-se deste modo pelas fibras traccionadas, apesar da sua resistência à tracção ser praticamente o dobro da resistência à compressão (Dias, 2008).

6.8.3.4 Cálculo do valor da resistência à flexão e módulo de elasticidade

Através das seguintes expressões foi possível calcular a tensão de rotura à flexão e o módulo de elasticidade dos provetes ensaiados:

$$f_m = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (6.3)$$

$$E_0 = \frac{F_0 \cdot L^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot u} \quad (6.4)$$

Em que f_m (MPa) é a tensão de rotura à flexão, F (N) é a carga de rotura, L (mm) é o vão do ensaio (distância entre apoios), b e h (mm) são as dimensões da secção transversal do provete, F_0 (N) é a carga na zona linear e u (mm) é a flecha do provete ensaiado correspondente a F_0 (Cachim, 2007). O valor médio de módulo de Elasticidade, E_0 , foi igual a 5,63 GPa e a tensão de rotura à flexão de 45,0 Mpa. Assim, podemos obter o valor característico de tensão de resistência à flexão com base num percentil inferior a 5% da distribuição normal Gaussiana. Desta forma, conclui-se que o valor característico de referência é de 29,10 Mpa.

6.9 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS. VALORES DE CÁLCULO A ADOPTAR. NORMA EN338

Com a oportunidade do edifício estudado, ser alvo de demolição parcial efectuou-se uma campanha de ensaios realizados no pavimento e cobertura de madeira com o objectivo de conhecer detalhadamente as características mecânicas do mesmo.

Realizaram-se ensaios in situ não destrutivos e ensaios laboratoriais em provetes isentos de defeitos “destrutivos”, sabendo que a adopção de ensaios destrutivos é de evitar, pois impossibilita a conservação dos elementos estruturais ensaiados.

Através do Resistografo e Humidímetro foi possível perceber o estado de conservação das vigas de madeira do pavimento. Estes ensaios completaram a inspecção visual e técnicas tradicionais utilizadas (ex: Martelo). Enquanto o Resistografo permitiu detectar zonas de degradação biológica nos elementos, existência de fendas e vazios que não são visíveis através a inspecção visual, assim como variações de densidade ao longo da secção da peça, o humidímetro permitiu obter o teor em água dos elementos verificando-se assim as zonas com maior potencial de ataques de fungos.

Posteriormente, realizaram-se em laboratório ensaios destrutivos de provetes de madeira retirados das vigas do pavimento. Estes resultados foram realizados com o objectivo de determinar as propriedades físico-mecânicas da madeira, nomeadamente massa volúmica, tensão de rotura à flexão na direcção do fio e o módulo de elasticidade na direcção do fio.



Figura 135 – Elementos de madeira que serviram para realização de provetes NP619, 1973 (foto: Andrade, M.,2013)

Os provetes utilizados nos ensaios de flexão, não estavam totalmente isentos de defeitos (Figura 135), pois resultaram de vigas em mau estado de conservação pois estas foram resultado duma parte do pavimento que não continha soalho e estavam muito expostas às intempéries. Estes apresentavam alguns nós e fendas que condicionam também a resistência global dos elementos de madeira.

Na tabela 6.3 temos na coluna da esquerda os resultados, módulo de elasticidade, tensão de rotura à flexão na direcção do fio e massa volúmica dos ensaios de provetes isentos de defeitos e na coluna da direita os valores adaptados a partir da publicação de Albino de Carvalho (Carvalho, 1996) à excepção do módulo de elasticidade, o qual foi deduzido de forma conservadora da consulta do livro publicado pelo CTBA, *Le guide des essences de bois* (Benoit, 1997).

Observando a mesma verificamos que a tanto a tensão de rotura à flexão na direcção do fio como a o módulo de elasticidade apresentam valores baixos comparativamente com os valores a usar no cálculo de estruturas existentes de madeira (Carvalho, 1996). A massa volúmica apresenta um valor superior ao que apresenta a publicação de Albino Carvalho. Como referido anteriormente, estes provetes resultaram de

madeira em mau estado de conservação e os provetes por conseguinte não estavam totalmente isentos de defeitos.

Tabela 6.3 Resultados dos ensaios provetes isentos de defeitos e norma EN338

Espécie: Castanho	Ensaio Provetes Isentos de defeitos	Classes de resistência a usar no cálculo de estruturas madeira existentes
E (GPa)	5,63	10
f _m (MPa)	45	97
ρ (kg/m ³)	756,8	540

Nota: Os valores de resistência a usar no cálculo de estruturas de madeira Portuguesa existentes (madeira antiga sem defeitos importantes)

Como referido em 4.5.1.12, estudos realizados nos últimos 50 anos indicam que, em princípio, a resistência da madeira não diminui de forma visível com a idade.

Alguns estudos chegaram à conclusão que, com a idade a madeira terá tendência a ficar com uma maior dureza superficial e resistência mecânica, mas a perder flexibilidade, tornando-se mais frágil. Sujeita a cargas permanentes, terá tendência a sofrer uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade.

Dias, afirma que a avaliação da resistência da madeira a partir de provetes pequenos e isentos de defeitos, pode chegar a resultados pouco ajustados à realidade das peças com dimensões reais, podendo não ser o procedimento adequado quando se pretende obter as propriedades mecânicas para emprego estrutural da madeira. Sendo assim, considera-se importante, em intervenções de reabilitação, avaliar a possibilidade de utilização de provetes pequenos isentos de defeitos, tendo em consideração as limitações que lhe estão associadas, e naturalmente com a devida precaução relacionada com o facto de se estar a avaliar um número de amostras reduzido e cujas características não correspondem exactamente às do elemento real (Dias, 2008).

6.10 MODELAÇÃO NUMÉRICA

6.10.1 Introdução

Para um melhor conhecimento do comportamento da estrutura em análise são normalmente realizados modelos estruturais que, se devidamente calibrados, permitem a comparação dos danos teóricos produzidos por diferentes acções com os danos efectivamente observados na estrutura (Costa *et al.*; 2005a). Este autor refere, no entanto, que “o estabelecimento de modelos estruturais adequados, baseados em

premissas coerentes com a observação da estrutura e com os resultados dos ensaios experimentais é uma tarefa difícil, uma vez que os métodos de análise estrutural utilizados para construções novas podem não ser precisos nem fiáveis para as estruturas históricas, podendo resultar em decisões inadequadas”.

Esta situação deve-se, nomeadamente, à dificuldade em entender correctamente a complexidade de uma construção antiga, às incertezas relativas às características dos materiais mas que se podem conhecer mediante ensaios, e à representação imperfeita do comportamento estrutural, associada às simplificações adoptadas.

Estes modelos estruturais podem ser materializados por modelos numéricos, que devem descrever a estrutura e os fenómenos associados adequadamente, possibilitando uma correcta verificação estrutural dos pavimentos (Costa; 2005; Costa *et al.*; 2005a). Esta ferramenta de cálculo permite uma previsão do comportamento das estruturas de madeira da fase linear até à rotura, sendo muito importante para compreender o seu comportamento estrutural.

A avaliação da segurança pode então ser efectuada com base na análise dos resultados da modelação estrutural e da sua comparação com a capacidade resistente dos elementos que compõem a estrutura. Sendo assim, estes modelos devem ter em conta três aspectos fundamentais: o esquema estrutural, as características dos materiais e as acções a que a estrutura está submetida (Costa *et al.*; 2005a). O objectivo da modelação deve ainda ser tido em consideração, já que poderá influenciá-la.

Em relação a este ponto refere-se que a modelação pode ser feita com o objectivo de reproduzir e interpretar os danos estruturais encontrados, prever a resposta estrutural sob condições ainda não experimentadas, ou simular os efeitos resultantes de intervenções de reabilitação e/ou reforço (Arêde *et al.*; 2002).

6.10.2 Modelo de Cálculo Estrutural

Foi realizado um modelo numérico da estrutura de madeira do pavimento com o programa Arketec Tricalc 8.0 com o objectivo de analisar o comportamento global da estrutura em termos de esforços e deslocamentos.

Assim sendo, o modelo de cálculo foi construído tendo em conta as características geométricas da estrutura, tendo-se usados diâmetros médios das barras uma vez que não existe regularidade e linearidade da estrutura pois estas barras eram resultado de troncos de árvores. O soalho e as paredes em tabuado foram modelados como uma carga uniformemente distribuída sobre a face superior das vigas. Apresenta-se (Figura 136) o modelo de cálculo adoptado.

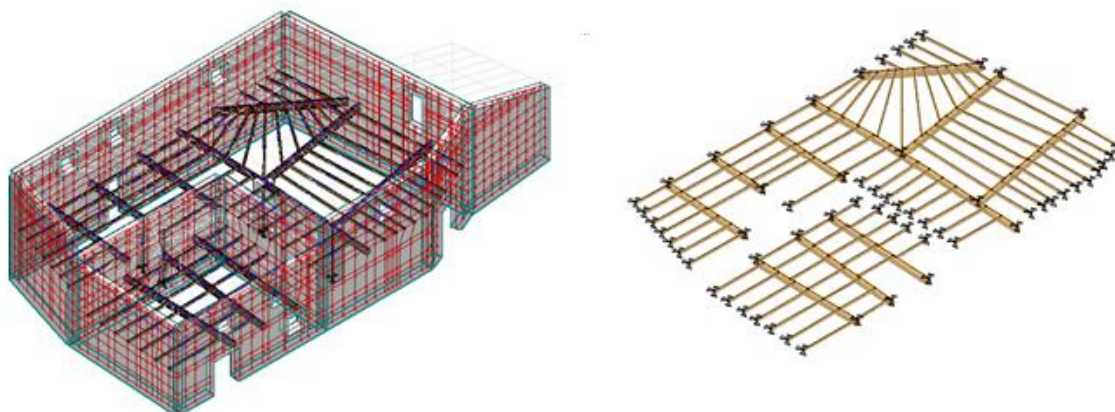


Figura 136 – Modelo numérico do pavimento de Madeira

Importa ainda mencionar que a calibração dos modelos numéricos, essencial para uma reprodução mais fidedigna do comportamento da estrutura, assume particular importância na avaliação da segurança de uma estrutura, e pode ser feita através do conhecimento das características físicas e mecânicas do material obtidas através de ensaios realizados, e nomeadamente da comparação entre frequências de vibração numéricas e experimentais, que permite obter o módulo de elasticidade da madeira (Costa et al.; 2005a).

6.10.3 Comparação do modelo numérico

Nos dias de hoje, os programas de cálculo automático de estruturas vieram auxiliar em muito a vida do projectista de estruturas actual. Antigamente, os cálculos complexos que levavam bastante tempo a ser efectuados analiticamente, são agora executados numa questão de segundos e com grande precisão. No entanto, estes programas podem ser uma ferramenta perigosa se o engenheiro confiar em resultados que não sejam verificados e validados.

Podem cometer-se erros na criação do modelo e estes podem levar a esforços e deformadas irreais. Assim, torna-se necessária uma validação do modelo, confirmando a correcta inserção dos dados, de maneira a permitir uma total confiança nos resultados devolvidos pelo programa, uma vez que deste depende o dimensionamento e a segurança da estrutura.

A validação do modelo consiste em comparar a geometria, esforços ou deformadas obtidas no modelo com os valores que seriam expectáveis.

De modo a verificar a veracidade dos resultados dados pelo modelo numérico construído no programa Arktec Tricalc 8.0, foi utilizado outro programa de cálculo equivalente. O programa utilizado foi o Autodesk Robot Structural Analysis 2014.

De modo a garantir que a comparação de resultados entre os dois programas seria bem-feita, foram copiadas todas as características geométricas das secções e materiais utilizados. O modelo estrutural a usar no cálculo de esforços para verificação da segurança da estrutura de madeira do pavimento consiste numa

estrutura articulada, ou seja sem transmissão de momentos flectores e simplesmente apoiada na parede em toda a volta e daí a separação da estrutura de madeira com a estrutura de alvenaria.

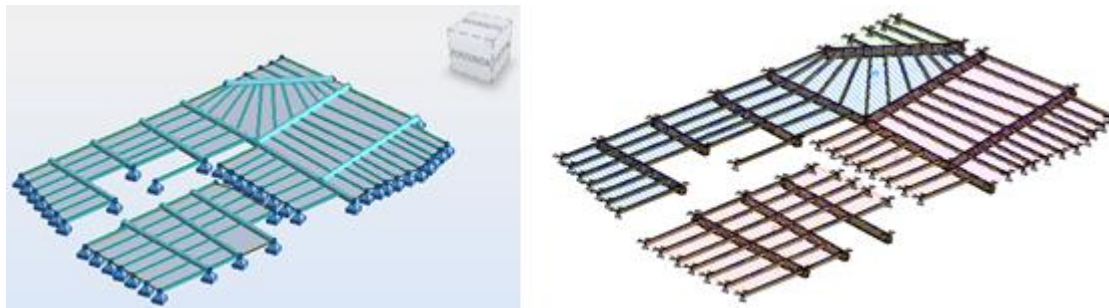


Figura 137 – Modelos numéricos: Esq: Autodesk Robot Analysis 2014; Dir: Arlktec Tricalc 8.0

Neste sentido as características físicas e mecânicas foram retiradas da norma EN348 (D30) classe mínima atribuída à estrutura por inspecção visual (conclusões escritas em 6.9). Esta classe de resistência foi escolhida de modo a que os valores obtidos com o modelo numérico se aproximem ao comportamento real da estrutura. Assim, para o cálculo das deformações foi definido para a massa volúmica e o módulo de elasticidade da madeira, os valores de 530 kg/m³ e de 10 GPa, respectivamente.

A tarefa de avaliar a segurança estrutural de estruturas de madeiras existentes é complexa e será necessário avaliar a resistência, o estado sanitário e a integridade dos elementos estruturais (Negrão, et al., 2009).

Foram feitas várias comparações entre os dois modelos numéricos, entre elas os diagramas de momentos flectores e máximo deslocamento global da estrutura.

O peso próprio da estrutura é calculado automaticamente pelo programa de cálculo, conforme o tipo de madeira escolhida. O tipo de madeira escolhida através a inspecção visual e após a identificação da mesma em laboratório é da espécie folhosas, tendo sido atribuído uma classe de resistência D30. As acções definidas para ambos os modelos foram calculadas manualmente. As cargas que actuam sobre o pavimento são:

- Peso Próprio: gerado automaticamente;
- Soalho (2cm) com um $p=350 \text{ Kg/m}^3$: 0,07kN/m²
- Divisórias: Adoptado o valor de 1,0 kN/m²
- Sobrecarga de utilização: 2,0kN/m²

Após a definição das cargas sobre os elementos estruturais, são definidas as combinações de acções para as quais a estrutura foi calculada. Para a verificação ao estado limite último foi usada a seguinte combinação de acções:

$$S_d = \sum_{i=1}^m \gamma_{gi} S_{Gik} + \gamma_q \left[S_{Q1k} + \sum_{j=2}^n \Psi_{0j} S_{Qjk} \right] \quad (6.1)$$

Em que:

$S_{Gk,j}$ - valor característico das acções permanentes;

$S_{Qk,1}$ - valor característico de uma das acções variáveis; $Q_{k,i}$ - valores característicos das outras acções variavam; ψ_1 - coeficiente ψ_i (RSA).

A combinação de acções para a verificação de segurança em relação aos estados limites de utilização, é apresentada na expressão (6.2):

$$S_d = \sum_{j=1}^m G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i=2}^n \Psi_{1,i} \times Q_{k,i} \quad (6.2)$$

Em que:

$G_{k,j}$ - valor característico das acções permanentes;

$Q_{k,1}$ - valor característico de uma das acções variáveis; $Q_{k,i}$ - valores característicos das outras acções variáveis; ψ_1 - coeficiente ψ_i (RSA).

Nota: A verificação ao Estado Limite de utilização foi realizada tendo em conta a Combinação rara de acções, combinação quase-permanente e combinação permanente.

Nas figuras seguintes mostram-se os diagramas de momentos flectores, obtidos entre os dois modelos de cálculo para o pavimento de madeira.

▪ Modelo 01 – Arktec Tricalc 8.0

Obtiveram-se os seguintes diagramas de momentos flectores para a envolvente de combinação de acções para o estado limite último (ELU):

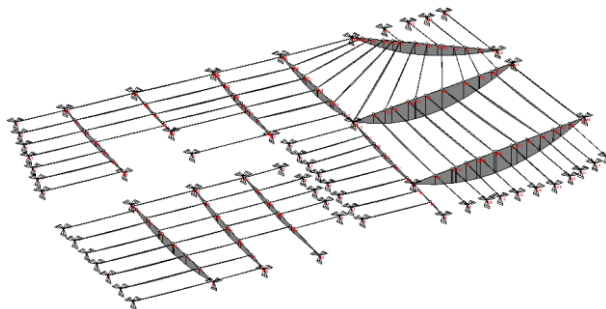


Figura 138 – Gráficos de momentos flectores da estrutura do pavimento (Global)

De forma a ter-se percepção numericamente dos momentos flectores na barra como maior solicitação de acções, apresenta-se (Figura 139) o gráfico de momentos dessa barra isoladamente:

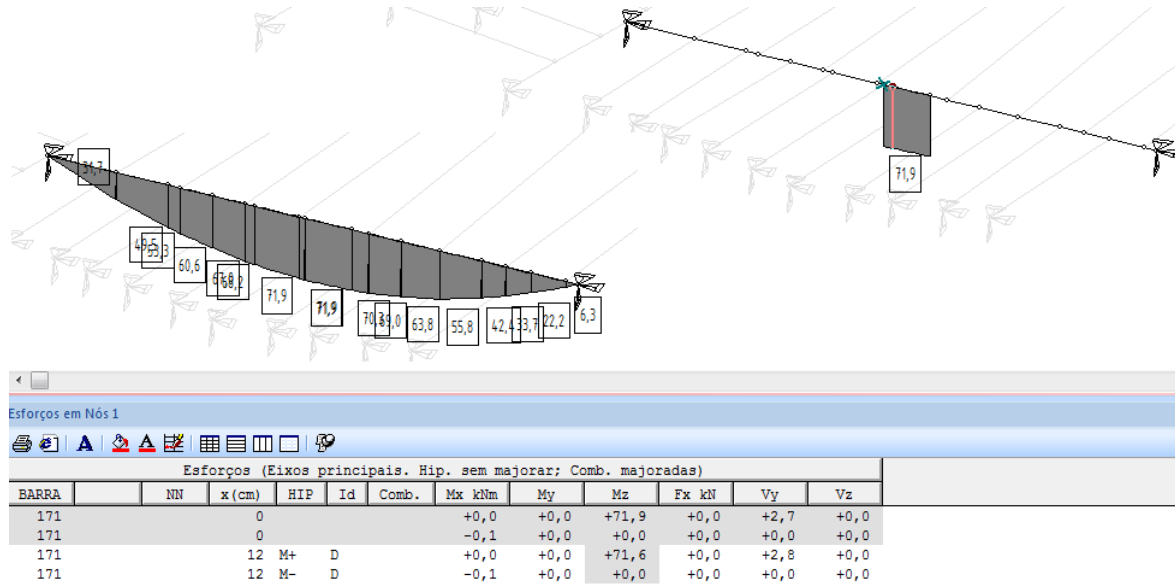


Figura 139 – Gráficos de momentos flectores da barra do pavimento com maior momento flector

O máximo valor de momento flector observado é de 71,9 kN.m.

▪ Modelo 02 – Autodesk Robot Structural Analysis 2014

Obtiveram-se os seguintes diagramas de momentos flectores para a envolvente de combinação de acções para o estado limite último (ELU):

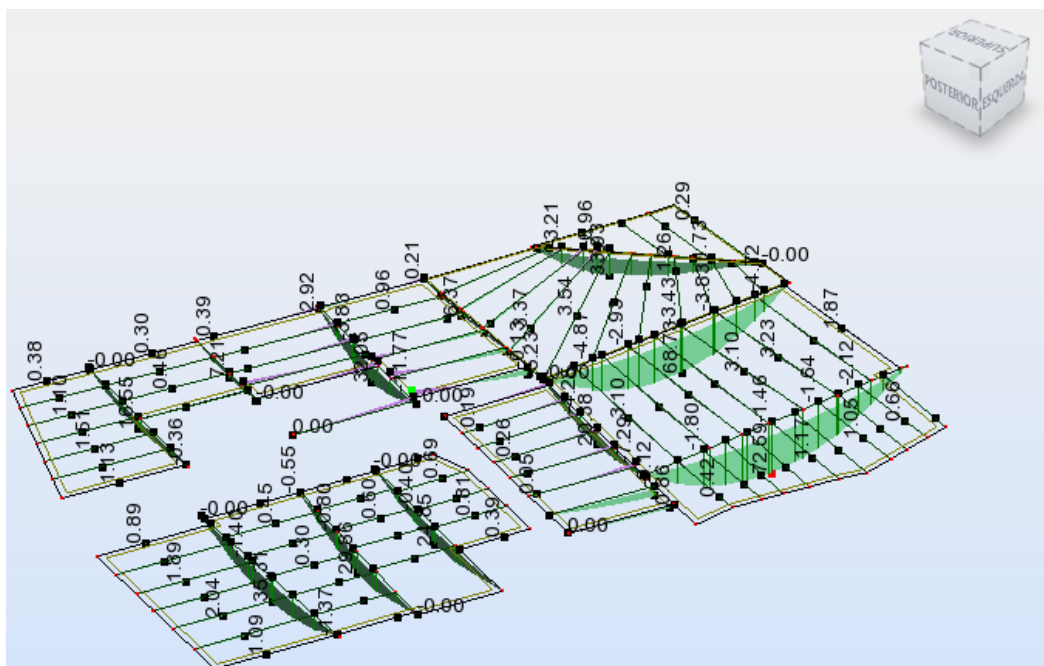


Figura 140 – Gráficos de momentos flectores da estrutura do pavimento (Global)

Na tabela 6.4 apresenta-se a análise comparativa entre os valores de deslocamentos obtidos na barra mais solicitada (VP10) no modelo 01 – Arktec Tricalc 8.0 e o modelo 02 – Autodesk Robot Structural Analysis 2014 para as hipóteses de cargas e combinação de ações.

Tabela 6.4 Comparação entre os dois modelos de Cálculo: Modelo 01 e Modelo 02

Modelos	Hipótese			Combinação	
	Permanente	Sobrecarga	G + Q	Frequente	Quase Permanente
Arktec Tricalc 8.0	1,907	3,056	4,963	2,824	2,518
Autodesk Robot Structural Analysis	2,009	3,228	5,237	2,977	2,655
Diferença	5,1%	5,1%	5,2%	5,1%	5,2%

A análise conjunta dos resultados numéricos entre os dois modelos permite concluir que ambos apresentam resultados na mesma ordem de grandeza o que nos admite à validação dos resultados pois estes têm uma diferença na ordem de grandeza de 5%.

6.10.4 Comparação das deformações obtidas numericamente com as verificas *in situ*. Análise de Resultados

Os valores de deformação obtidos numericamente são superiores aos que se verificam *in situ*, que foram verificadas com o auxílio de uma fita métrica aquando da visita à obra para avaliação do estado de conservação (Figura 141).



Figura 141 – Deformação real da viga de madeira em análise (foto: Andrade, M., 2013)

É importante referir, que foram admitidos valores para as cargas permanentes de 350kg/m^3 para o soalho e de 1kN/m^2 para as paredes divisórias. Por este motivo, não podemos averiguar com total certeza o valor da deformação verificada no modelo numérico, pois deveríamos ter analisado estes materiais em pormenor, no entanto estimou-se estes valores por serem os correntemente usados para estas situações.

Os modelos numéricos são ferramentas muito úteis na análise estrutural. Estes descrevem a estrutura original, e permitem a comparação dos danos teóricos produzidos pelos diferentes tipos de acções com os danos efectivamente observados, fornecendo uma ferramenta útil para a identificação das causas de tais danos (Appleton, 2003).

Apresenta-se seguidamente o gráfico de deslocamentos global (Figura 139) para a envolvente de combinações para o Estado Limite de Utilização (ELS).

Pela análise do gráfico (Figura 142), conseguimos perceber qual a zona crítica da estrutura em termos de deslocamentos globais, em que o valor máximo obtido é de $4,963\text{mm}$. Assim a análise estrutural é uma ferramenta indispensável, pois mesmo quando os resultados de cálculo não são exactos é possível obter distribuições de tensões e possíveis áreas críticas (Appleton, 2003).

Nesse sentido, a análise que será efectuada em termos de deformação final será apenas para a barra que globalmente apresenta a maior deformação na globalidade do pavimento em madeira.

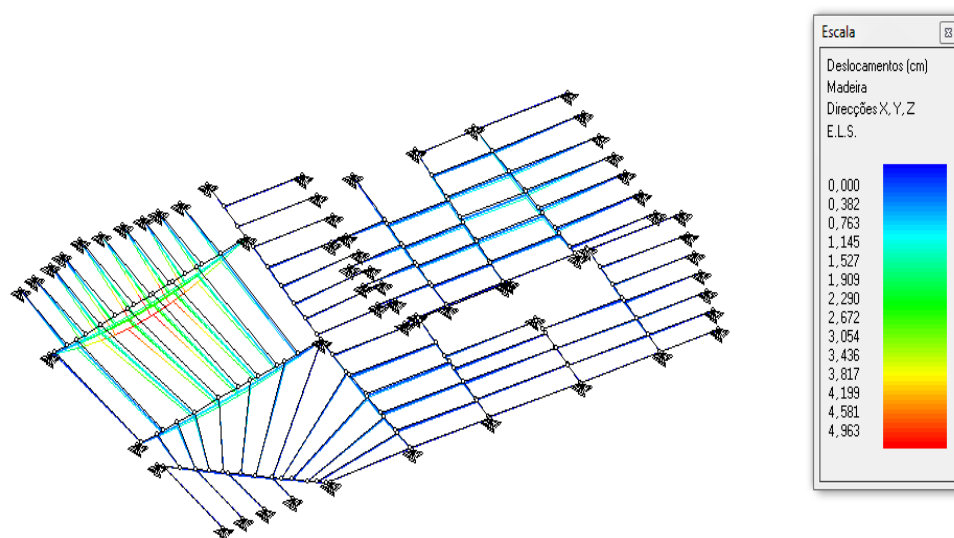


Figura 142 – Gráficos de deslocamentos global da estrutura do pavimento

As deformações verificadas foram determinadas para a combinação rara de acções. Conforme preconizado no Eurocódigo 5 (1995-1:2005, 2004), a quantificação das deformações sofridas pelos vários elementos, divide-se em deformações instantâneas e finais, e dentro destas, subdivide-se nas provocadas pelas acções permanentes e nas resultantes das acções variáveis.

Assim, a deformação final, provocada por uma acção deverá, em princípio, ser calculada por:

$$u_{fin} = u_{ins} (1 + k_{def}) \quad (6.3)$$

Onde k_{def} é um factor que tem em conta o aumento da deformação ao longo do tempo em consequência do efeito combinado da fluência e do teor de água.

Deverão, em princípio, ser usados os valores de k_{def} incluídos na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 Valores de k_{def} para madeira maciça (fonte: Adaptado 1995-1:2005, 2004)

Material	Norma	Classe de Serviço		
		1	2	3
Madeira Maciça	EN 14081-1(2005)	0,6	0,8	2

Apresenta-se, seguidamente uma tabela, com os valores obtidos para a combinação rara de acções e comparação com a flecha máxima admissível.

Tabela 6.6 Combinação rara de acções, aplicando os coeficientes K_{def} (fonte: Andrade, M., 2013)

Combinação rara de Acções, aplicando os coeficientes K_{def}							
Permanente	Sobrecarga	ψ_2	K_{def}	$U_{fin,G}$	$U_{fin,Q}$	U_{fin}	$f_{max}=L/200$ (cm)
1,907	3,056	0,2	0,6	3,0512	3,42272	6,47392	3,125

Pela análise da tabela 6.6, percebemos que a deformação final a longo prazo ultrapassa claramente os limites assumidos para as flechas, conforme preconizado no Eurocódigo 5 (explicação exposta em 5.4.3.2.3).

Analogamente, e comparando o valor da deformação máxima para a combinação rara de acções com o que foi verificado *in situ*, existe alguma diferença de valores para a deformação final.

Alguns factores podem estar na origem das diferenças analisadas, pelo facto de ser considerado no modelo numérico que as ligações entre os elementos construtivos de “entrega” nas paredes de alvenaria sejam articuladas (apoio simples) o que de certa forma não é real pois a viga de madeira ao ter uma “entrega” na parede faz com que exista algum encastramento na própria peça, impedindo que esta rode livremente (Figura 141).

O facto de no modelo numérico se ter considerado o soalho como carga superficial, não traduz a realidade do problema pois este tem um contributo muito importante para a rigidez do pavimento de madeira, fazendo com que este tenha um comportamento mais rígido e consequentemente à existência de menores deformações.

De forma a simular esta situação, cria-se um modelo com um grau de encastramento de 50% junto a uma das extremidades (na parede de alvenaria exterior) e no outro extremo apoiada pois a barra assenta sobre um pilar “coluna” de alvenaria de pedra (Figura 141).



Figura 143 – Entrega da viga de madeira na parede de alvenaria (foto: Andrade, M.,2013)

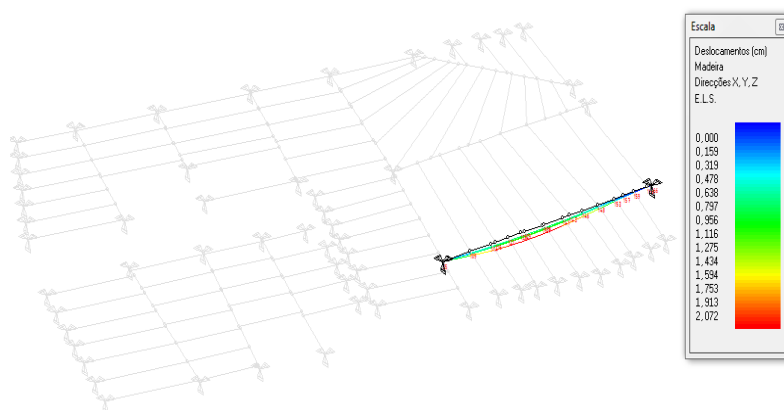


Figura 144– Gráficos de deslocamentos da Barra isolada com maior deformação do pavimento

Analisando o gráfico de deslocamentos, percebemos que a deformação máxima para a envolvente de combinações para o Estado Limite de Utilização (ELS) é aproximadamente 2,072cm.

Neste sentido, e de modo a analisar a influência deste parâmetro (condições de apoio) nos resultados apresenta-se na tabela 6.7 a tabela comparativa para a Combinação rara de acções.

Tabela 6.7 Comparação entre deformação final variando as condições de apoio (fonte: Andrade, M., 2013)

Combinação rara de Acções , aplicando os coeficientes K_{def}								
Apoio	Permanente	Sobrecarga	ψ_2	K_{def}	$U_{fin,G}$	$U_{fin,Q}$	U_{fin}	$f_{max}=L/200$ (cm)
A-A	1,907	3,056	0,2	0,6	3,051	3,422	6,473	3,125
A-E(50%)	0,796	1,276	0,2	0,6	1,273	1,429	2,702	3,125

Observação: A-A : Apoiado – Apoiado; A-E(50%) – Apoiado e 50% de Encastramento

Como a diferença entre resultados numéricos e verificados *in situ* poderia advir da adopção de condições de apoio distintas daquelas que foram consideradas no modelo inicial (apoiado – apoiada), efectuou-se um modelo numérico dando um encastramento à barra em contacto com a parede de alvenaria no sentido de perceber os resultados obtidos. Deste modo, os resultados obtidos permitem observar o seguinte:

- A condição de ter as extremidades das barras apoiadas, leva a deformações na ordem dos 6,46cm;
- A colocação de um grau de 50% de encastramento numa das extremidades da barra, permite obter uma deformação final mais próxima da realidade na ordem dos 2,70cm.

Assim, conclui-se que a situação real do pavimento andarรก entre considerar a hipótese de ter um a barra com um grau de encastramento numa das extremidades aproximadamente os 50% e o modelo considerando a extremidade da barra como simplesmente apoiada pois existe alguma rigidez junto ao apoio na entrega da parede de alvenaria de pedra.

Mais se verifica que as diferenças entre o modelo numérico e o que foi verificado fisicamente *in situ* junto da viga em análise, deve-se pelo facto de no modelo não ser considerado a contribuição do soalho no comportamento global da estrutura pois este é muito importante para a rigidez do pavimento de madeira fazendo com que este tenha um comportamento mais rígido e consequentemente à existência de menores deformações.

6.11 METODOLOGIA DE INTERVENÇÃO ESTRUTURAL

6.11.1 Introdução

O sucesso da reabilitação depende da qualidade das especificações técnicas e da pormenorização construtiva. A especificação técnica deve ser efectuada com base numa lógica exigencial que permita compatibilizar as múltiplas exigências resultantes da introdução de nova regulamentação e do maior conforto que se pretende para os utilizadores (Freitas, 2012).

A pormenorização construtiva deve ser detalhada e exaustiva, abrangendo todos os elementos construtivos a reabilitar, quer em zona corrente quer nos pontos singulares. Só a correcta pormenorização permitirá a transmissão inequívoca da informação pelos vários intervenientes no processo de reabilitação, garantindo que os trabalhos propostos sejam correctamente realizados.

Na reabilitação de edifícios intervém-se de modo a melhorar o seu desempenho, adaptando a envolvente, o espaço interior e as infra-estruturas que o servem (Appleton, 2003). Desta forma não é admissível que edifícios apresentem comportamentos patológicos após uma operação de reabilitação, fundamentalmente se são edifícios cuja durabilidade das soluções iniciais era muito elevada. Por este motivo, os cadernos de encargos dos projectos de reabilitação deverão ser exigenciais, isto é, especificar de uma forma clara e com base em regras perfeitamente definidas as técnicas que se pretendem utilizar e que irão garantir determinados níveis de exigências previamente impostos (Freitas, 2012).

6.11.2 Proposta de intervenção estrutural

Neste sub-capítulo pretende-se apresentar algumas soluções de reabilitação de elementos construtivos (madeira e alvenaria), devidamente comentadas e pormenorizadas.

Será, contudo, importante realçar que estas soluções de reabilitação são apenas um exemplo do que poderá ser feito e não devem ser encaradas como prescritivas ou aplicáveis a todas as situações, uma vez que, em reabilitação cada caso é um caso e as soluções adoptadas dependem das características específicas do elemento construtivo a reabilitar e dos condicionalismos em que decorrerá a própria obra de reabilitação.

São apenas apresentados exemplos de soluções de reabilitação de elementos construtivos em zona corrente (tabela 6.8), que terão de ser necessariamente completadas com pormenores em pontos singulares, correspondentes à intercepção de elementos de construção.

6.11.3 Fichas com soluções tipo de reabilitação de estruturas de madeira

6.11.3.1 Ficha de Diagnóstico_FD01 – Pavimento de Estrutura de Madeira

- Localização das patologias e sua Identificação:

Compartimento C1-2: observa-se a redução da secção de madeira junto às entregas das vigas na parede de alvenaria, com a verificação por inspecção visual, conforme escrito no sub-capítulo 6.5, fendas junto dos apoios e humidade na parede de alvenaria.

O Pavimento apresenta alguma deformação, conforme referido em 6.5.

Compartimento C1-3: observa-se analogamente ao compartimento C1-2 a perda de secção da madeira, nas entregas das paredes de alvenaria, com deformação do pavimento de madeira.

Compartimento C1-4: Tal como nos compartimentos supra mencionados, destaca-se o apodrecimento da madeira junto aos apoios, muito por causa da humidade das paredes que se verificou com a inspecção visual.

Compartimento C1-5: com as intempéries e devido à entrada de água, verifica-se um estado de degradação elevado, exceptuando algumas zonas onde já houve queda de tábuas do soalho. Nas zonas periféricas, a parede apresenta alguma degradação.



Figura 145 – Localização das patologias e identificação das mesmas – Pavimento

- Descrição da Patologia:

Nos locais mencionados, verifica-se que existem problemas de humidade nas paredes, o que provoca algum apodrecimento da madeira, perda de secção das vigas de madeira junto aos apoios, provocando degradação das ligações e por conseguinte deformação da estrutura.

- Causa Aparente:

Esta anomalia relaciona-se com a presença de humidade nos pavimentos, devido infiltrações pelos vãos envidraçados e pela cobertura, a água da chuva infiltra-se, degrada o tecto e desce até ao pavimento.

- Sugestão de Reparação:

Em relação à recuperação do pavimento propriamente dito, torna-se necessário substituir as tábuas degradadas, em falta ou com perda de secção por outras com características idênticas (em carvalho) em termos de durabilidade e cor, tratadas com produtos preservadores de acção fungicida e/ou termicida.

Os encaixes entre as tábuas do solho deverão ser executados da mesma forma que os originais. As tábuas perpendiculares às vigas e ao soalho, que servem de suporte ao último, deverão ser substituídas nas zonas onde estejam degradadas, uma vez que para a execução destes trabalhos será necessário retirar as tábuas do soalho.

As tábuas novas que são inseridas na parede, terão de ser fixas à alvenaria com cola epoxídica. Esta cola servirá para vedar a entrada de humidade na madeira e tornar a ligação mais solidária.

Relativamente à entrega das vigas na alvenaria, solução adoptada para recuperar esta ligação, consiste na substituição dos troços deteriorados por próteses de madeira maciça de carvalho que são ligados à madeira sã restante através de varões de aço e materiais epoxídicos. Este sistema dá pelo nome de Rotafix.

Os trabalhos deverão ser executados por baixo do pavimento, de modo a evitar o levantamento das tábuas de revestimento e a sua posterior recolocação. O procedimento para executar estes trabalhos é o seguinte:

1. Escoramento das vigas afectadas e montagem de andaimes;
2. Corte e remoção dos troços de madeira deteriorada (Figura 143);
3. Execução de furos horizontais na madeira sã remanescente, para instalação dos varões. Estes furos deverão ter cerca de 40cm;
4. Limpeza da madeira;
5. Injecção de cola epoxídica Timberset® Adhesive nos furos (Figura 144);
6. Colocação dos varões Ø16 (Figura 144);
7. Preparação das próteses, incluindo limpeza;
8. Colocação e alinhamento das próteses com as vigas;
9. Injecção de calda epoxídica TG6 Timber Grout nos entalhes das próteses (Figura 145);
10. Remoção do escoramento após polimerização dos materiais epoxídicos.

Apresenta-se seguidamente os pormenores de execução de reparação do pavimento de madeira, conforme descrito anteriormente.

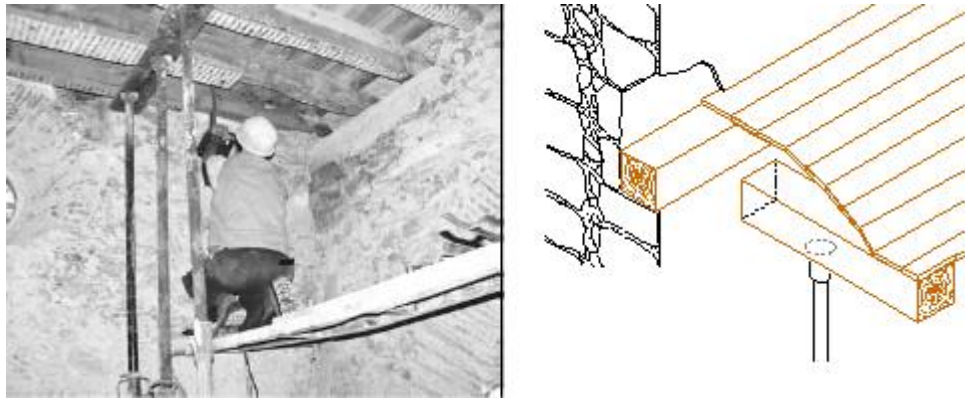


Figura 146 – Corte e remoção da madeira deteriorada após escoramento (fonte: Coias, V;2007)

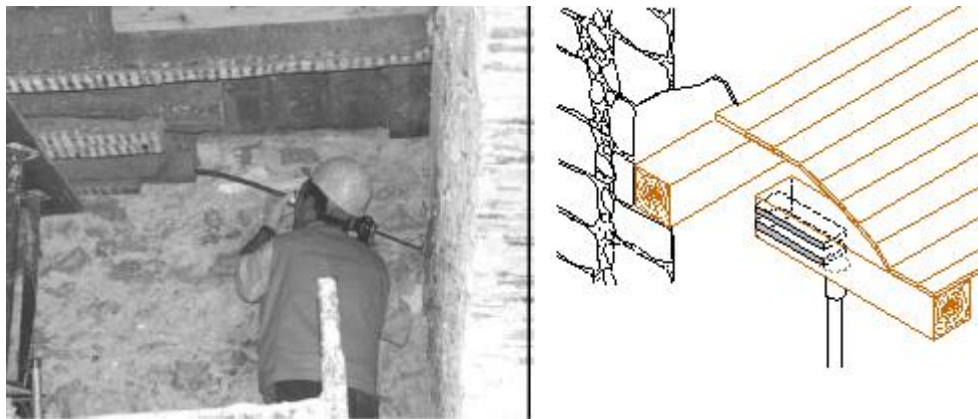


Figura 147 – Injeção de cola epoxídica nos furos para instalação dos varões (fonte: Coias, V;2007)

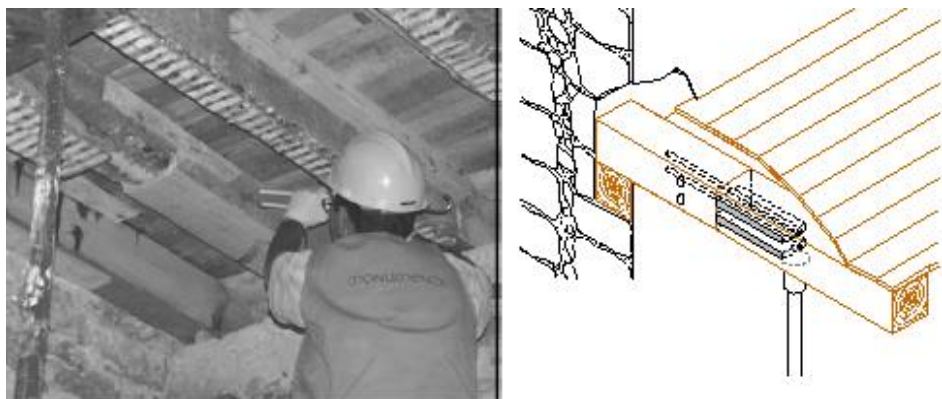


Figura 148 – Injeção de calda epoxídica nos entalhes das próteses (fonte: Coias, V;2007)

A prótese de madeira deverá ser da mesma espécie da madeira do elemento a reabilitar, ou seja, com propriedades mecânicas, de durabilidade e cor semelhantes. Deve-se escolher madeira com durabilidade natural elevada ou que tenha sido tratada em profundidade com produtos preservadores de acção fungicida e/ou termiticida. A madeira deve ainda ser sã e de qualidade adequada, isenta de defeitos e anomalias e com um teor em água entre 14% e 16%.

Em relação à cola, esta deverá ser, entre outras propriedades, tixotrópica e ter baixa tensão superficial, de forma a obter-se um bom espalhamento. A calda deverá ser de um material penetrante, adequado para o preenchimento de áreas inacessíveis, possuindo características de eliminação do ar aprisionado. No que toca ao corte e a remoção da madeira degradada, este deve ser executado com equipamento eléctrico, sem danificar a madeira. A lâmina deve estar em boas condições de forma a garantir a regularidade e rectidão do corte a realizar. Devem evitar-se as temperaturas excessivas produzidas pelo equipamento eléctrico.

Deve-se garantir que os elementos de reforço (varões/chapas) fiquem ancorados em madeira sã. Antes da aplicação dos produtos epoxídicos, é fundamental proceder-se à limpeza das superfícies da madeira, que pode ser realizada com um aspirador industrial e/ou ar comprimido, de forma a remover as partículas soltas que prejudiquem a colagem. A abertura de furos e entalhes e respectiva limpeza deverão ocorrer imediatamente antes (máximo 24 horas) da aplicação dos produtos de colagem.

As operações de mistura e a aplicação dos produtos epoxídicos devem ser realizadas de acordo com o indicado nas respectivas fichas técnicas. Os varões/chapas a instalar nos furos ou entalhes com cola epoxídica deverão ser colocados imediatamente após a injeção da cola. Os furos ou entalhes devem ser preenchidos com cola em cerca de 2/3 da totalidade do seu volume, de modo a que fique assegurado apenas um excesso ligeiro de cola.

A desmontagem de qualquer sistema de suporte provisório só poderá ocorrer quando os produtos estiverem totalmente polimerizados. Aquando da realização destes trabalhos de substituição da entrega das vigas na alvenaria, é necessário melhorar este local de assentamento, dotando-o de sistemas que possam melhorar o arejamento deste ponto, evitando assim, futuras degradações da madeira.

6.11.3.2 Ficha de Diagnóstico_FD02 – Cobertura de Estrutura de Madeira

- Localização das patologias e sua Identificação:

Compartimentos C1-1, C1-2, C1-4: observa-se uma deformação da estrutura que compõe a cobertura destes compartimentos, muito provavelmente devido à entrada de água pela mesma pois devido à dificuldade de acesso, não se consegue ter a percepção exacta. Aquando a observação dos danos e estado de conservação dos tectos, conforme referido no sub-capítulo 6.5 também se percebe das infiltrações que provêm da cobertura.

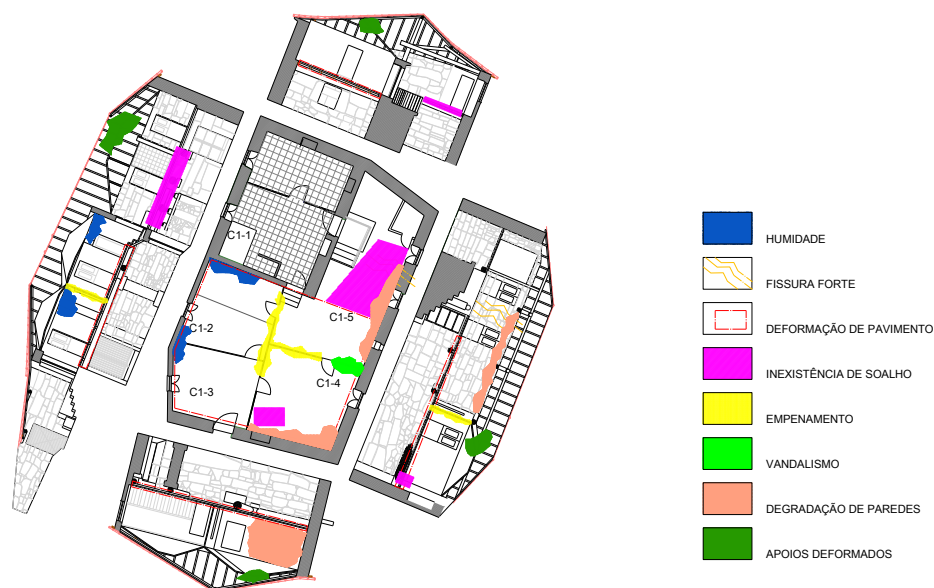


Figura 149 – Localização das patologias e identificação das mesmas - Cobertura

- Descrição da Patologia:

Pelo exterior das coberturas, verifica-se uma deformação na cumeeira e nas vertentes, associada a deslizamentos e à abertura de juntas entre as telhas.

As estruturas de madeira apresentam-se bastante afectadas pela humidade permanente nos períodos de chuva e pelos ataques bióticos. Em grande parte das coberturas, são visíveis as manifestações de humidade de precipitação nos elementos estruturais de madeira, que em alguns casos estão associadas ao apodrecimento da madeira e ao aparecimento de manchas esbranquiçadas, que correspondem a eflorescências.

Para além da humidade e do apodrecimento, algumas das ligações entre os elementos estruturais e os apoios, estão fragilizadas, fazendo com que haja uma diminuição da capacidade de suporte das estruturas de madeira podendo, em determinadas situações, conduzir a uma situação de risco devido à insuficiente capacidade resistente.

A deformabilidade excessiva e o apodrecimento dos elementos de madeira, provocam a diminuição da estanqueidade das coberturas, agravando ainda mais a deterioração das asnas de madeira que consequentemente originam movimentos horizontais indesejados para o exterior das paredes de fachada.

- Causa Aparente:

A execução da estrutura de madeira da cobertura com elementos de secção deficiente, a fluência do material e a deformação natural conduzem à deformação excessiva da sua configuração geométrica. A deformação geométrica das vertentes de cobertura provoca a abertura de juntas entre telhas que combinada com a acção da água da chuva batida pelo vento, facilita a sua penetração, humidificando os elementos de

madeira. Este fenómeno está associado ao apodrecimento da madeira, perda de secção, degradação da capacidade de resistência e de deformação do material, que conduz ao acréscimo de infiltrações até ao colapso estrutural.

- Sugestão de Reparação:

A reparação da cobertura poderá passar por: reabilitar o encontro das asnas com a cobertura, criando um “nicho” de arejamento para que o ar possa circular com o objectivo de, futuramente, não ser um local de criação e proliferação de agentes biológicos; e a ligação entre os diferentes. Esta ligação é executada com chapas metálicas aparafusadas que permitem fazer os nós das asnas. As ligações metálicas entre estes componentes da cobertura, permitem um melhor funcionamento em conjunto com todo o edifício.

Então, para iniciar a reabilitação, temos montar uma estrutura/plataforma auxiliar exterior, que servirá para trabalhos das equipas de reparação da cobertura e para suporte da cobertura provisória do edifício.

Posteriormente, retira-se a estrutura de revestimento da cobertura para se ter uma “base” de trabalho e uma visão geral dos pontos intervencionados na cobertura.

Após este procedimento, faz-se o escoramento das linhas da cobertura, procurando pontos de grande rigidez a fim de colocar as escoras. Estes pontos serão os mais próximos da parede.

Aconselha-se a introdução de cabos de aço com esticadores a ligar as pernas das asnas, evitando o seu deslizamento no topo das linhas (Figura 147).

Após estes trabalhos, devemos tratar todas as peças de madeira aplicando o produto BONDEX EXTRA TRATAMENTO da Dyrup em duas a três demãos espaçadas de uma hora, por pincelagem sem diluição, enchendo os buracos e juntas, e aplicando com abundância nos topos das peças. Passadas 48 a 72 horas após a aplicação do tratamento, aplicar as ligações metálicas entre as diferentes peças da cobertura.

Em relação aos outros elementos constituintes da estrutura da cobertura, nomeadamente as varas, o ripado e o contra-ripado, após a desmontagem, deverão ser objecto dos seguintes trabalhos:

1. Substituição de todos os elementos que se apresentem degradados por novos elementos de madeira previamente tratada com um produto preservador.
2. Limpeza dos elementos de forma a retirar todo o pó.
3. Aplicação em todos os elementos, incluindo orifícios e juntas, de um tratamento preservador por imersão de BONDEX EXTRA TRATAMENTO da Dyrup.
4. Aplicação das varas, ripado e contra-ripado, incluindo os novos elementos, previamente tratados, para substituição dos que não foram aproveitáveis.



Figura 150 – Introdução de cabos de aço com esticadores a ligar as pernas das asnas - Cobertura

6.11.3.3 Ficha de Diagnóstico_FD03 – Humidade em Paredes Exteriores

- Localização das patologias e sua Identificação:

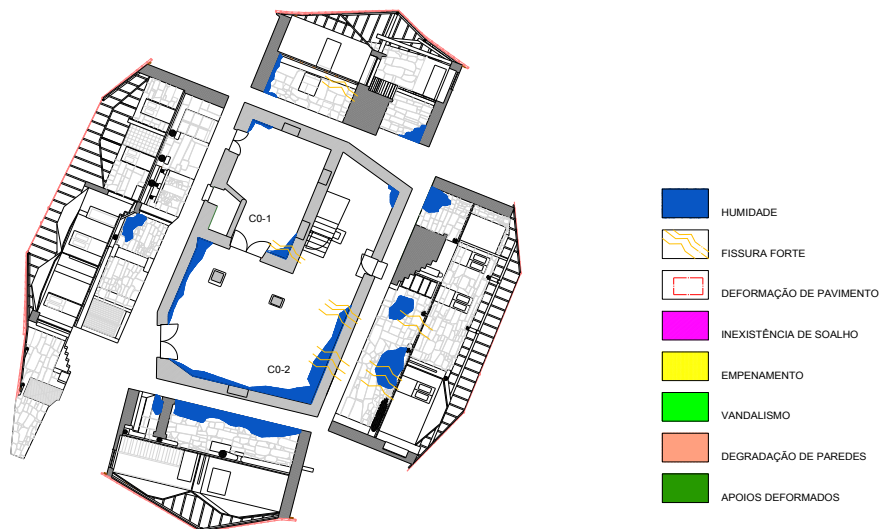


Figura 151 – Localização das patologias e identificação das mesmas - Cobertura

As paredes exteriores de alvenaria apresentam essencialmente humidade (Figura 148), conforme abordado no sub-capítulo 6.5.

No que se refere a paredes exteriores de edifícios antigos, as suas características construtivas, à base de alvenaria de pedra irregular facilitam a humedificação resultante do contacto de água da chuva. Por outro lado a humidade do terreno (devido a águas subterrâneas freáticas ou pluviais), ascende por capilaridade, através das fundações e paredes de elevação.

Naturalmente, essa humificação, que pode ser acompanhada de dissolução de sais e sua cristalização posterior, dará origem à progressiva deterioração da parede, quer dos seus revestimentos interiores, e mesmo de outros elementos e parte da construção. Numa região como a de Trás-os-Montes, com um período de chuvas relativamente curto, a espessura das paredes antigas permite geralmente a sua secagem durante a estiagem, através de um sistema de respiração permanente da parede, cuja interrupção faz correr certos riscos.

- Descrição da Patologia:

Manchas de humidade em paredes exteriores e pavimento térreo.

- Causa Aparente:

A causa desta anomalia está relacionada com a presença de água nos paramentos e o seu não escoamento para fora da zona envolvente do edifício. Pode também ser considerada uma causa, embora não sendo a causa primitiva, a composição dos rebocos que não permitem a parede “respirar” e permitem a proliferação de humidade ao longo das paredes.

- Sugestão de Reparação

Uma das soluções para “reparar” uma fracção desta anomalia, tem de passar por criar barreiras à água que está no solo. Então tem que se construir um sistema de drenagem de águas infiltradas e acumuladas junto à base das paredes exterior dos edifícios. Esta solução consiste na abertura de valas (7) junto dessas paredes, até à cota de fundação, criando aí filtros de material arenoso, mais permeável do que o terreno existente, de acordo com regras conhecidas dos escoamentos em meios porosos. Tubos drenantes em PVC perfurado (5) envolvidos por geotexteis, permitirão a captação da água drenada, e a sua condução, tão rápida quanto possível, para longe do edifício (Figura 149).

Esta solução passa por aplicar um primário (1) na parede de alvenaria (8). Neste caso usa-se um produto da empresa Imperialum IMPERKOTE F. Este produto é uma emulsão betuminosa não iónica solúvel em água constituída por betumes e resinas filerizadas e estabilizada com emulsionantes minerais coloidais que asseguram a sua estabilidade. Uma vez dada a rotura por emulsão, por evaporação da fase aquosa, consegue-se uma camada contínua. Para aplicar este produto a superfície tem de estar isenta de pó ou outro material que prejudique a normal aplicação e aderência. Usa-se uma pistola com um mínimo de 8bar de pressão para aplicar esta camada.

Após aplicação do primário, vamos introduzir uma membrana de impermeabilização POLYESTER 40 (2) da Imperialum. É uma membrana de betume polímero APP de 4,0KG/m², com armadura de poliéster de 150gr/m², protegida a polietileno em ambas faces. Depois de aplicar esta membrana, introduz-se uma camada drenante AGUADRAIN GEO (3). Trata-se de uma lâmina granular em polietileno de alta densidade

com geotêxtil fixo aos grânulos.

Depois da aplicação destas 3 camadas, temos de estender no solo uma camada separadora IMPERSEP 150 (4) da Imperialum. É uma manta geotêxtil em propileno que vai envolver a gravilha (6) onde estará o tubo drenante IMPERDRENO (5) da Imperialum, que se trata de um tubo em PVC corrugado, com ranhuras envolvido com tecido geotêxtil.

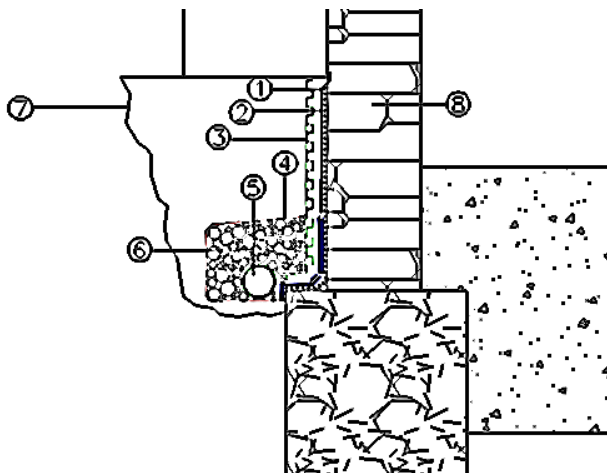


Figura 152– Protecção da fundação com drenagem e impermeabilização (fonte: Coias, V.2007)

Esta solução resolve o problema da presença de água junto dos paramentos, mas não minimiza o problema da ascensão, por capilaridade, da humidade do terreno, em contacto com a base e intradorso da fundação. Esta anomalia manifesta-se quando não existe um corte hídrico ou quando as paredes de alvenaria apresentam elevada capilaridade. A ascensão capilar progride até que se verifique o equilíbrio entre a evaporação e a capilaridade. Este fluxo de secagem (g) depende do gradiente de concentração do vapor da superfície da parede (Cs') e do ar (Ca'):

$$g = \beta (Cs' - Ca') \text{ [kg/(m}^2\text{.s)]}$$

Propõe-se então a criação de uma barreira química à subida da humidade. Neste processo vai utilizar-se o sistema STAPDRY da empresa Tecnocrete.

É um sistema que se destina à eliminação da humidade ascendente em paredes de construções antigas, através da modificação das características de capilaridade dos materiais que a constituem. O líquido repelente de água apresenta boa ligação química ao substrato mineral, baixa resistência à difusão do vapor de água, permitindo a respiração das paredes, não altera o aspecto ou as propriedades do substrato, tem resistência aos álcalis e não é poluente. Dada a sua capacidade de impregnação, este produto pode ser aplicado por gravidade, conseguindo a saturação da alvenaria da parede, em toda a espessura.

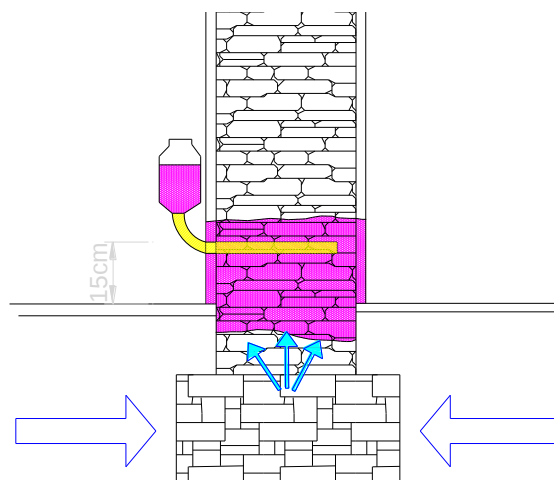


Figura 153 - Barreira horizontal com os furos a serem executados a 15cm da cota de soleira (fonte: Adaptado de Coias,V.2007)

Esta técnica processa-se da seguinte forma:

1. Marcação das zonas a tratar e remoção do reboco da parede até uma linha paralela à da barreira, para facilitar a secagem da parede. É feita uma fila de furos ao longo da parede, espaçados cerca de 15cm e a uma altura de 15cm da soleira exterior da parede.
2. Nestes furos são inseridas as “unidades de transfusão” com líquido que vai impregnando por gravidade e lentamente a parede, por forma a que as respectivas áreas de influencia vão coalescendo, e toda a espessura da parede seja abrangida.
3. As barreiras deverão tornar-se activas ao fim de um mês, possibilitando a evaporação da humidade existente na parede.
4. Os trabalhos de reparação de revestimentos só deverão ser executados quando os teores médios de humidade dos paramentos das paredes sejam iguais ou inferiores a 5%.

Uma vez concluído o tratamento, os furos são devidamente obturados com argamassas adequadas e não retrácteis.

As soluções atrás referidas para minimizar o efeito da humidade, não serão totalmente eficazes se o piso térreo (sem qualquer revestimento) dos diferentes compartimentos não for revestido convenientemente.

Uma solução possível de pavimento térreo, poderá ser, (Figura 152).

Nos compartimentos onde o piso não tem qualquer revestimento, procede-se à:

1. Decapagem até à profundidade 40cm. Limpa-se toda a zona de lamas ou outras substâncias estranhas;
2. Compacta-se o solo e de seguida coloca-se uma camada de areia siliciosa seca com uma espessura de 5cm;

3. Regulariza-se o pavimento com uma camada com 5cm;
4. Sob esta camada aplica-se uma barreira pára-vapor STX da ONDULINE que apresenta uma permeabilidade ao vapor $>1200\text{gr/m}^2/24\text{h}$;
5. Após esta preparação do piso, colocam-se as placas WL 50 da FIBRAN ECO com 5cm de espessura. Estas possuem $2,6 \times 0,6\text{m}$ e ligam-se entre si através de ligação macho-fêmea. A resistência térmica é de $1,40\text{ m}^2\text{K/w}$. à condutibilidade térmica é de $0,035\text{w/m.K}$ e resistem a 200kN/m^2 à compressão;
6. Após a colocação de uma camada com folha de polietileno, aplica-se uma camada com espessura de 4cm de betonilha que vai servir de base às “lajes” de xisto. Espalha-se uma camada de argamassa de cimento e areia com 2cm e coloca-se as lajes de xisto ou outro tipo de acabamento.

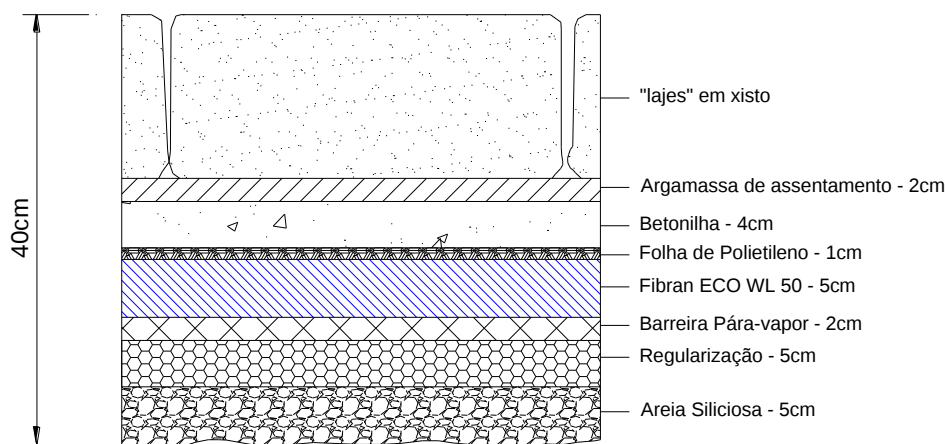


Figura 154 – Constituição de Pavimento Térreo (fonte: Coias,V.2007)

7. CONCLUSÃO

7.1 PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

No presente capítulo são apresentados resumidamente os principais resultados da investigação realizada e referindo as conclusões retiradas ao longo do trabalho. São ainda sugeridos alguns trabalhos de investigação futuros que se considera importante e que resultaram da percepção, ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, da existência de algumas lacunas na área do diagnóstico e metodologias de intervenção em estruturas de madeira antigas.

Com este trabalho pretendeu-se dar ênfase à temática da conservação e reabilitação de edifícios antigos, procurando-se avaliar o reconhecimento da importância do património histórico, arquitectónico, urbanístico, arqueológico, natural e cultural, que fez com que ao longo dos anos surgissem vários tratados a nível internacional, com o objectivo de estabelecer directrizes e de legislar as intervenções, cabendo a cada estado a responsabilidade do seu cumprimento tendo em conta a cultura e o contexto em que se insere, estudando diferentes doutrinas, cartas, recomendações e convenções para a protecção e preservação do património cultural construído. Apresentou-se também a evolução das estruturas de madeira ao longo dos tempos, desde a pré-história até à actualidade, passando pelas principais épocas e regiões onde esta teve um papel crucial.

Fez-se uma referência ao material madeira atendendo à sua origem e composição, mostrando o seu papel e desempenho como material estrutural, assim como os principais tipos de degradação e exibir as fases obrigatórias de inspecção e diagnóstico, procurando encontrar formas simples e expeditas de apoiar a decisão de manutenção/reabilitação ou substituição. Abordou-se ainda alguns dos ensaios não destrutivos e destrutivos existentes e que se resumem, na sua maioria, à avaliação da rigidez e da capacidade resistentes dos elementos de madeira. Por fim, procurou-se mostrar que existe actualmente uma grande diversidade de soluções de reabilitação/reforço, permitindo a manutenção de pavimentos antigos de madeira, em detrimento da sua substituição.

Destacou-se alguns dos procedimentos e ferramentas mais utilizados, tais como a inspecção visual, a recolha de informação histórica relativa à construção e, em particular, os ensaios não destrutivos, que permitem a caracterização do material e a percepção do estado de conservação da estrutura a analisar. Neste sentido, foi revelada a experiência tida com alguns dos vários instrumentos utilizados na inspecção de estruturas de madeira, tendo-se confirmado que são um importante auxílio na sua avaliação estrutural, particularmente na aquisição de informação qualitativa referente aos elementos de madeira. No entanto, foi possível perceber algumas das limitações que estes instrumentos ainda apresentam no que diz respeito à

estimativa de valores quantitativos de características mecânicas, nomeadamente o resistógrafo.

Foram também descritos os principais danos e defeitos da madeira, no sentido de entender os problemas mais comuns em estruturas de madeira e que podem levar à necessidade de adopção de medidas de reabilitação/reforço. Procurou-se ainda abordar a verificação de estruturas de madeira segundo o Eurocódigo 5.

O estudo de uma Pousada Medieval, com valor patrimonial, construída com materiais e técnicas da época, foi sem dúvida um desafio aliciante, uma vez que o património edificado nacional é imenso e continua a degradar-se de dia para dia, pondo em causa a preservação de valores, memórias e testemunhos da nossa cultura, que temos por obrigação salvaguardar e transmitir às gerações vindouras.

A inspecção da estrutura de madeira foi desenvolvida tendo em vista a avaliação das condições e do estado de conservação, de forma a fornecer elementos de apoio a uma futura decisão do projecto de reabilitação. A inspecção visual e o diagnóstico das patologias, foi indispensável para entender o estado de conservação e danos observados, percebendo assim as suas causas.

Concluiu-se assim que, a deformação excessiva das coberturas, provocada pela fluência da madeira, elementos de secção insuficiente, provocando abertura de juntas entre telhas que combinada com a acção da água das chuvas, facilitava a penetração da água, sendo esta a razão principal do aparecimento das anomalias observadas, que poderiam ter sido minoradas ou até mesmo evitadas, caso tivessem sido tomadas medidas preventivas, como a conservação e manutenção periódica do edifício. No pavimento de madeira esta anomalia relaciona-se com a presença de humidade, devido infiltrações pelos vãos envidraçados e pela cobertura.

Nesse sentido, e com o objectivo de analisar a fiabilidade de vários tipos de ensaios para a caracterização física e mecânica dos elementos estruturais de madeira, foi realizada uma campanha de ensaios não destrutivos e destrutivos no pavimento de madeira cuja madeira foi identificada como castanho. Por sua vez, o Resistógrafo e o Humidímetro possibilitaram a avaliação, de uma forma expedita e pouco intrusiva, o estado de conservação do pavimento de madeira, em particular o primeiro, pois apresenta informação qualitativa de grande interesse. Isto deve-se ao facto da informação ser apresentada num registo desenhado da variação da resistência à perfuração, permitindo reconhecer variações de densidade ao longo das secções dos elementos estruturais, anéis de crescimento, zonas de degradação biológica, fendas e vazios existentes nas peças, normalmente não visíveis por inspecção visual.

A realização de ensaios mecânicos à flexão sobre provetes de madeira pequenos e isentos de defeitos teve o objectivo de determinar as propriedades físico-mecânicas da madeira, nomeadamente a tensão de rotura à flexão na direcção do fio e o módulo de elasticidade na direcção do fio. Os provetes utilizados nos ensaios de flexão, não estavam totalmente isentos de defeitos, pois resultaram de vigas em

mau estado de conservação pois estas foram resultado duma parte do pavimento que não continha soalho e estavam muito expostas às intempéries. Estes apresentavam alguns nós e fendas que condicionam também a resistência global dos elementos de madeira.

Verificou-se que a tanto a tensão de rotura à flexão na direcção do fio como a o módulo de elasticidade apresentam valores baixos comparativamente com os valores a usar no cálculo de estruturas existentes de madeira. Alguns estudos realizados nos últimos 50 anos indicam que, em princípio, a resistência da madeira não diminui de forma visível com a idade. Com a idade a madeira terá tendência a ficar com uma maior dureza superficial e resistência mecânica, mas a perder flexibilidade, tornando-se mais frágil. Sujeita a cargas permanentes, terá tendência a sofrer uma ligeira diminuição do módulo de elasticidade.

Utilizou-se assim, os valores da norma EN338 (classe de resistência mínima para Castanho) para o cálculo da verificação de segurança em relação aos estados limites de serviço, tendo em conta as especificações referidas no Eurocódigo 5.

O modelo numérico do pavimento mostrou alguma fiabilidade na previsão do seu comportamento estrutural e dos seus elementos estruturais, sendo que as diferenças encontradas estão relacionadas com várias razões, entre elas o facto de no modelo a ligação entre os vários elementos construtivos, nomeadamente viga-parede ser apoiada, uma vez que na realidade existe algum grau de encastramento. A dificuldade em representar corretamente a geometria dos elementos estruturais e as suas condições de apoio pode também estar na origem das diferenças observadas.

7.2 PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No decorrer deste trabalho experimental e de pesquisa bibliográfica surgiram algumas linhas de investigação cujo interesse e oportunidade resultaram evidentes e que são fundamentalmente as seguintes:

- a) Estudos experimentais mais aprofundados acerca do comportamento das estruturas de madeira, procurando que forneçam informações importantes acerca das características mecânicas e sobre a necessidade de reabilitar ou substituir os elementos;
- b) Estudos específicos sobre equipamentos de ensaio não destrutivo em elementos estruturais de madeira, tais como Ultra-sons, Georradar, entre outros., possam vir a fornecer informação quantitativa mais rigorosa na avaliação das suas propriedades mecânicas;
- c) Caracterização experimental de reforços globais de pavimentos de madeira, nomeadamente na sua ligação à parede, favorecendo o grau de “encastramento” correcto que existe nesta ligação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1962), NP180. *Anomalias e Defeitos da Madeira*. s.l. : Instituto Português da Qualidade.
- 1995-1:2005, EN. 2004. *Timber Structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 4 - Machine grading - grading machine settings and machine controlled systems*. Brussels : CEN, 2004.
- 384, EN. 2004. *"Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density"*. Office for Official Publications of the European Communities. Brussels, Belgium : s.n., 2004.
- 4305:1995, NP. 1995. *Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação Visual*. Lisboa : IPQ, 1995.
- Alvarez, R. e Martitegui, F.A. 2000. *Estructuras de Madera - Diseño Y Calculo*. s.l. : Asociación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho, 2000.
- Appleton, João. 2003. *Reabilitação de Edifícios Antigos*. Lisboa : Orion, 2003.
- Arriaga, F. 2002. *Intencione estruturas de madeira*. Madrid : AITIM, 2002.
- Benoit, Y. 1997. *Le guide des essences de bois*. Paris, France : CTBA, 1997. ISBN 2-212-011821-X.
- Botelho, J. 2006. *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos. Mestrado em Reabilitação do Património Edificado*. Porto : FEUP, 2006.
- Branco, J., Cruz, P. e Lucas, S. 2004. *avaliação do comportamento de vigas antigas de pavimento e reutilizar no Museu da Indústria de Chapalaria. CIMAD 04.1º Congresso Ibérico. A madeira na Construção*. Guimarães : s.n., 2004.
- Brites, R. 2011. *Avaliação de Segurança da Estruturas Antigas de Madeira. Dissertação elaborada em colaboração com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil para a obtenção de grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Minho*. Guimarães : s.n., 2011.
- Cachim, P. 2007. *Construções em Madeira - A madeira como material de construção*. Porto : Publindústria, Edições Técnicas, 2007.
- Cachim, Paulo Barreto. 2007. *Construções em madeira - A madeira como material de construção*. Porto : Publindústria, Edições Técnicas, 2007.
- Carvalho, A. 1996. *Madeiras Portuguesas - estrutura anatómica, propriedades e utilização, Vol. I e II*. Lisboa : Instituto Florestal, 1996.
- Madeiras Portuguesas, Vol.1*. s.l. : Instituto Florestal, 1996. ISBN 972-8097-23-9.

- Cavaco, Luís Soares. 2001.** *Revestimentos de Paredes Exteriores de Madeira*. Lisboa : Monografia, Tecnologias de Construção, 11º Mestrado em Construção do I.S.T, 2001.
- Choo, B.S. 1995.** *Timber Engineering - Step2, Almere Centrum Hout, Lecture B3* . 1995.
- Coelho, R. 2010.** *Metodologia Geral para o restauro de construções históricas. Técnicas de inspeção de alvenarias, cantarias e revestimentos*. Dissertação de mestrado. Uta. Vila Real : s.n., 2010.
- Cóias, V. 2006.** *Inspeções e Ensaio na Reabilitação de Edifícios*. Lisboa : I.S.T Press, 2006.
- Coias, Vitor. 2009.** Casas Antigas Portuguesas. *PEDRA&CAL*. Julho, 2009, Vol. nº43.
- Cóias, Vitor. 2007.** *Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos*. Lisboa : Argumentum, 2007.
- Costa, A. 2005.** *Reabilitação de Estruturas. Aportamentos da disciplina. Mestrado em Reabilitação do Património Edificado*. FEUP. Porto : s.n., 2005.
- Costa, F. 1955.** *Enciclopédia prática da construção civil*. s.l. : Portugália Editora, 1955.
- Cruz, H. e Machado, J. Rodrigues,. 1997.** *Madeira para Construção - M1: Especificação de Madeiras para estruturas*. Lisboa : LNEC, 1997.
- Carta de Foro de Gralheira**, concelho de Vila Pouca de Aguiar – P.M.H.L.C., 1 Vol., p. 650, Forais Antigos, maço 9, nº 8, f.10; Chancelaria de D. Afonso III, Livro 2, f. 20; Forais Antigos de Leitura Nova, nº 106 vº; Tradução do latim e transcrição por João Parente, na obra intitulada *Idade Média no Distrito de Vila Real*, Tomo I, Documentos desde o ano 569 ao ano 1278, pp. 471, Âncora Editora, Lisboa, 1ª ed., 2013.
- Dias, Alfredo, et al. 2009.** *Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira*. Lisboa : Edições Profissionais Sociedade Unipessoal, Lda., 2009.
- Dias, T. e Costa.A. 2013.** *Avaliação e Reabilitação de Estruturas de Alvenaria e Madeira*. Porto : ISEP|NCREP, 2013.
- Dias, Tiago Ilharco de Moura Pinho. 2008.** *Pavimentos de madeira em edificios antigos. Diagnóstico e intervenção estrutural*. Porto : s.n., 2008.
- EN338. 2003.** *Structural timber - Strength classes" - Office for Official Publications of the European Communities*. Brussels : s.n., 2003.
- EN408. 2003.** *"Structural timber - Strength classes". Office for Official Publications of the European Communities*. Brussels, Belgium : s.n., 2003.
- Faria, A. 2006.** *Aportamentos da disciplina de Reabilitação Estruturas de Madeira. Mestrado em Reabilitação do Património edificado*. FEUP. Porto : s.n., 2006.

- Faria, J. 2002.** *European timber buildings as an expression of technological cultures*. s.l. : Elsevier Science, Collection Patrimoine, 2002.
- Feio, A. 2005.** *Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behavior*. Tese de Doutoramento. Universidade do Minho. 2005.
- Fitchen, J. 1986.** *Building construction before mecharization*. s.l. : The Massachusetts Institute of Tecnology, 1986.
- Freitas, Vasco Peixoto. 2012.** *Manual de apoio ao projecto de reabilitação de edifícios antigos*. FEUP. Porto : s.n., 2012.
- ICOMOS. 2004.** *Recomendações para a Análise, Conservação e Restauro Estrutural do Património Arquitectónico* Do ICOMOS. Guimarães : s.n., 2004.
- Jestaz, B. 1996.** *Architcture of the renaissance: from Prunelleschi*. s.l. : Thames and Hudson, 1996.
- Kostof, S. 1996.** *História de la Arquitectura, Volu1*. Madrid : Alianza Forma, 1996.
- Lopes, D. e Branco, J. 2002.** *Curso de Estruturas de madeira*, FEUP. Porto : s.n., 2002.
- M9. 1997.** *Humidade da madeira, Fichas Técnicas*. Lisboa : LNEC, 1997.
- Machado, J.S., Cruz, H. e Nunes, L. 2000.** *Inspecção de elementos estruturais de Madeira. Selecção das técnicas não destrutivas a aplicar in situ*. Lisboa : Tese de Doutoramento, 2000.
- Madison, W. 1999.** *Wood Handbook - Wood as an engineering material*. Department of Agriculture, Forest Service : s.n., 1999.
- Mateus, J.M. 2002.** *Técnicas Tradicionais de construção de Alvenaria e Madeira*. Lisboa : Livros Horizonte, 2002.
- Mateus, T. 1961.** *Bases para o dimensionamento de Estruturas de Madeira*. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1961.
- Muler, W. e Vogel. 1999.** *Atlas de arquitectura, vo 1. Mesoptamia a Binzacio* : Alianza Editorial, 1999.
- Negrão, J. e Amorim, F. 2009.** *Projecto de Estruturas de Madeira*. Porto : Publindustria, 2009.
- np.
- NP180. 1962.** *Anomalias e Defeitos da Madeira*. Instituto Português da Qualidade. 1962.
- NP614. 1973.** *Madeiras. Ensaio de teor de água*. s.l. : IPQ, 1973.
- NP618. 1973.** *"Madeiras. Ensaio de compressão axial"*. Instituto Português da Qualidade. 1973.
- Madeiras. Determinação da massa volúmica*. 1973.

- NP619. 1973.** *"Madeiras. Ensaio de flexão estática". Instituto Português da Qualidade. 1973.*
- NP620. 1973.** *"Madeiras. Ensaio de flexão dinâmica". Instituto Português da qualidade. 1973.*
- NP621.** *"Madeiras.Ensaio de tracção transversal". Instituto Português da Qualidade.*
- NP622. 1973.** *"Madeiras. Ensaio de fendimento". Instituto Português da Qualidade. 1973.*
- NP623. 1973.** *"Madeiras. Ensaio de corte". Instituto Português de Qualidade. 1973.*
- Nunes, P, Nobre, T e Machado, J. 2000.** *Degradação e Reabilitação de Estruturas de Madeira. Importância da Acção de Térmitas Subterrâneas.* Lisboa : Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, 2000.
- Oliveira, E., Galhano, F e Pereira, B. 1994.** *Construções primitivas em Portugal.* s.l. : Dom Quixte, 1994.
- Ornelas, E. Ilharco, T. e Guesdes, Paupério, E. Costa, A. 2006.** *A inspecção como instrumento de decisão. Apresentação de um caso prático num edifício com valor Patrimonial.* Porto : PATORREB, 2006.
- Património, Anuário do. 2012.** *Boas Práticas de Coservação e Restauro. Artigos Técnico-científicos Formação e investigação Políticas públicas.* s.l. : Gecorpa, 2012.
- Paupério, E, et al. 2001.** *Inspecção e diagnóstico de estruturas. Congresso PATRIMOÓNIO 2001.* Porto : s.n., 2001.
- Pereira, S. 2009.** *Avaliação Experimental das Principais propriedades Mecânicas das Peças em Madeira Antiga. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. FEUP.* Porto : s.n., 2009.
- Rodrigues, S. 2006.** *História Breve da Engenharia Civil - Pilar da Civilização Ocidental.* Porto : Ordem dos Engenheiros, Norte, 2006.
- Ross, P. 2002.** *Appraisal and repair of timber structures.* s.l. : Thomas Telford, 2002.
- Salavessa, E. Novembro 2005.** *1º Congresso Internacional Casa Nobre um Património para o Futuro. Casa das Artes de Arcos de Valdevez : s.n., Novembro 2005.*
- A construção Vernácula do Alvão, volume 1 (Enquadramento), volume 2 (Caracterização, Reabilitação,Proposta).** Vila Real : Tese de Doutoramento, reimpressão, UTAD, 2004.
- História da Construção. Vila Real :** Apontamentos das Aulas de Arquitectura da Licenciatura em Engenharia Civil da UTAD, 2013/2014.
- Historical Timber-Framed Buildings/ Characterization and acquaintance.** Lisboa : LNEC, 2011.
- Segurado, J. 1908.** *Alvenaria e Cantaria.* Lisboa : Biblioteca de Instrução Profissional, 1908.

- Segurado, João. 1909.** *Trabalhos de Carpintaria Civil, Vol IV.* Lisboa : Biblioteca de Instrução Profissional, 1909.
- Serafim, A. 2012.** *Análise in-situ do comportamento físico de argamassas de revestimento de fachadas.* Dissertação de mestrado. IST. Lisboa : s.n., 2012.
- Tomlinson, R. 1995.** *Greek and roman architecture.* Londres : British Museum Press, 1995.
- Vitruvius. 1860.** *The architecture of Marcus Vitruvius Pollio.* London : Translated from the Latin by Joseph Gwilt, 1860.
- Windasdy, J.E. 1994.** *Wood Properties, in Amtzen Charles J.,* Orlando : Encyclopedia of Agricultural Science, 1994.
- Wright, T. 1862.** *A history of domestic manners and sentiments in England during the middle ages.* Londres : Chapman&Hall, 1862.
- Yeomans, D. 1999.** *Studies in the history of civil engineering, vol.8: The development of timber as a structural material.* . s.l. : Ashgate Pub, 1999.
- Zoreta, L. 1986.** *Curso de Mecánica y tecnologia de los Edificios antiguos.* colégio Oficial Arquitectos Madrid. Madrid : s.n., 1986.

