

TIPIFICAÇÃO DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE MADEIRA EM COBERTURAS DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Reabilitação do Património Edificado

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor JOSÉ MANUEL MARQUES AMORIM DE ARAÚJO FARIA, do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

MIGUEL ALBERTO CAMEIRA LOPES

2007

RESUMO

O domínio científico em que se insere esta dissertação é da reabilitação de edifícios antigos, não apenas de carácter histórico ou monumental mas todos os que possuem uma estrutura resistente mais tradicional com paredes em pedra e pavimentos e coberturas em madeira.

O estudo refere-se apenas às coberturas destes edifícios executadas com estrutura de madeira.

Dentro desse âmbito, o objectivo do trabalho consistiu em produzir uma sistematização do conhecimento no domínio estudado, envolvendo as técnicas e tecnologias de reabilitação disponíveis.

Descrevem-se os vários tipos de coberturas e estruturas de cobertura tradicionais, os materiais aplicados e as formas de execução, recorrendo-se sempre que possível a imagens esquemáticas e fotográficas.

Descrevem-se também os aspectos de carácter metodológico mais importantes relativos ao levantamento, inspecção e diagnóstico destas estruturas.

Quanto aos conteúdos de carácter mais inovador, estes incluem a tipificação dos principais problemas normalmente encontrados (catálogo de patologias e anomalias estruturais) e uma síntese das principais soluções para esses problemas seguindo a mesma ordem para mais fácil identificação do binómio problema/solução para cada situação (catálogo de soluções tipo).

Esta dissertação tem assim como principal resultado a concretização de uma *check-list* de problemas e soluções tipo para estruturas de cobertura de madeira em edifícios antigos, que se destina a ser usada pelo meio técnico interessado no tema.

Palavras-chave: Estruturas de madeira em edifícios antigos; Reabilitação; Estruturas de cobertura; Catálogo de soluções tipo.

ABSTRACT

The scientific domain, of this dissertation, is the rehabilitation of ancient buildings, not only those with historical or monumental character but all those that have a more traditional frame structure with stone walls and floors and roofs in timber.

The study concerns only the roofs of buildings made with timber structure.

Considering this scope, the objective of the work was to produce a systematization of knowledge in the studied domain, involving the available techniques and technologies of rehabilitation.

The different type of roofs and its traditional structures, the materials used and the forms of execution are described wherever possible including representative photos and schemes of the different solutions.

The more important aspects of methodological nature relative to the survey, inspection and diagnosis of these structures are also described.

As for the contents of more innovative character, these include the classification of the main problems usually found (pathologies and structural anomalies catalogue) and a synthesis of the main solutions for these problems following the same order for easier identification of the binomial problem/solution for each situation (standard solutions catalogue).

Therefore, the main outcome of this dissertation is the implementation of a check-list of standard problems and solutions for roof timber structures of ancient buildings, which was conceived so that it can be easily used by the practitioners of the area interested in the subject.

Key words: Ancient buildings timber structures; Rehabilitation; Roof structures; Standard solutions catalogue.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, o Professor José Amorim Faria, o meu agradecimento pelo seu apoio, por todos os conhecimentos transmitidos e pela valiosa orientação na definição do âmbito e estrutura deste trabalho, pela sua enorme disponibilidade e motivação ao longo de todo este processo, principalmente na etapa final do período de escrita da dissertação.

À SOPSEC – Sociedade Prestadora de Serviços de Engenharia Civil, S.A., empresa onde exerço a minha actividade profissional, em particular à Direcção de Fiscalização, pela compreensão e apoio à concretização de este objectivo.

Aos colegas de Mestrado e Especialização, pela amizade e saudável troca de conhecimentos que existiu desde o início.

Aos amigos, pelo entusiasmo que sempre me concederam.

Finalmente, à minha família, pela sua permanente dedicação e incentivo à realização deste trabalho.

INDÍCE

	Página
Capítulo I – Introdução	1
1.1. Objecto, âmbito e justificação	1
1.2. Bases do trabalho desenvolvido.....	2
1.3. Organização da dissertação	3
Capítulo II – Definição do problema e do objecto de estudo	4
2.1. Materiais usados em estruturas de coberturas	4
2.2. Caracterização do objecto de estudo – coberturas em edifícios antigos em Portugal	5
2.2.1. Caracterização e Tipificação de coberturas em madeira	7
2.2.1.1. Cobertura plana	12
2.2.1.2. Cobertura inclinada	12
2.2.1.3. Cobertura inclinada de uma água.....	12
2.2.1.4. Cobertura inclinada de duas águas.....	14
2.2.1.5. Cobertura inclinada de três águas	14
2.2.1.6. Cobertura inclinada de quatro águas	14
2.2.1.7. Cobertura cónica	15
2.2.1.8. Piramidais, cobertura de torreão ou ponta de diamante	16
2.2.1.9. Águas empenadas (ou de empenas cortadas)	17
2.2.1.10. Cobertura de capacete	17
2.2.1.11. Cobertura em mansarda	17
2.2.1.12. Cobertura poligonal.....	18
2.2.1.13. Cobertura semicircular	19
2.2.1.14. Cobertura de galeria.....	20
2.2.1.15. Trapeiras e mirantes.....	20
2.2.1.16. Clarabóias	20
2.2.1.17. Cúpulas.....	21
2.2.2. Caracterização e Tipificação das Asnas	23
2.2.2.1. Asnas vulgares	26
2.2.2.1.1. Asna simples	27
2.2.2.1.2. Asna composta ou mista	27
2.2.2.1.3. Pequena asna	28
2.2.2.2. Meias-asnas	29

2.2.2.2.1. Meia-asna simples.....	29
2.2.2.2.2. Meia-asna composta	30
2.2.2.2.3. Meia-asna de escoras.....	30
2.2.2.2.4. Meia-asna de rincão.....	31
2.2.2.2.5. Pequena meia-asna	32
2.2.2.3. Asnas de mansarda	32
2.2.2.3.1. Asna de quatro partes	32
2.2.2.3.2. Asna para tectos cilíndricos.....	33
2.2.2.3.3. Asna de escoras	34
2.2.2.4. Asnas de lanternim	34
2.2.2.5. Asnas especiais	34
2.2.2.5.1. Asna de alpendre	34
2.2.2.5.2. Asna de nível	35
2.2.2.5.3. Asna de tesoura	36
2.2.2.5.4. Asnas de tipo fabril	36
2.2.2.5.4.1. Asnas de tipo fabril simples	37
2.2.2.5.4.2. Asnas de tipo fabril composta	37
2.2.2.5.5. Asna tipo belga.....	38
2.2.2.5.6. Tipologias de asna segundo concepção estrutural.....	38
2.2.3. Cobertura tradicional nos edifícios antigos portugueses	39
2.2.4. Execução das asnas	40
2.2.4.1. Ligações	41
2.2.4.2. Pormenores construtivos	46
2.3. Considerações sobre o comportamento estrutural das asnas.....	56
2.3.1. Análise estrutural da asna tradicional de coberturas de edifícios antigos.....	59
Capítulo III – Inspeção, diagnóstico e metodologias	67
3.1. Aspectos de carácter geral.....	67
3.2. Inspeção e Diagnóstico.....	69
3.3. Principais aspectos a verificar numa inspeção.....	71
3.4. Novas tecnologias de avaliação e diagnóstico de estruturas de madeira	74
3.5. Metodologia de reabilitação de estruturas de madeira em edifícios antigos.....	80
3.5.1. Aspectos de carácter geral.....	80
3.5.2. Principais critérios e regras a seguir na reabilitação de estruturas de madeira.....	80

3.5.3. Grau de degradação dos elementos	82
3.5.4. Esquemas de apoio à decisão sobre a reabilitação de coberturas	83
Capítulo IV – Tipificação dos problemas	86
4.1. Introdução e generalidades	86
4.1.1. Pontos mais sensíveis das estruturas de madeira	87
4.1.2. Principais causas da degradação	88
4.2. Defeitos principais das peças estruturais em madeira – Anomalias de origem	88
4.3. Patologias e anomalias mais frequentes que levam a perdas de integridade das peças	92
4.3.1. Descrição das principais patologias e anomalias	93
4.4. Principais anomalias estruturais	103
4.5. Proposta de classificação dos problemas	104
4.5.1. Secção insuficiente	106
4.5.2. Deformações excessivas e roturas a longo prazo	106
4.5.3. Uniões/ligações	107
4.5.4. Roturas localizadas	108
4.5.5. Rotações nos apoios	108
4.5.6. Escorregamento nas ligações	108
4.5.7. Contraventamento insuficiente ou deficiente	109
4.5.8. Empenamento das peças e fendas devidas a retracção	109
4.5.9. Encurvadura	110
4.5.10. Pormenores construtivos mal concebidos ou mal executados	110
Capítulo V – Tipificação das soluções – Catálogo de soluções de reforço e reparação	111
5.1. Introdução e generalidades	111
5.2. Generalidades sobre técnicas de intervenção estrutural	112
5.3. Descrição geral das Soluções por problema – Técnicas de intervenção correntes	115
5.3.1. SECÇÃO INSUFICIENTE	115
5.3.1.1. Reforço de elementos por aumento de secção com nova madeira	116
5.3.1.2. Reforço de elementos de madeira por aplicação de empalmes	117
5.3.1.3. Reforço por aplicação de resinas de epóxido e varões embebidos	120
5.3.1.4. Reforço com armaduras longitudinais, laminados de fibras de carbono ou chapas de aço na pele de madeira	122
5.3.1.5. Reforço com perfis e chapas metálicas	124

5.3.1.6. Reforço com tirantes metálicos	126
5.3.1.7. Substituição da estrutura de madeira por perfis metálicos	131
5.3.1.8. Execução de novos elementos estruturais adicionais de madeira	132
5.3.1.9. Reparação por substituição de elementos estruturais.....	132
5.3.2. DEFORMAÇÕES EXCESSIVAS	133
5.3.2.1 Colocação de novas estruturas de suporte à cobertura	134
5.3.2.2 Aplicação de tirantes metálicos	135
5.3.2.3 Reparação por reforço dos elementos estruturais.....	135
5.3.2.4 Reparação por substituição de elementos estruturais.....	135
5.3.3. FALHAS NAS UNIÕES	135
5.3.3.1. Reparação/reforço dos nós de ligação por técnicas tradicionais.....	136
5.3.3.2. Consolidação dos nós por reforço com peças de madeira coladas	139
5.3.3.3. Consolidação de ligações com resinas de epóxido e chapas metálicas .	140
5.3.3.4. Consolidação de ligações com resinas de epóxido e varões de aço.....	142
5.3.3.5. Consolidação de ligações por injeção com resinas de epóxido.....	143
5.3.3.6. Ligações de madeira com reforço por FRP	144
5.3.4. PROBLEMAS NOS APOIOS	146
5.3.4.1. Introdução de novo apoio sobre linha adjacente ao muro.....	147
5.3.4.2. Reforço dos apoios com perfis metálicos.....	148
5.3.4.3. Soluções com recurso a nova madeira a acrescentar à antiga.....	149
5.3.4.4. Próteses de argamassa de epóxido e/ou varões de reforço	151
5.3.4.5. Substituição de partes de elementos recorrendo a próteses	158
5.3.4.6. Consolidação dos nós estruturais com reforço com barras coladas	160
5.3.5. DEFICIÊNCIAS DE CONTRAVENTAMENTO	161
5.3.5.1. Cruzes de Santo André	161
5.3.5.2. Escoras de boneca	163
5.3.5.3. Execução de elementos adicionais de aço	164
5.3.6. EMPENAMENTO E FENDAS	166
5.3.6.1. Reparação de fendas com parafusos.....	166
5.3.6.2. Reparação de fendas por cintagem.....	167
5.3.6.3. Selagem e injeção de resina de epóxido em reparação de fissuras	167
5.3.6.4. Reparação de fendas com adesivo de epóxido e varões de reforço	171
5.3.6.5. Reforço com barras inclinadas.....	172
5.3.7. ENCURVADURA	174

5.3.7.1. Substituição de toda a peça de madeira por uma nova	174
5.3.7.2. Reforço de elementos com acréscimo de peças de madeira.....	175
5.3.7.3. Cruzes de Santo André	176
5.3.7.4. Execução de elementos adicionais de aço	176
5.4. Quadro resumo de soluções	176
5.5. Tópicos associados à avaliação técnico-económica das soluções propostas	178
5.5.1. Critérios de avaliação económica.....	178
5.5.2. Critérios de avaliação do ponto de vista da sustentabilidade.....	178
5.5.3. Durabilidade das intervenções de reabilitação de estruturas de madeira	179
5.5.4. Monitorização e facilidade de manutenção.....	179
Capítulo VI – Conclusão	180
6.1. Principais resultados obtidos	181
6.2. Recomendações e desenvolvimentos futuros	183
Bibliografia.....	185

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Capítulo II	
Figura 1 – Imagem esquemática de um tipo de cobertura de edifícios antigos.....	8
Figura 2 – Esquema da constituição de uma cobertura tradicional	10
Figura 3 – Diversos tipos de telhados	12
Figura 4 – Diversos tipos de coberturas de uma água	13
Figura 5 – Esquemas de estruturas simples de coberturas	13
Figura 6 – Planta esquemática da estrutura de uma cobertura tradicional.....	15
Figura 7 – Estrutura de cobertura cónica	16
Figura 8 – Estrutura de um dos Torreões do Palácio do Freixo	16
Figura 9 – Madeiramento de cobertura piramidal de planta quadrada	17
Figura 10 – Estrutura de coberturas de mansarda	18
Figura 11 – Estrutura de cobertura pentagonal	19
Figura 12 – Lanternim do salão nobre do Palácio do Freixo	21
Figura 13 – Estrutura de cobertura em cúpula esférica	22
Figura 14 – Estrutura de cobertura em cúpulas de arco quebrado.....	22
Figura 15 – Esquema de asna simples; ferragens e dimensões tipo das peças.....	24
Figura 16 – Edquema estrutural de uma asna de cobertura de duas águas.....	25
Figura 17 – Esquema e decomposição por componentes de uma asna simples	27
Figura 18 – Esquemas de asna simples e asna mista	27
Figura 19 – Esquema de uma asna composta.....	28
Figura 20 – Esquemas de asnas pequenas com e sem pendural.....	28
Figura 21 – Esquemas de asnas pequenas com e sem pendural.....	28
Figura 22 – Pormenor esquemático de união entre asnas e meias-asnas	29
Figura 23 – Esquema de meia-asna simples	29
Figura 24 – Esquema de meia-asna composta.....	30
Figura 25 – Esquema de meia asna de escoras	31
Figura 26 – Pormenor de apoio de asna e beiral	31
Figura 27 – Inscrição da asna numa semicircunferência, dividida em quatro partes	33
Figura 28 – Esquema de asna de mansarda para tectos cilíndricos	33
Figura 29 – Esquema de asna de mansarda de escoras	34
Figura 30 – Esquema de asna de alpendre	35
Figura 31 – Esquema de asna de nível.....	35

Figura 32 – Diversos tipos de asnas.....	36
Figura 33 – Esquema de asna de tesoura.....	36
Figura 34 – Asnas de tipo fabril.....	37
Figura 35 – Esquemas de asnas de tipo fabril composta.....	38
Figura 36 – Esquemas de asnas de tipo fabril composta.....	38
Figura 37 – Desabamento de asna mal concebida e debilitada na zona mais solicitada.....	41
Figura 38 – Esquema tridimensional de asnas com ligadores metálicos.....	42
Figura 39 – Esquema de samblagens das asnas.....	42
Figura 40 – Esquema de ferragens das asnas.....	43
Figura 41 – Estribos e esticadores metálicos.....	44
Figura 42 – Pormenores de execução de ligações entre elementos das asnas.....	45
Figura 43 – Pormenores de assentamento de apoios de asnas.....	46
Figura 44 – Pormenores de assentamento de apoios de asnas.....	46
Figura 45 – Pormenores de assentamento de apoios de asnas.....	47
Figura 46 – Esquema da ligação perna-linha com tirantes metálicos.....	47
Figura 47 – Esquema de ligações pendural-pau de fileira e pendural-pernas.....	48
Figura 48 – Pormenores de ligação pendural-linha.....	49
Figura 49 – Pormenores de ligação pendural-linha.....	49
Figura 50 – Madres.....	50
Figura 51 – Uniões em linhas.....	50
Figura 52 – Ligação perna-linha em asna desmontada.....	51
Figura 53 – Ligação perna-linha.....	51
Figura 54 – Ligação pendural – pernas.....	52
Figura 55 – Ligação pendural – pernas em asna nova.....	52
Figura 56 – Ligação pendural – pernas reforçada com colagem de nova madeira.....	53
Figura 57 – Ligação ideal entre o pendural e a linha.....	54
Figura 58 – Exemplo de uma ligação mal concebida entre o pendural e a linha.....	54
Figura 59 – Ligação pendural-linha.....	54
Figura 60 – Degradação de escora da asna principal.....	55
Figura 61 - Ligação escora – perna reforçada.....	55
Figura 62 - Ligação escora – perna em madeira lamelada-colada.....	55
Figura 63 – Esquema de secções e afastamentos tradicionais estruturas das coberturas.....	56
Figura 64 – Esquema de funcionamento e descarregamento da estrutura de cobertura tradicional.....	57
Figura 65 – Relação esquemática entre coeficiente de dispersão e coeficiente de segurança.....	58

Figura 66 - Soluções de reforço estudadas para a ligação perna-linha	61
Figura 67 – Modelo de elementos finitos adoptado para a asna de forças concentradas	61
Figura 68 – Diagramas de momentos flectores para a acção do peso-próprio	62
Figura 69 – Diagramas de momentos flectores para a acção da neve	62
Figura 70 – Ligação ideal entre o pendural e a linha	63
Figura 71 – Exemplo de uma ligação mal concebida entre o pendural e a linha	63
Figura 72 – Diagrama de momento flector devido ao peso-próprio.....	64
Figura 73 – Diagrama da distribuição de esforço transverso para os casos de carga de neve	64

Capítulo III

Figura 74 – Várias espécies lenhosas encontradas numa asna.....	73
---	----

Capítulo IV

Figura 75 – Nó da madeira	89
Figura 76 – Exemplo de uma fenda longitudinal.....	90
Figura 77 – Linha com fenda de secagem extensa e que indica a direcção inclinada do fio, e exemplo de apoio bem executado e com boa ventilação de todas as faces dos elementos	93
Figura 78 – Aspecto de degradação por fungos de podridão de um rodapé	94
Figura 79 – Exemplos de degradação por bolores e fungos cromogéneos.....	95
Figuras 80 – Degradação provocada por bolores.	96
Figuras 81 – Degradação provocada por fungos cromogéneos	96
Figura 82 – Aspecto de madeira atacada por fungos de podridão	96
Figuras 83 – Exemplo de podridão parda e de podridão branca ou fibrosa.....	97
Figura 84 – Exemplo de peça atacada por insectos xilófagos	97
Figura 85 – Aspecto da madeira degradada pela térmita	98
Figuras 86 – Exemplo de galeria exterior fabricada pelas térmitas para circulação.....	98
Figuras 87 – Estrutura de madeira queimada	103
Figuras 88 – Estrutura de madeira queimada	103

Capítulo V

Figura 89 – Empenamento de vigas de madeira	105
Figura 90 – Ligações de prótese de topo em peças de madeira	113
Figura 91 – Ligações de samblagem em peças de madeira	113
Figura 92 – Reforço de asnas de coberturas de edifícios antigos da “Baixa Pombalina”	114

Figura 93 – Rotura de peça de madeira.....	116
Figura 94 – Reforço de secção com nova madeira.....	117
Figura 95 – Fases do reforço por aplicação de empalmes, parafusos e cintagem.....	118
Figura 96 – Reforço de linhas com cavilhas e cintas metálicas.....	118
Figura 97 – Reparação linha asna com cavilhas inox ou aço.....	119
Figura 98 – Reparação linha asna com cavilhas aço inox e resina de epóxico.....	119
Figura 99 – Aumento da inércia de vigas de madeira com recurso a argamassa de epóxico.....	121
Figura 100 – Execução do reforço de vigas com compósitos de FRP.....	122
Figura 101 – Reforço de peça com laminados de fibra de carbono.....	123
Figura 102 – Procedimento de reforço de peças com laminados de fibras de carbono.....	124
Figura 103 – Reforço de peças com perfis metálicos nas laterais.....	125
Figura 104 – Forma alternativa de reforço com varões embebidos.....	126
Figura 105 – Reforço de peças com aplicação de tirantes pré-esforçados.....	128
Figura 106 – Novas peças de reforço em madeira e introdução de tirantes de aço.....	128
Figura 107 – Reforço de asnas com tirantes de aço.....	129
Figura 108 – Reforço das vigas deformadas com tirantes metálicos com esticadores de aço.....	129
Figura 109 – Linha da asna reforçada com tirantes metálicos.....	130
Figura 110 – Reforço de coberturas simples de duas águas com introdução de tirantes.....	130
Figura 111 – Reforço de coberturas simples de duas águas com novas de linhas em madeira.....	131
Figura 112 – Reconstituição de nós com resinas de epóxico armadas.....	135
Figura 113 – Reparação nó com resinas de epóxico.....	136
Figura 114 – Chapas metálicas de ligação entre peças.....	137
Figura 115 – Diferentes tipos de ligadores metálicos.....	137
Figura 116 – Reforço de ligações com elementos de madeira.....	139
Figura 117 – Esquema de execução de reforço de ligação com resinas e chapas.....	140
Figura 118 – Esquema de execução de reforço de ligação de canto com resinas e chapas.....	141
Figura 119 – Esquema de execução de reforço de ligação em T com resinas e chapas.....	142
Figura 120 – Perfis pultrudidos de FRP.....	144
Figura 121 – Entrega das estruturas de madeira de coberturas em paredes com novos apoios.....	147
Figura 122 – Reforço com perfis metálicos ou peças unidas por braçadeiras metálicas.....	148
Figura 123 – Reforço com chapas metálicas embutidas na madeira.....	148
Figura 124 – Acréscimo de secção com nova madeira.....	150
Figura 125 – Exemplos de próteses e reforço de ligações e apoios.....	151
Figura 126 – Prótese de apoio de asna/frechal em resina com varões de fibra de vidro.....	152

Figura 127 – Reforço de apoio de perna em muro com prótese em resina de epóxico e varões de aço.....	153
Figura 128 – Esquema de substituição de entrega danificada por prótese de epóxico.....	153
Figura 129 – Peças com furos para introdução de varões embebidos em resinas.....	154
Figura 130 – Esquema de diversas técnicas de substituição de entrega danificada por próteses de resina de epóxico.....	154
Figura 131 – Prótese de reforço de apoios de pernas de cobertura.....	155
Figura 132 – Esquema de execução de reforço por introdução de varões.....	156
Figura 133 – Esquema de secção de peças reforçadas com varões.....	156
Figura 134 – Reforço de vigas de madeira com fibras de carbono.....	157
Figura 135 – Prótese de nova madeira na ligação perna-linha.....	158
Figura 136 – Reforço de nós nas estruturas de madeira com barras coladas.....	160
Figura 137 – Contraventamento por Cruzes de Santo André.....	162
Figura 138 – Contraventamento de asnas com execução de Cruzes de Santo André.....	162
Figura 139 – Contraventamento por execução de Escoras de boneca.....	164
Figura 140 – Reforço de contraventamento através da ligação de diagonais entre as asnas.....	165
Figura 141 – Reparação de fendas com injeção de resinas de epóxico.....	167
Figura 142 – Preenchimento de fissuras com resina de epóxico.....	168
Figura 143 – Consolidação de peças fissuradas com resinas de epóxico.....	169
Figura 144 – Injeção de resina de epóxico em selagem de fissuras.....	170
Figura 145 – Reparação de fendas com adesivo de epóxico e varões de reforço.....	172
Figura 146 – Peça de madeira fissurada.....	173
Figura 147 – Esquema de reforço de peças fissuradas com varões inclinados.....	173

ÍNDICE DE QUADROS

	Página
Capítulo II	
Quadro 1 – Tabelas tradicionais de dimensionamento estrutural expedito	57
Capítulo III	
Quadro 2 – Principais vantagens e desvantagens das principais técnicas de inspecção não destrutiva de estruturas de madeira.....	78
Quadro 3 – Selecção da técnica não destrutiva em função do objectivo da inspecção.....	79
Capítulo IV	
Quadro 4 – Problemas de estabilidade de estruturas de cobertura	105
Capítulo V	
Quadro 5 – Resumo de principais problemas correntes e soluções respectivas em estruturas de madeira de coberturas de edifícios antigos.....	177

Capítulo I – Introdução

1.1. Objecto, âmbito e justificação

O estudo das patologias das construções, e mais concretamente neste trabalho, dos problemas em estruturas de madeira de cobertura de edifícios antigos, e a sistematização das técnicas e tecnologias para a sua reabilitação, são assuntos de significativa importância para o meio técnico. Tanto mais que a conservação e reabilitação de edifícios tem vindo a registar uma elevada evolução nos últimos tempos no nosso país, apresentando ainda grandes perspectivas de crescimento a curto prazo.

A informação técnica existente, especificamente para este tipo de intervenções, é ainda relativamente reduzida, algo diversa nas abordagens e pouco acessível no nosso país, encontrando-se dispersa na bibliografia. Pelo que, se torna difícil a sua estruturação com vista à adopção da solução mais adequada a cada tipo de intervenção.

Nesse contexto, pretende-se com este trabalho fazer uma sistematização do conhecimento no que se refere às técnicas e tecnologias de reabilitação em estruturas de madeira, e de entre estas, com um destaque quase exclusivo nas coberturas correntes para edifícios.

A opção de limitar o âmbito desta dissertação às estruturas de madeira de cobertura está relacionada com o objectivo de se conseguir sistematizar e pormenorizar adequadamente as técnicas de intervenção disponíveis. Para além disso, dado que as coberturas com estrutura em madeira são bastante frequentes no parque nacional de edifícios antigos, o seu estudo tem uma evidente grande utilidade prática imediata.

Aspectos como o cálculo estrutural e modelações numéricas ou dados experimentais não fizeram parte do âmbito deste trabalho, onde apenas se fazem algumas referências e considerações a resultados referidos em outros estudos recentes e a critérios gerais a salvaguardar nas intervenções de reabilitação.

Faz-se ainda, no final, uma caracterização e avaliação resumida das vantagens e inconvenientes das principais técnicas correntemente empregues e das novas tecnologias com aplicação neste campo, indicando-se para cada uma dessas técnicas, o âmbito de aplicação, a finalidade e as principais condicionantes à respectiva utilização em situações correntes.

1.2. Bases do trabalho desenvolvido

O trabalho desenvolvido nesta dissertação apoiou-se em outros trabalhos, fundamentalmente em trabalhos recentes de investigadores portugueses e de alguns estrangeiros nesta área (referidos na Bibliografia).

De entre estes, destacam-se as teses de António Duarte (Mestrado, 2004), na área da reabilitação de elementos estruturais de madeira com argamassa epoxídica armada, de Artur Feio (Doutoramento, 2006), na parte relacionada com a inspeção e diagnóstico de estruturas históricas de madeira, nomeadamente com métodos não destrutivos, de Jerónimo Botelho (Mestrado, 2006), na mesma área e parte experimental, de Helena Cruz (Doutoramento, 1995), no estudo das ligações entre elementos de estruturas de madeira, de Jorge Branco (Doutoramento, em curso) no relacionado com o estudo experimental da influência no comportamento estrutural global das ligações entre peças de madeira, particularmente de asnas, de José Cruz (Mestrado, 1993), na área ligada à deterioração, reparação e técnicas de reforço de estruturas de madeira, de Romana Rodrigues (Mestrado, 2004), na experiência de obra com aplicação de técnicas de reforço estrutural em construções antigas de madeira, e do João Graça (Mestrado, por concluir), no estudo e caracterização de intervenções de reabilitação em coberturas com estrutura de madeira em edifícios históricos.

Foi realizada uma exaustiva pesquisa bibliográfica e normativa relacionada com o tema estudado. Consultaram-se diversas referências bibliográficas de âmbito mais abrangente relacionadas com a madeira, as estruturas de madeira, e entre estas em particular das coberturas dos edifícios antigos. Foram consultadas várias revistas técnicas (*Engenharia e Vida, Pedra e Cal, Monumenta, Património-Estudos*), artigos e comunicações a congressos e seminários (nomeadamente: *A intervenção no Património: Práticas de Conservação 2002, PATORREB2004 e 2006, WCTE2006, QIC2006, CIMAD2004*) e diversa informação *online*, técnica e comercial, dentro da área (com destaque para a informação obtida da ROTAFIX®).

A enumeração destas referências encontra-se discriminada no capítulo da Bibliografia.

1.3. Organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos:

No *Capítulo 1* faz-se uma breve apresentação e resumo do trabalho, do respectivo âmbito e organização e das bases bibliográficas fundamentais.

No *Capítulo 2* desenvolve-se o problema e o objecto de estudo, caracterizando-se as coberturas e estruturas de cobertura tradicionais em edifícios antigos, os materiais e as formas de execução correntemente seguidas na sua execução e montagem originais.

No *Capítulo 3* descrevem-se os aspectos mais importantes relativos ao levantamento, inspecção e diagnóstico de estruturas de cobertura, sendo descritas e analisadas de forma sintética as principais novas tecnologias de avaliação e diagnóstico de estruturas de madeira. Descrevem-se também os principais critérios e princípios das metodologias de reabilitação de coberturas de edifícios antigos.

No *Capítulo 4* é feita a tipificação dos problemas das estruturas de madeira de coberturas, começando por um enquadramento das suas causas e das fragilidades destas estruturas, passando depois a classificar os problemas mais relevantes, analisando-os mais detalhadamente.

No *Capítulo 5* apresenta-se uma síntese das principais soluções para os problemas referidos no capítulo anterior. Segue-se a mesma ordem de classificação dos problemas para mais fácil identificação do binómio problema/solução para cada situação específica concreta.

Pretendeu-se construir um catálogo de soluções de reforço e reparação, que possa de alguma forma ser útil na selecção e definição em intervenções deste tipo e também servir de base para a produção de listas semelhantes para outros tipos estruturais com destaque para os pavimentos.

No *Capítulo 6* enumeram-se as conclusões gerais resultantes deste trabalho e sugerem-se ainda desenvolvimentos e estudos futuros dentro da área.

Capítulo II – Definição do problema e do objecto de estudo

2.1. Materiais usados em estruturas de coberturas

Para além das peças metálicas, de ferro e aço, que fazem parte das formas tradicionais de construir as ligações de estruturas de madeira, e em especial nas de cobertura, nomeadamente nas asnas, o material fundamental das estruturas de coberturas dos edifícios antigos é a madeira.

A visão da madeira como um material tradicional, bem conhecido, usado pelo homem desde há longo tempo e trabalhado ainda com base num conhecimento sobretudo empírico, está hoje em dia ultrapassada, tendo começado a sê-lo desde o final da segunda guerra mundial com o aparecimento de novos materiais derivados de madeira e o desenvolvimento de novos sistemas construtivos e de regras de dimensionamento mais objectivas.

Existe actualmente uma diversidade de produtos de madeira e respectivas utilizações, de novos produtos de madeira processados, com características bastante atractivas para a sua aplicação, quer sob os pontos de vista da forma, dimensões e aspecto quer, sobretudo, das características físicas e mecânicas. As técnicas de ligação sofreram também uma importante evolução, traduzida no desenvolvimento de colas de grande resistência e durabilidade e no desenvolvimento de ligadores e ligações mais eficientes.

No que respeita à durabilidade da madeira, tida sempre como a principal vulnerabilidade associada à madeira, a maioria das espécies com interesse comercial está caracterizada sob esse ponto de vista e dispomos de conhecimento e meios para saber em que condições deve ser aplicada ou de que forma podemos protegê-la prolongando a sua vida útil. Também neste campo se tem verificado uma significativa evolução, quanto à lógica de protecção da madeira e às técnicas correntes de preservação e tratamento, que estão a evoluir cada vez mais para as abordagens tendencialmente menos agressivas para o ambiente e menos tóxicas para o homem.

No campo do dimensionamento de estruturas, dispomos actualmente de modernas regras de cálculo (Eurocódigo 5) e de um extenso conjunto normativo (normas europeias - CEN), que nos permitem tratar a madeira a par de outros materiais de construção, assim como especificar o material e caracterizar e verificar o seu desempenho de um modo objectivo.

A madeira é um material natural de origem biológica, orgânico, formado por uma matéria heterogénea e anisotrópica, elaborada por um organismo vivo de estrutura celular complexa que é a árvore. A árvore desempenha as funções estruturais, de transporte da seiva, de transformação e armazenamento dos produtos da fotossíntese.

A composição química da madeira está directamente relacionada com as suas características mecânicas, de trabalhabilidade, a sua durabilidade e a sua estética.

A composição, características, propriedades mecânicas e físicas, os factores que as influenciam e a classificação da madeira, quanto à resistência e qualidade, constituem assuntos estudados ao longo da elaboração desta dissertação, recorrendo esta tese a documentos na bibliografia, sobretudo dissertações de mestrado.

2.2. Caracterização do objecto de estudo – coberturas em edifícios antigos em Portugal

Pretende-se seguidamente enquadrar a reabilitação de edifícios antigos no panorama português, iniciando por uma perspectiva histórica até aos nossos dias, detalhando as diversas vertentes do problema como os princípios, critérios e soluções tradicionais correntemente adoptadas.

Em termos estruturais, pode definir-se por edifício antigo todo o edifício que, datado até à primeira metade do século XX, apresenta uma estrutura portante vertical em alvenaria/cantaria de pedra, adobe, taipa ou tijolo, contendo no interior elementos resistentes em pedra, madeira, ferro ou já em betão armado. Nesses elementos interiores incluem-se os pisos que poderão ser abobadados em pedra ou tijolo, em abobadilha de tijolo, vigados de madeira ou ferro ou, mais recentemente, vigados de betão armado. A cobertura destes edifícios pode ser recta ou abobadada, mas sempre normalmente com estrutura em madeira e revestimentos de telha.

Dentro desta classificação, entende-se por monumento/edifício histórico toda a construção que, pela sua grandiosidade ou pelo que representa para os povos ou local onde se encontra inserido, é factor de identidade. De acordo com Bernard Feilden (*Conservation of Historic Buildings*, pp.1): *“...Um edifício histórico é aquele que nos proporciona um sentimento de admiração e nos faz querer saber mais sobre o povo e a cultura que o produziram. Ele possui valor arquitectónico, estético, histórico, documental, arqueológico, económico, social e também político e espiritual ou simbólico; mas o primeiro impacto é sempre emocional, porque ele é um símbolo da nossa identidade e continuidade cultural – uma parte da nossa herança...”*

Neste trabalho não se fará a distinção entre os edifícios correntes e as construções ditas monumentais ou históricas. No entanto, a maior relevância dos segundos relativamente aos primeiros obriga, na aplicação das metodologias de intervenção, a um cuidado e uma

responsabilidade acrescidas na tomada de decisão e na recolha dos elementos de apoio a essa decisão. Em particular, aspectos como o respeito pelo edifício, a compatibilidade entre os materiais e técnicas construtivas, a reversibilidade das acções, o princípio da intervenção mínima, assumem nestes edifícios um maior peso que não deve ser descurado. Qualquer intervenção em edifícios monumentais ou históricos tem de ser considerada no contexto da reabilitação da totalidade da construção.

O enfoque deste trabalho dentro dos, já anteriormente designados, edifícios antigos, vai para as estruturas de madeira de suporte das coberturas, que nos pontos seguintes iremos analisar em pormenor.

- Sistemas construtivos de edifícios antigos: A construção tradicional em Portugal – o exemplo da casa burguesa do Porto

Pode-se designar construção tradicional como o conjunto de procedimentos relacionados com certas formas de manuseamento materiais simples, resultantes em técnicas e sistemas de construção de edifícios até finais do século XIX, período a partir do qual se dá início a uma lenta incorporação de novos materiais e conhecimentos científicos.

Como exemplo, apresenta-se a descrição do sistema construtivo da arquitectura tradicional do Porto, mais concretamente da sua casa urbana, também conhecida por casa burguesa. Trata-se portanto de edifícios não monumentais e de construção corrente, um tipo de edificação inserida em contexto urbano, cujo desenvolvimento esteve ligado à actividade comercial.

Pode-se concluir que, para além das permanências encontradas no sistema construtivo, é possível observar uma grande diversidade de variações, resultantes da marca dos mestres construtores, característica intrínseca da construção tradicional.

Os materiais utilizados na construção dos edifícios antigos da cidade do Porto são, de modo análogo aos empregues na construção antiga em todas as épocas da história, os materiais base, a pedra e a madeira.

A madeira é o material mais utilizado na construção de edifícios antigos, isto porque, entre outras qualidades, a madeira era o único material com capacidade para funcionar à tracção (para além do ferro, mais recentemente), era fácil de transportar e de trabalhar, existindo com alguma abundância por todo o país.

As construções com estrutura de madeira, relativamente às de alvenaria de pedra, apresentam a vantagem de serem mais ligeiras, deformáveis e económicas. Os seus inconvenientes são conhecidos: a relativamente fácil combustão, e a durabilidade, esta influenciada pela exposição às

agressões do clima, pela acção da humidade e o consequente ataque e degradação causada por agentes biológicos.

“Pode-se dizer que, salvo raríssimas excepções, até meados do século XIX, as casas do Porto (mesmo já as velhas casas estreitas e altas da fachada de tabique, dos bairros da Sé e da Vitória) têm telhados de quatro águas, de telha 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.” [Oliveira, E., Galhano, F., *Telhados do Porto*, in *Arquitectura Tradicional Portuguesa*]

“A partir de finais do século XIX, vemos vulgarizar-se o telhado de duas águas, no sentido frente fundo, com as empenas dos *oitões* por vezes muito elevadas, continuando a linha frontal a ser horizontal” [idem]. O que vulgarizou a execução de coberturas com duas águas foi a introdução da telha plana com encaixes, conhecida como telha Marselha, que permitiu aumentar as pendentes das vertentes, garantindo assim um maior aproveitamento do vão da cobertura.

Regra geral, as casas antigas do Porto apresentam nos seus telhados alguma espécie de construção suplementar. A construção de águas furtadas, trapeiras e mirantes representa uma prática corrente, quer durante a construção da casa, quer posteriormente.

Os telhados do Porto apresentam clarabóias de muitos formatos, sendo o mais comum o de clarabóia circular ou elíptica.

2.2.1 Caracterização e Tipificação de coberturas em madeira

De seguida faz-se um levantamento da terminologia, uma perspectiva histórica das tipologias construtivas, de coberturas tradicionais em Portugal, com enfoque e detalhe na análise e classificação das estruturas de cobertura e das asnas em particular.

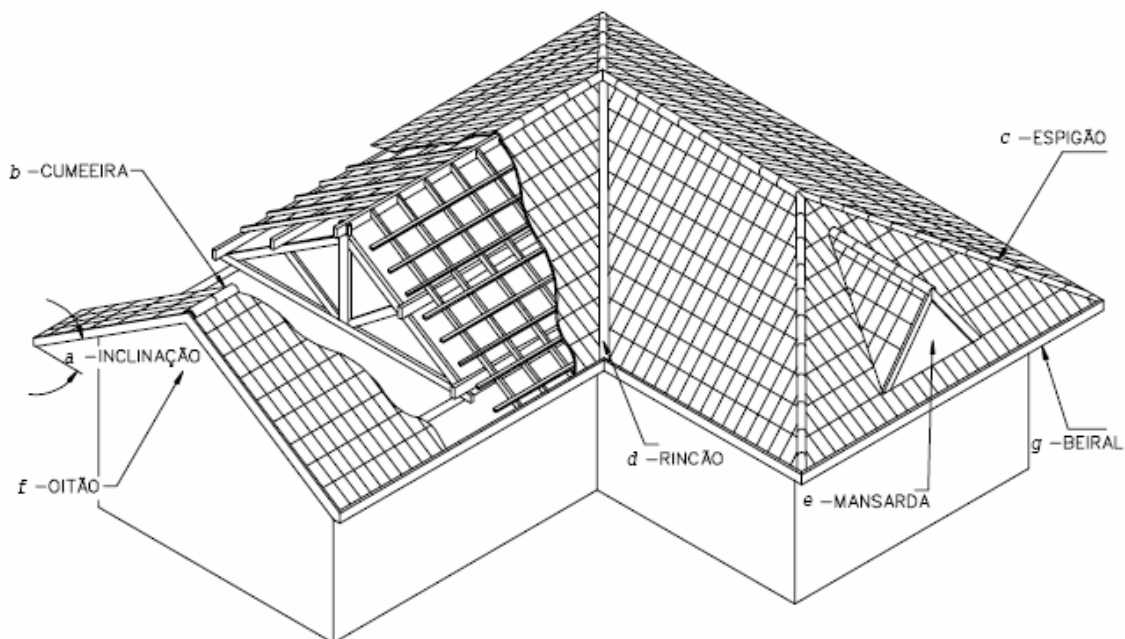


Figura 1 – Imagem esquemática de um tipo de cobertura de edifícios antigos (“Manual de aplicação de telhas cerâmicas”- Associação Portuguesa dos Industriais da Cerâmica de Construção, 1998)

TIPOS DE COBERTURAS – PROPOSTA DE TERMINOLOGIA

Como já vimos, as coberturas dos edifícios antigos são, de uma forma geral, executadas com uma estrutura principal em madeira. De modo análogo aos pavimentos, até há poucas décadas as estruturas das coberturas eram basicamente concebidas de uma forma empírica. Como exemplo dos conhecimentos empíricos tradicionais temos que as tábuas de guarda-pó têm espessuras entre 25 e 35 mm e vãos entre 50 e 70 cm, e que sobre estas tábuas assentam ripas de secção 4x2 cm² onde por sua vez assenta a tradicional telha cerâmica.

A estrutura de cobertura mais simples, conhecida em edifícios antigos, é constituída por duas peças principais (pernas) que definem a inclinação do telhado e peças de secção semelhante definindo os cumes junto às empenas em coberturas de 4 águas, ou simplesmente reproduzindo a forma das empenas em pedra nos telhados a duas águas. Ligadas a estas peças principais, normalmente no mesmo plano e com ligações de marcenaria, assentam peças secundárias de madeira definindo vãos de cerca de 70 cm, sobre os quais assenta o guarda-pó, a ripa e a telha ou, em soluções de telha vã, a vara, a ripa e a telha.

Pode também definir-se uma estrutura de cobertura como a estrutura que faz a transição entre as ripas de apoio da telha e as paredes resistentes ou vigas do edifício. Esta transição é conseguida, tradicionalmente, por um sistema de grelhas ortogonais sucessivas, em que o espaçamento e a

resistência das peças lineares que a constituem diminuem à medida que se sobe de nível: nos inferiores adoptam-se peças com grande vão, bastante afastadas e com grande rigidez e resistência e, nos superiores, peças com pequeno vão, pouco afastadas e com resistência e rigidez reduzidas. Ainda se pode ver uma cobertura como o conjunto do *madeiramento* mais o telhado. Sendo o *madeiramento* uma estrutura ou armação em madeira, em cuja parte superior o telhado assenta.

A tridimensionalidade da estrutura, ou seja, a sua concepção espacial, possui grande relevo na concepção de estruturas de madeira de coberturas. Na verdade, a grande familiaridade existente com as estruturas executadas em betão armado associada à relativamente escassa prática de construção metálica, são um forte obstáculo a uma boa concepção tridimensional, ao emprego de contraventamentos, à limitação dos comprimentos livres de encurvadura, e desta forma, à utilização em estruturas de um material com um relativo baixo módulo de elasticidade como a madeira.

É de destacar a importância nas coberturas, para além da concepção espacial da estrutura, da atenção ao detalhe das ligações e à deformabilidade da madeira.

Uma cobertura tradicional em edifícios antigos, que será estudada em pormenor neste trabalho, é constituída pelos seguintes elementos (ver figura 2):

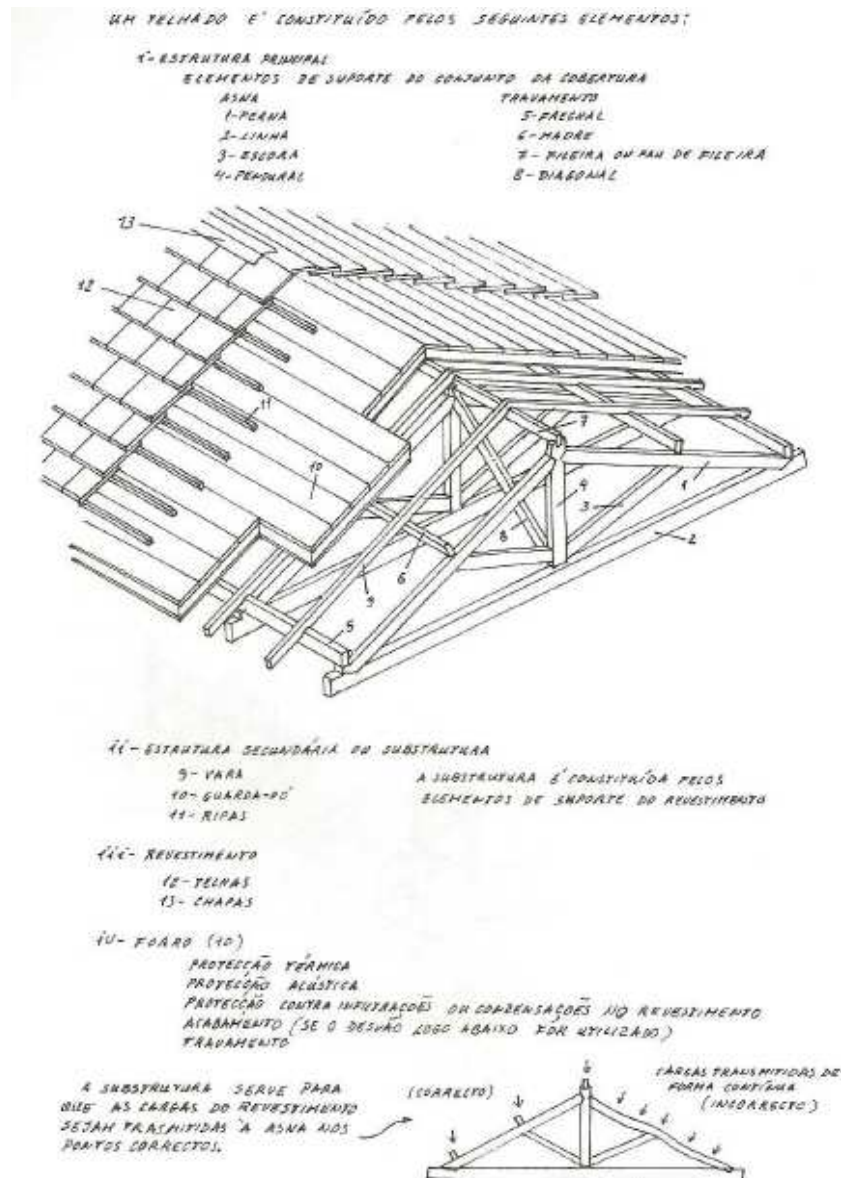


Figura 2 – Esquema da constituição de uma cobertura tradicional (Mascarenhas, J., 2006)

- i. Estrutura principal – o conjunto de elementos de suporte da cobertura, constituído tradicionalmente por asnas e travamentos. As asnas são, na sua forma tradicional, constituídas por pernas (1), linha (2), escoras (3), pendural (4). Os elementos de travamento consistem no frechal (5), madres (6), fileira (7), e diagonal (8);
- ii. Estrutura secundária ou subestrutura – é constituída pelos elementos de suporte do revestimento (que normalmente consiste em telhas (12) e chapas (13), ou em casos particulares em pedra ou revestimento de origem vegetal), nomeadamente: varas (9), guarda-pó (10) e ripas (11). A subestrutura, no caso as varas e ripas, servem para transmitir as cargas do revestimento às asnas nos pontos correctos (nós);

- iii. O forro (10) pode cumprir as seguintes funções: protecção térmica, acústica e contra as infiltrações de água, como acabamento se o desvão for utilizado, e ainda como travamento das varas.

Para que um telhado tenha um bom comportamento, seja durável e cumpra as exigências previstas, deve verificar-se o cumprimento de regras e requisitos quanto à forma, volumetria, inclinação, pormenores construtivos, concepção estrutural, reacção ao fogo e ventilação, entre outros.

Neste campo é de realçar a importância da ventilação correcta das coberturas para a durabilidade e desempenho dos elementos de madeira da cobertura).

Desde a antiguidade que a estrutura das coberturas era constituída por grandes traves de madeira ligadas com samblagens mais ou menos complexas (consoante o conhecimento dos construtores), possuindo uma subestrutura que transmitia as cargas dos revestimentos à estrutura principal.

- Coberturas vulgares

As coberturas vulgares, ou normais, são aquelas de duas ou quatro águas. Pode considerar-se que todas as restantes são construídas por motivos de ordem arquitectónica, devido à irregularidade da superfície da área construída, ou por outras exigências estranhas à construção.

Nas construções de planta regular, os traçados das coberturas são, neste contexto, obtidos racionalmente. No caso de ter empenas será através de duas águas regulares de igual inclinação, dividindo assim a superfície de cobertura em duas partes iguais no sentido paralelo às fachadas e perpendicular às empenas. A linha que separa as duas vertentes é designada por *espigão*.

A inclinação normal dos telhados em Portugal é de 26 a 27°, dependendo ainda da localização geográfica e altitude, influenciada directamente pelas diferenças de clima.

O principal elemento construtivo das estruturas de madeira das casas de construção tradicional apresenta-se sob a forma de um simples tronco ou toro de madeira, tradicionalmente de Carvalho, de Castanho ou, em menor número, de pinho silvestre (*riga*), que vulgarmente se designa por pau rolado. Este tronco de madeira, de várias dimensões (18 a 25 cm de diâmetro, por 7m de comprimento máximo) simplesmente descascado, é o principal elemento das estruturas dos pavimentos, das escadas interiores e das coberturas.

Na execução das coberturas, os paus rolados constituem os principais elementos das suas estruturas, apresentando-se sob a forma de tesouras, fileiras, madres, frechais e contra-frechais.

2.2.1.1. COBERTURA PLANA

Normalmente consideravam-se como coberturas planas as que, na realidade, eram pouco inclinadas. Em geral, a sua estrutura escondia-se atrás de balaustradas, cornijas imponentes ou parapeitos. [Cole, E., 2003]

2.2.1.2. COBERTURA INCLINADA

Na sua versão mais simples, esta estrutura consiste num conjunto de asnas paralelas (nos telhados de uma ou duas águas), complementadas nos topos do edifício por meias asnas colocadas segundo a bissectriz do cunhal (nos telhados de planta rectangular com três ou quatro águas). Estas asnas são em geral simétricas e apresentam um ou dois nós, ao longo da perna, entre a cumeeira e o apoio. [Manual de aplicação de telhas cerâmicas - Associação Portuguesa dos Industriais da Cerâmica de Construção, Coimbra, 1998]

2.2.1.3. COBERTURA INCLINADA DE UMA ÁGUA

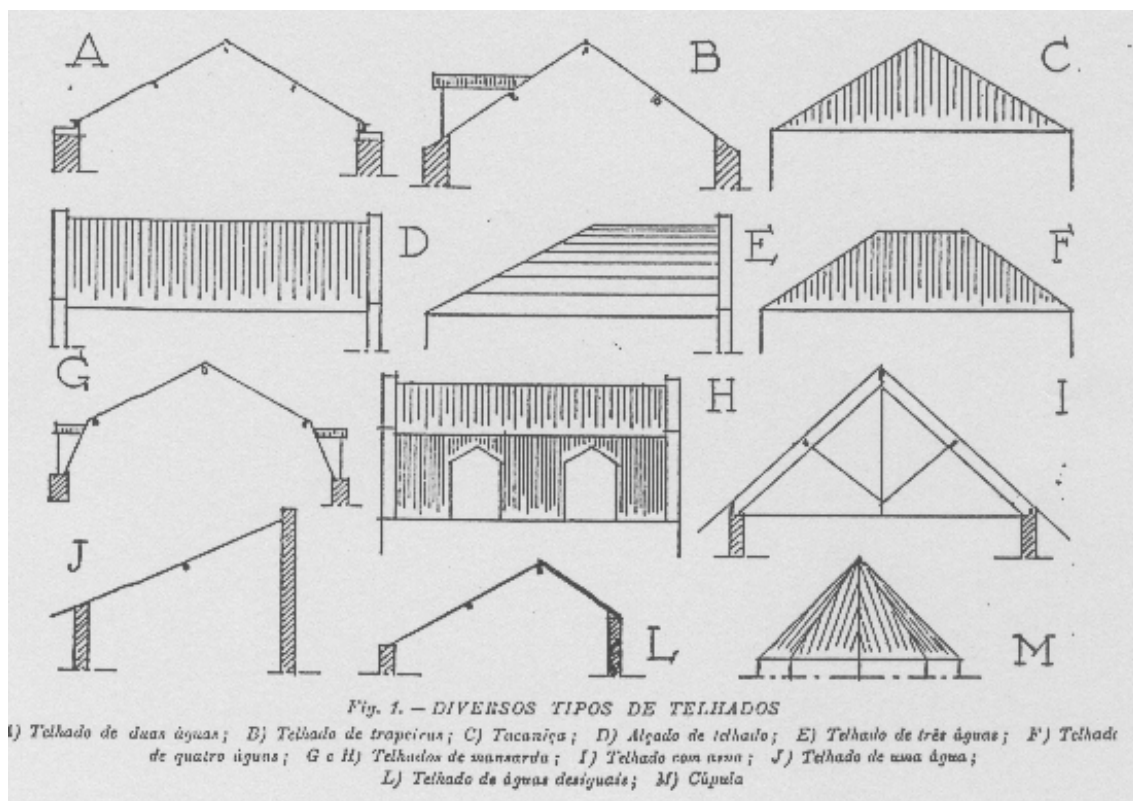


Figura 3 – Diversos tipos de telhados (“Enciclopédia da construção civil”, Costa, F.)

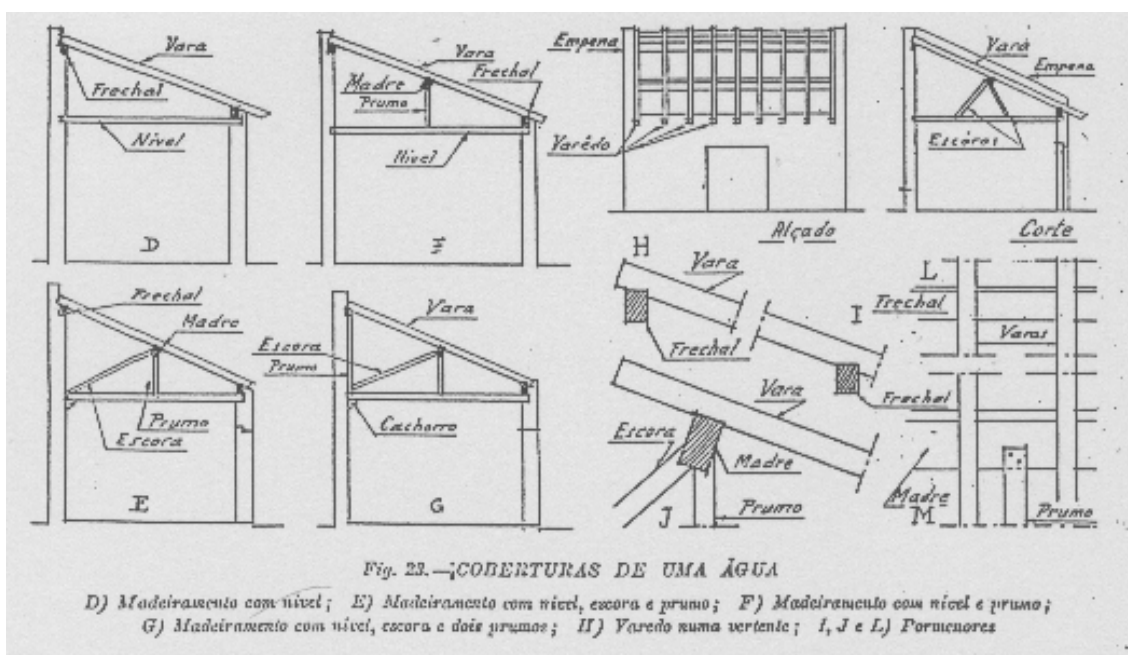


Figura 4 – Diversos tipos de coberturas de uma água (Costa, F.)

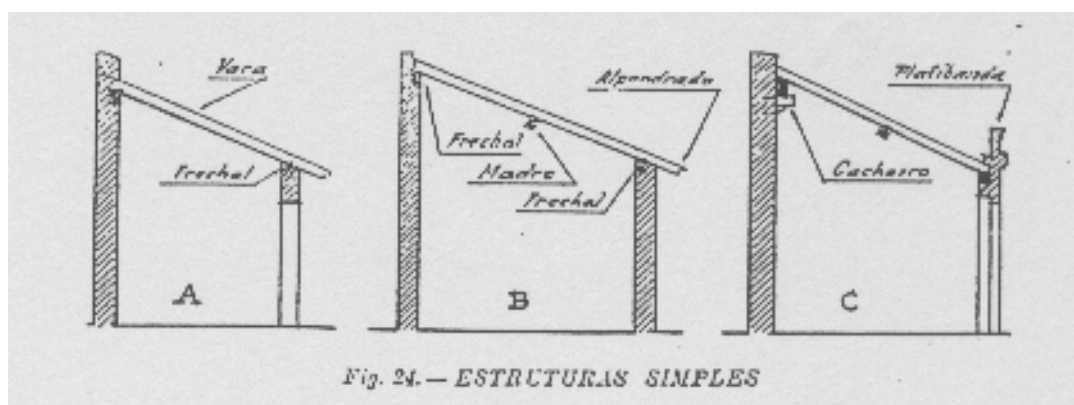


Figura 5 – Esquemas de estruturas simples de coberturas (Costa, F.)

As coberturas de uma água são as mais simples em termos construtivos. Quando a largura destas edificações é reduzida, o varedo assenta simplesmente sobre os frechais. A partir dos quatro metros de largura é necessária a existência de uma madre, apoiada nas empenas ou sobre prumos. Em larguras entre os 5 e 6 metros, a madre deve ser escorada. Normalmente as escoras são firmadas num nível. Nas coberturas de maior responsabilidade, uma das escoras que sustentam a madre é normalmente firmada contra a parede num cachorro de cantaria, que por vezes serve para apoio dos níveis, que por sua vez suportam os prumos. A partir de determinado vão, podem aplicar-se duas ou três madres. Nestes casos é, no entanto, preferível o emprego de meias-asnas. Uma cobertura de uma água deve comportar sempre dois frechais, um para o apoio superior do varedo e outro para o seu apoio inferior.

2.2.1.4. COBERTURA INCLINADA DE DUAS ÁGUAS

Este é o tipo de cobertura mais comum. As coberturas deste tipo têm duas vertentes (águas) que se encontram numa cumeeira central, e nas empenas nos dois extremos. [Cole, E., 2003]

As tradicionais estruturas das coberturas de duas águas eram, frequentemente, constituídas por paus rolados, apoiados nas empenas das paredes de meação, à semelhança da estrutura dos pavimentos, e espaçados entre si cerca de 1,5m. Sobre esta estrutura era pregado o *varedo*, frequentemente constituído por peças esquadriadas e, transversalmente, o *ripado* para suporte das telhas.

- ÁGUAS DESIGUAIS

2.2.1.5. COBERTURA INCLINADA DE TRÊS ÁGUAS

Nas plantas dos edifícios que só têm uma empena, para além das duas águas mestras paralelas às fachadas, existe uma terceira água oposta à empena e que se designa por *tacaniça*.

2.2.1.6. COBERTURA INCLINADA DE QUATRO ÁGUAS

A estrutura destes telhados é de origem ancestral, tendo a sua forma rudimentar perdurado e até coexistido com a introdução de asna mais complexa, devido à simplicidade da sua construção e ao facto de permitir o aproveitamento do vão da cobertura liberto de elementos estruturais.

Esta estrutura, tradicionalmente e em particular na casa burguesa do Porto, era constituída por uma armação simples de duas vigas, ou *pernas*, dispostas em forma de *tesoura*, unidas superiormente a meia madeira, apoiadas numa viga transversal, ou *linha*, que por sua vez se apoiava em paredes.

Frequentemente esta armação era travada transversalmente por outra viga, de menor dimensão – *nível* – a cerca de dois terços da altura, apoiada nas *pernas* ou *tesoura*, por encaixe a meia madeira. Para travamento longitudinal, localizavam-se superiormente, ao nível da cumeeira e a meio do vão das duas pernas, o *pau de fileira* e as *madres*, respectivamente. Na transição das vertentes principais com a *tacaniça*, existe uma viga – *rincão* – que se apoia na *fileira* e no *contra-frechal*, entre as paredes de meação e as paredes das fachadas. Todas as vigas que compõe esta armação são semelhantes às dos pavimentos, ou seja, consistem em *paus rolados*, embora algumas frequentemente com diâmetros inferiores. Sobre esta armação era pregado o *varedo* ou *caibros*, também constituído por troncos de madeira de menor dimensão, aparados em duas faces, sobre os quais era pregado transversalmente um tabuado de *guarda-pó*, ao qual era por último pregado um *ripado*, para o apoio das telhas.

Foi este tipo de estrutura de cobertura que deu origem aos tectos de masseira.

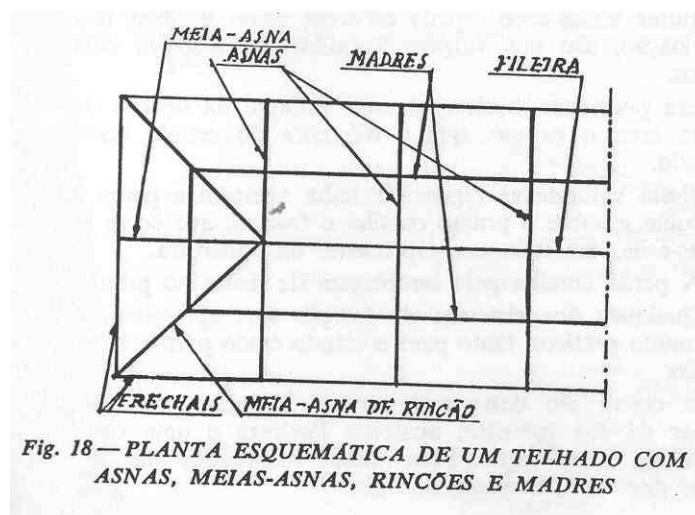


Figura 6 – Planta esquemática da estrutura de uma cobertura tradicional (Costa, F.)

2.2.1.7. COBERTURA CÓNICA

Coberturas cuja forma se assemelha a um cone. A sua planta é geralmente circular. Onde tradicionalmente, se observa uma cobertura verdadeiramente cónica é em coberturas com chapas de zinco ou outras metálicas. Empregando-se telhas neste tipo de coberturas, então o telhado propriamente dito tem de ser construído por águas triangulares, tal como nos telhados piramidais. Assim, os seus frechais formam do lado interior um conjunto de segmentos rectos.

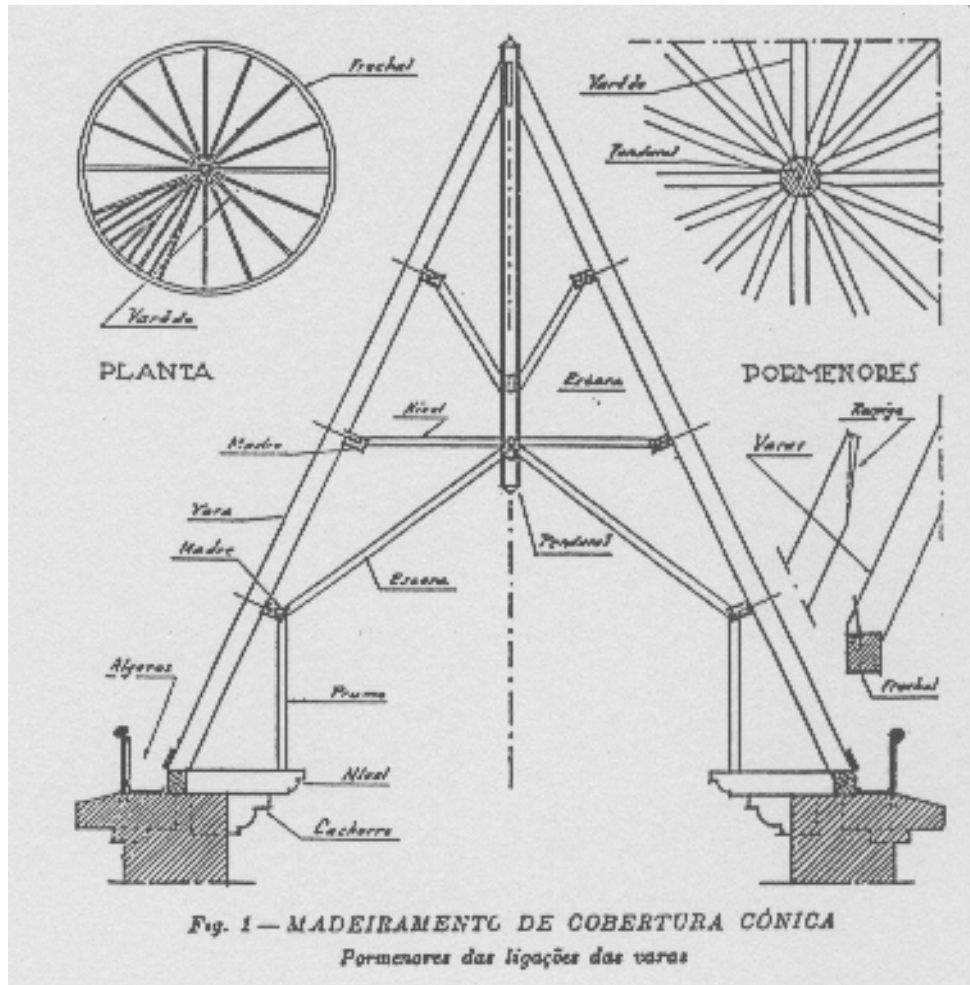


Figura 7 – Estrutura de cobertura cónica (Costa, F.)

2.2.1.8. PIRAMIDAIS, COBERTURA DE TORREÃO OU PONTA DE DIAMANTE



Figura 8 – Estrutura de um dos Torreões do Palácio do Freixo (Rodrigues, R., 2004)

Estes tipos de coberturas distinguem-se das coberturas cónicas por terem o seu cume central muito elevado, terminando algumas vezes em agulha.

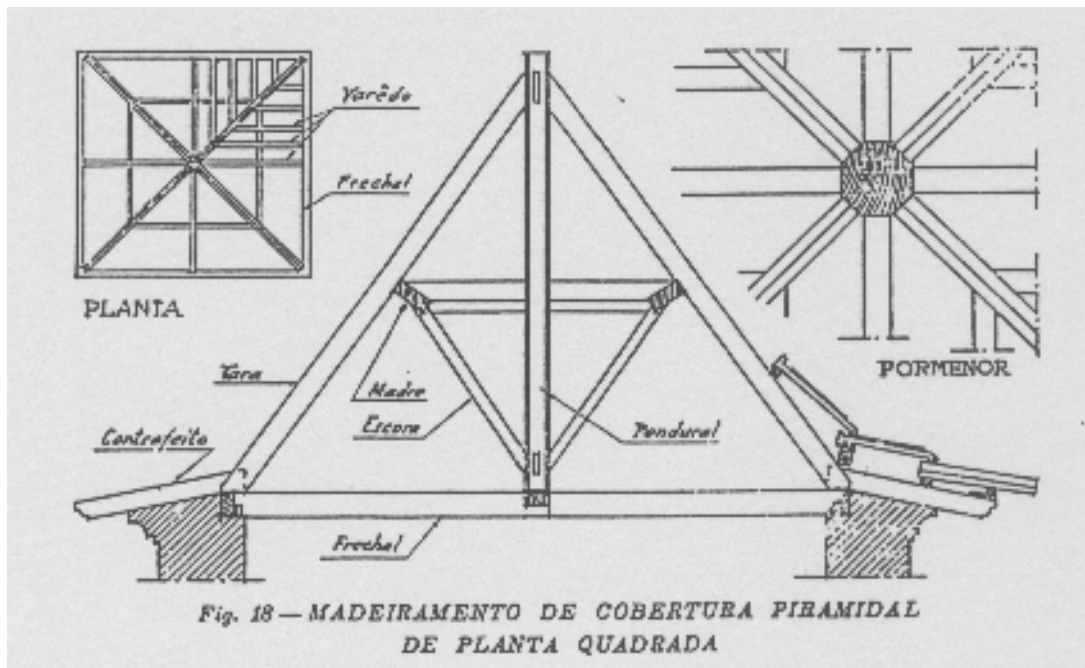


Figura 9 – Madeiramento de cobertura piramidal de planta quadrada (Costa, F.)

2.2.1.9. ÁGUAS EMPENADAS (ou de empenas cortadas)

Estes telhados são geralmente construídos por duas *águas mestras* e por *tacaniças* curtas.

2.2.1.10. CAPACETE

Solução corrente em coberturas de torres de igrejas góticas. [Cole, E., 2003]

2.2.1.11. COBERTURA EM MANSARDA

Uma cobertura em mansarda, assim chamada porque foi criada pelo arquitecto “François Mansard”, tem uma dupla vertente em cada um dos seus quatro lados. A parte inferior é mais íngreme e longa do que a superior, e muitas vezes é vazada por trapeiras. [Cole, E., 2003]

São constituídas por quatro partes: as duas superiores, que formam o telhado propriamente dito, são *águas mestras* ou principais, e as duas inferiores, que ligam as mestras às paredes de fachada, são as *águas dobradas*.

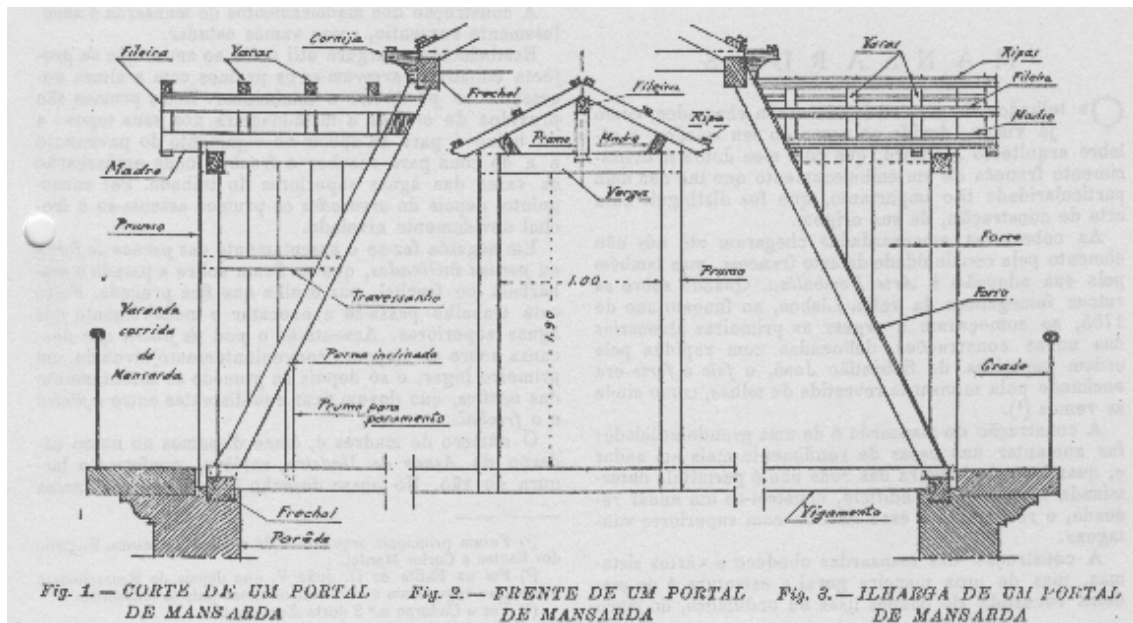


Figura 10 – Estrutura de coberturas de mansarda (Costa, F.)

2.2.1.12. COBERTURA POLIGONAL

- Telhados de planta triangular

A sua planta é um triângulo regular. Os seus três rincões entalham num pequeno pendural pelo sistema de roca.

- Telhados de planta pentagonal

Normalmente trata-se de um telhado destinado a um pavilhão isolado. A planta é em forma de pentágono regular. O seu cume é correntemente algo elevado. Os frechais entalham uns nos outros a meia-madeira nos ângulos do pentágono. Os cinco rincões nestas coberturas servem também de varas, partindo do frechal e indo ligar-se conjuntamente na roca. As varas secundárias apoiam nos frechais e ligam-se por dente e talão aos rincões.

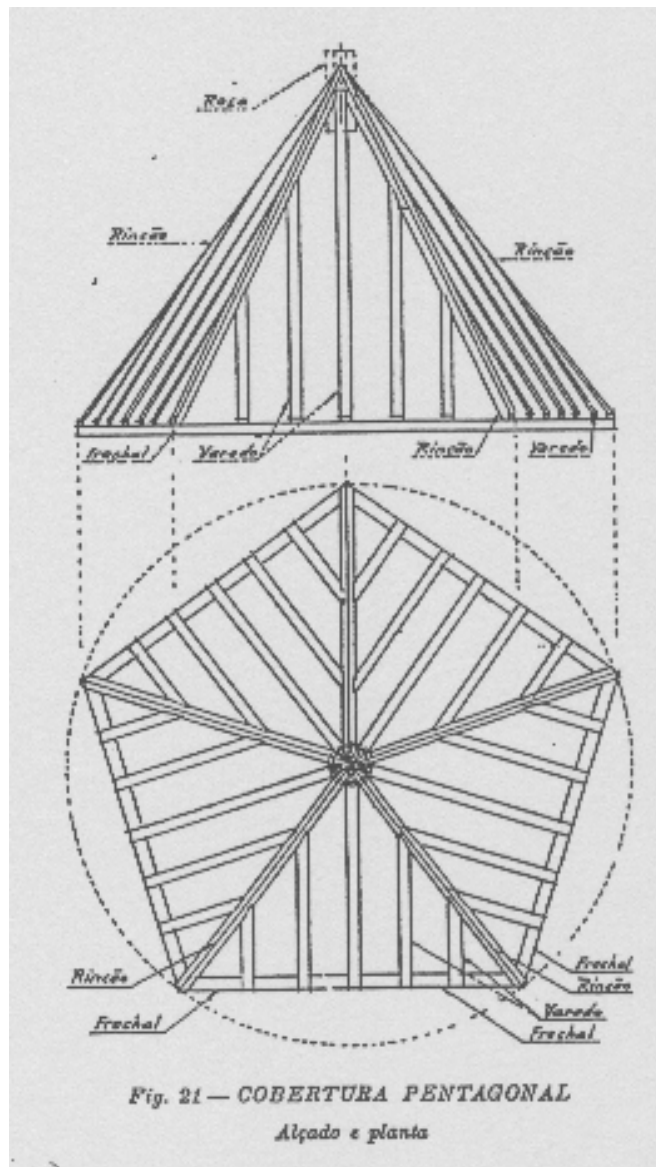


Figura 11 – Estrutura de cobertura pentagonal (Costa, F.)

- Telhados de planta sextavada

Constituído por um polígono de seis lados iguais, com um pendural de doze faces no seu centro e seis varas principais, uma em cada água do telhado. Estas varas ligam ao pendural por um dente que entra numa escarva, como sucede nos rincões e na mesma linha destes. Os rincões têm o seu canto superior chanfrado para concordância com as águas do telhado.

2.2.1.13. COBERTURA SEMICIRCULAR

As coberturas em abóbada semicircular ou de berço, são formadas por asnas muito juntas, assentes em contrafixas curvas e podem ter tecto, apainelados ou forro. [Cole, E., 2003]

2.2.1.14. COBERTURA DE GALERIA

Uma cobertura em galeria tem um prumo que assenta centralmente sobre uma trave-mestra. Ao contrário de um pendural, não sobe até à cumeeira; é antes interrompido e serve de suporte a uma travessa longitudinal. [Cole, E., 2003]

2.2.1.15. TRAPEIRAS E MIRANTES

A estrutura das paredes de trapeiras e mirantes era de construção idêntica à das paredes de tabique simples dos pisos recuados dos acrescentos, apoiando-se no vigamento do sobrado ou numa cadeia executada na estrutura da cobertura. Este último caso é mais frequente nos telhados de duas águas.

2.2.1.16. CLARABÓIAS

O princípio construtivo das clarabóias quadrangulares ou rectangulares, com os lanternins ao correr das águas, e das clarabóias circulares ou elípticas, em forma de pequenas cúpulas, com os lanternins de vidro, é sensivelmente o mesmo, diferindo apenas em pormenores formais.

- Estrutura das clarabóias planas

A definição do espaço onde se situa a clarabóia implica a interrupção do vigamento do tecto, utilizando-se para tal duas cadeias. Nos planos das coberturas ao nível do *varedo*, procede-se da mesma forma, definindo uma área igual ou menor. Dentro deste espaço era usual pregar um tabuado à estrutura do tecto e da cobertura, de tábuas *costaneiras*, conformando as paredes da clarabóia.

As clarabóias salientes dos planos da cobertura, de forma rectangular, eram executadas da mesma forma, apenas diferindo no tipo de lanternim.

- Estrutura das clarabóias circulares ou elípticas

As clarabóias circulares ou elípticas, em forma de cúpula, requerem uma estrutura mais elaborada. O espaço onde se situam é igualmente definido por duas cadeias, ao nível do vigamento do tecto. Para a conformação da forma elíptica ou circular, eram colocadas sub-cadeias, de menor dimensão, nos cantos, nalguns casos em forma de cambotas. No plano da cobertura ao nível do *varedo* procedia-se da mesma forma definindo um vão de menor dimensão.

As paredes deste tipo de clarabóias eram constituídas por barrotes de secção quadrangular, tradicionalmente com 7cm de lado, em forma de aduelas, apoiadas nas estruturas de tecto e das águas da cobertura. As aduelas espaçavam entre si cerca de 0,5m, sendo travadas a meia altura por *travessanhos* ligeiramente encurvados. Superiormente eram travadas por um frechal curvo de coroamento, onde se apoia a estrutura metálica do lanternim.



Figura 12 – Lanternim do salão nobre do Palácio do Freixo (Rodrigues, R, 2004)

2.2.1.17. CÚPULAS

A construção de cúpulas em madeira é bastante rara e difícil para largas edificações.

No entanto existem coberturas de cúpulas construídas correntemente para diâmetros de 10 ou 12 metros, em perfeita segurança.

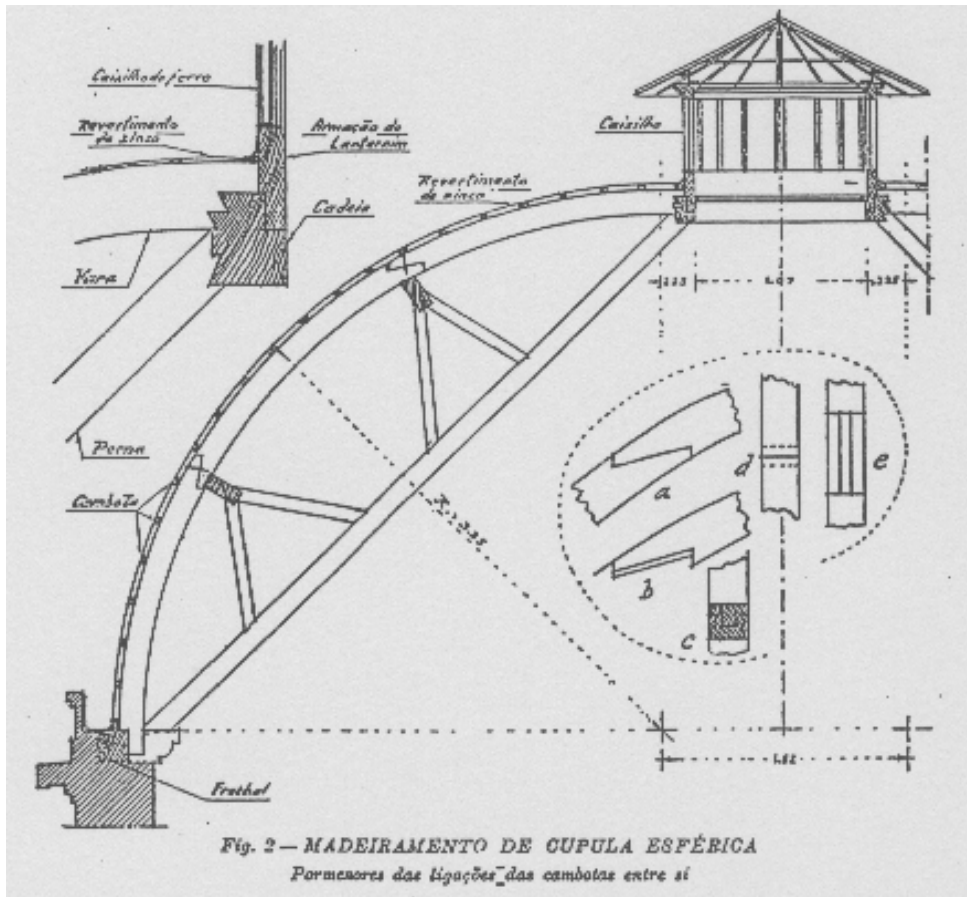


Figura 13 – Estrutura de cobertura em cúpula esférica (Costa, F.)

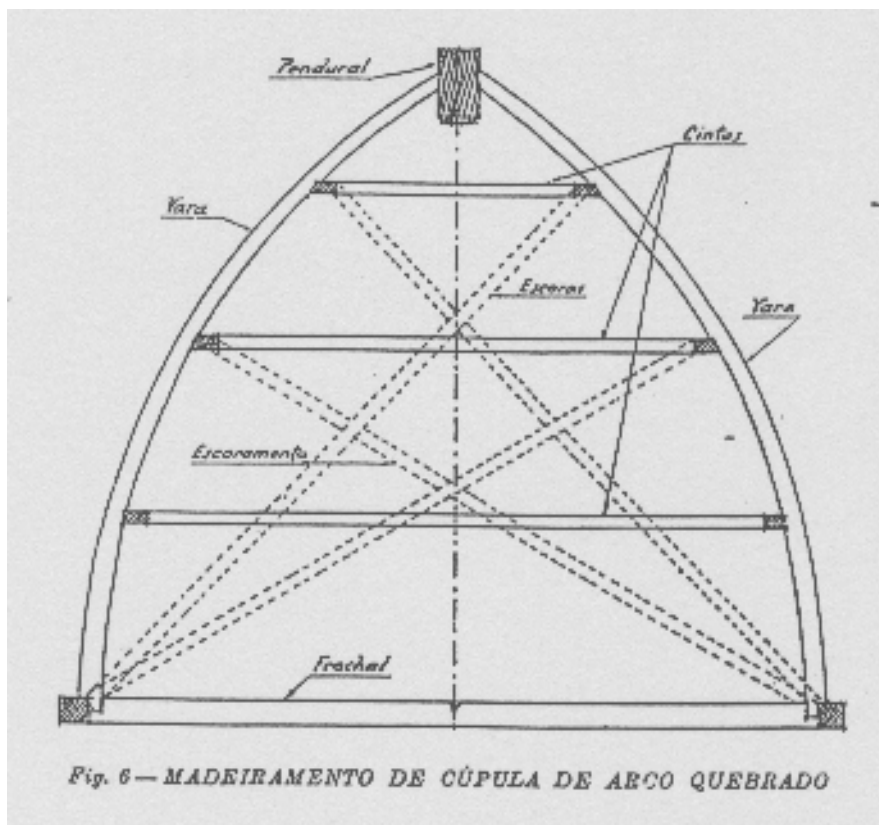


Figura 14 – Estrutura de cobertura em cúpulas de arco quebrado (Costa, F.)

2.2.2. Caracterização e Tipificação das Asnas

A origem da asna, como estrutura organizada de cobertura, pode localizar-se no Renascimento Italiano, ficando ligada aos trabalhos de Andreas Palladio (famoso arquitecto nascido em Vicenza em 1518, onde morreu em 1580).

A asna é uma estrutura elegante do ponto de vista estrutural, pois permite economizar madeira em relação às soluções mais arcaicas e vencer vãos de dimensões muito superiores.

Os princípios de construção tradicional referem que as asnas como estruturas principais são afastadas entre 70 cm e 5 metros. No caso de asnas afastadas de 70 cm, as soluções são executadas com secções mais esbeltas e o forro, a ripa e a telha são directamente nelas assentes. Para vãos acima de cerca de 2 metros, sobre as asnas apoiam-se madres sobre as quais assentam as varas, o forro, a ripa e a telha, ou as varas, as ripas e as telhas no caso de telhados em telha vã. As asnas são constituídas por várias peças e a sua forma é sempre triangular. As asnas mais simples são constituídas por uma linha, duas pernas e um pendural, vencendo vãos até 6 a 8 metros.

A partir da asna simples foram sendo desenhadas asnas para vencer maiores vãos, tornando-se por isso, cada vez mais complexas. Introduziram-se primeiro duas escoras e posteriormente novos pendurais e escoras com desenho triangular até chegar a vãos na ordem dos 20 metros, que foi por muito tempo considerado como um vão limite para este tipo de estruturas. As maiores asnas de madeira maciça que se conhecem têm cerca de 27 metros de vão, mas vãos acima de 20 metros são já relativamente raros.

Nos telhados a quatro águas, os apoios das madres junto às empenas, são assegurados por meias asnas com desenho semelhante ao de uma meia asna perfeita.

Nas coberturas em madeira, em geral, as ligações entre as peças são feitas através de entalhes nas madeiras do tipo samblagem, que permitem um primeiro encaixe das peças que normalmente se sustentam sozinhas para as acções verticais sem o apoio de ligadores. Complementarmente, estas peças são ainda ligadas por cavilhas em aço e possuem ferragens de cintagem exterior destinadas a assegurar o funcionamento de conjunto, completado com elementos de contraventamento transversal. Estes últimos elementos têm como finalidade assegurar a resistência às acções horizontais e um adequado comportamento sob ventos de sucção que provocam importantes acções de levantamento das estruturas, sendo mais relevantes nas mais leves.

As asnas sem linhas provocam acções horizontais significativas nas paredes de alvenaria, que deverão ser absorvidas por tirantes, normalmente em aço. As asnas completas com linhas asseguram normalmente o travamento adequado do coroamento das paredes de pedra.

Frechais e contra-frechais são praticamente a mesma coisa. A designação de contra-frechal é aplicada ao frechal que se sobrepõe a outro, quer seja assente sobre ele, quer seja assente sobre qualquer outra peça da construção que se apoiou no frechal propriamente dito. A viga que é assente sobre as linhas das asnas em todo o comprimento do madeiramento, para receber as pontas das varas, tem a designação de frechal se a asna não é assente sobre outra viga, ou se não tem outra peça semelhante com idêntico fim no mesmo local. A altura ou cutelo dos frechais assentes nas linhas depende da altura ou cutelo da madre assente na perna da mesma asna, na mesma vertente do telhado. Uma linha paralela à perna da asna, passando pela parte superior da madre estabelece automaticamente a altura do frechal. Os frechais são pregados à linha da asna e para que não deslizem, entram nela e ficam apertados por meio de um dente de cão, com cerca de 0.01m. A fileira ou pau de fileira é uma viga que indo de uma asna a outra, assente sobre o topo dos pendurais e forma o espigão dos telhados. A parte superior da fileira é chanfrada nas duas arestas laterais, terminando superiormente em aresta ou cume.

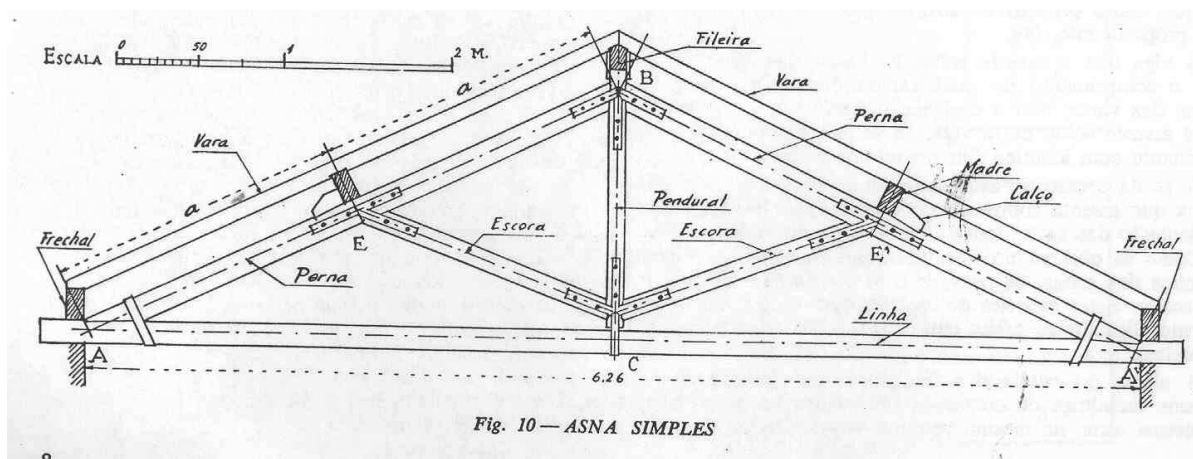
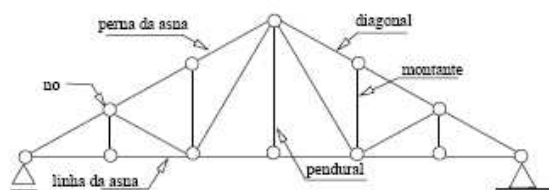


Figura 15 – Esquema de asna simples; ferragens e dimensões tipo das peças (Costa, F.)

O funcionamento global da estrutura deve ser analisado criteriosamente em projectos de reabilitação que introduzam alterações nos sistemas estruturais originais ou em situações em que a concepção original não assegure convenientemente as conexões entre planos (cobertura/paredes/pavimentos) nem a resistência das paredes às acções horizontais, nomeadamente as associadas a acções horizontais importantes, como é o caso dos sismos.

Componentes: linha de asna, perna da asna, pendural, montante, diagonal e nó.



Asna de 2 águas para suporte de uma cobertura

Figura 16 – Esquema estrutural de uma asna de cobertura de duas águas (Branco, J., 2006)

- TIPOS DE ASNAS

O enquadramento histórico, tecnológico, arquitectural, e a própria cultura material vigente fazem - nos compreender como a asna não é facilmente reduzível a categorias, esquemas, ou a complexos modelos estruturais. Deste modo, citemos a afirmação de Franco Laner [Duarte, A., 2004]:

“... le capriate non appartengono alla scienza delle costruzione, bensì all’arte del costruire,”¹.

Por mais refinado que seja o modelo de cálculo adoptado na análise do comportamento da asna, tudo dependerá da perícia de execução, da realização dos nós de ligação entre os elementos da estrutura e da qualidade dos materiais constituintes. Neste propósito são de realçar as recomendações de Palladio, que na descrição do modo de execução de pontes reticuladas em madeira chama a atenção para o detalhe, demonstrado na descrição minuciosa do nó de confluência dos elementos, não fazendo uma única referência ao dimensionamento desses mesmos elementos: “O nó projectado tem como princípio que quanto maior for o carregamento da ponte, mais as partes se apertam conjuntamente, aumentando a segurança da obra” (Livro III, cap. VII).

Segundo um estudo encomendado a Gaetano Della Giustina por uma sociedade de seguros francesa (*La Pathologie des charpentiers en bois, Moniteur, Paris, 1985*), no qual se analisaram mais de 800 estruturas de madeira degradadas, verificou-se que a generalidade das situações o subdimensionamento das secções dos elementos estruturais não era a causa primária das anomalias. A generalidade das patologias estava associada a deficiências e incertezas ao nível da concepção estrutural e, sobretudo, à deficiente execução dos nós nas ligações madeira/madeira e madeira/outras materiais. [Duarte, A., 2004]

¹ - (as asnas não pertencem à ciência da construção mas sim à arte da construir) – tradução

Pode definir-se o conhecimento sobre asnas como o combinado de intuição, tecnologia e ciência da construção. Assim, para o estudo das asnas é necessário possuir sempre uma perspectiva histórica juntamente com a perspectiva técnico-constructiva. *“Aos traçados e à construção das asnas é mister dedicar um bom estudo aliado a uma boa compreensão.” (...)*

A configuração estrutural da asna de madeira é já corrente na técnica romana em IV e V d.C., quando para a cobertura das basílicas cristãs se difunde o uso das coberturas de duas águas, com o recurso a pernas, pendural e linha (simples ou dupla) unidos por pregagem ou elementos metálicos. Ao contrário, a construção tradicional da Grécia Clássica não utilizava asnas mas sim a viga apoiada. [Costa, F.]

Nos madeiramentos de simples contextura as asnas são evitadas com o uso de prumos e pontaletes, assentes, a maior parte das vezes, em paredes que vindo de abaixo, chegam até quase ao telhado. Assim se diz, correntemente, que o telhado é de construção vulgar e o seu madeiramento de estrutura ordinária, enquanto que, quando se utilizam asnas, se diz que o madeiramento é constituído por *asnatura* e do telhado que é de boa técnica.

Em qualquer asna, a linha fica sempre em posição horizontal, as pernas assentam-se sobre a linha em posição inclinada para a boa formação das vertentes do telhado, o pendural fica apertado verticalmente no vértice do telhado pelas pernas, e as escoras ficam inclinadas, ligando as pernas ao pendural. Quando as asnas comportam maior composição podem ainda existir escoras a ligar as pernas à linha, como se representa nas figuras das próximas páginas. Nas asnas de mansarda, além das pernas comuns a todos os tipos de asnas encontramos mais as pernas de força, que apoiam a parte superior da construção, e a linha inferior onde elas assentam. [Costa, F.]

TIPOLOGIAS FORMAIS

A classificação formal das asnas pode ser feita do seguinte modo, de uma forma resumida e segundo as designações tradicionais:

2.2.2.1. ASNAS VULGARES

Asna vulgar, de Paládio ou simples. A composição de uma asna vulgar consta de uma linha, duas pernas, um pendural e duas escoras. Em pequenos telhados também se utilizam asnas desprovidas de escoras. Em muitos casos, em que os edifícios são destinados a receber maquinismos de grande altura e em que a linha possa ser motivo de estorvo, suprime-se mesmo a própria linha. Ângulo de abertura linha/perna 26/27°.

Adaptável a qualquer largura de vão e pé-direito. A ligação das asnas entre si, ao nível das pernas de força, faz-se por meio de travessanhos e longarinas. Se o vão é superior a 9.00m a construção acima da linha é feita como na asna vulgar composta. Linha superior ou nível.

2.2.2.1.1. ASNA SIMPLES

As asnas mais simples são constituídas por uma linha, duas pernas e um pendural, vencendo vãos até 6 a 8 metros.

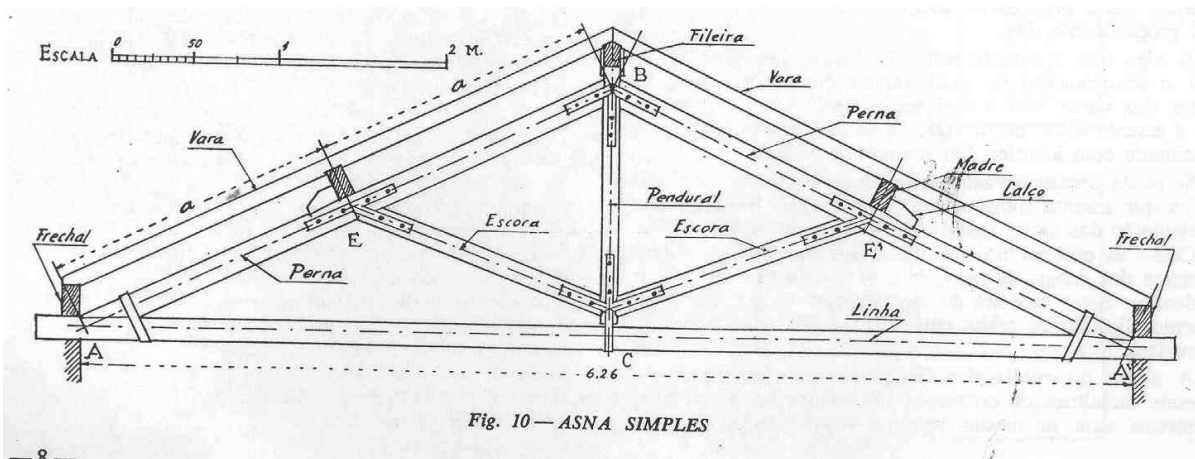


Figura 17 – Esquema e decomposição por componentes de uma asna simples (Costa, F.)

2.2.2.1.2. ASNA COMPOSTA OU MISTA

Asna com mais escoras que a anterior e tirantes, para maiores vãos (mais de 9m). Caracteriza-se por comportar quatro ou mais escoras travadas por meio de tirantes de aço.

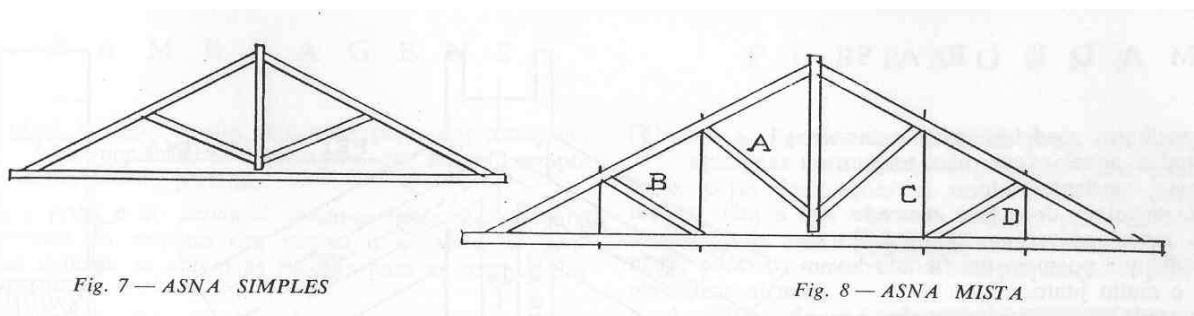


Figura 18 – Esquemas de asna simples e asna mista (Costa, F.)

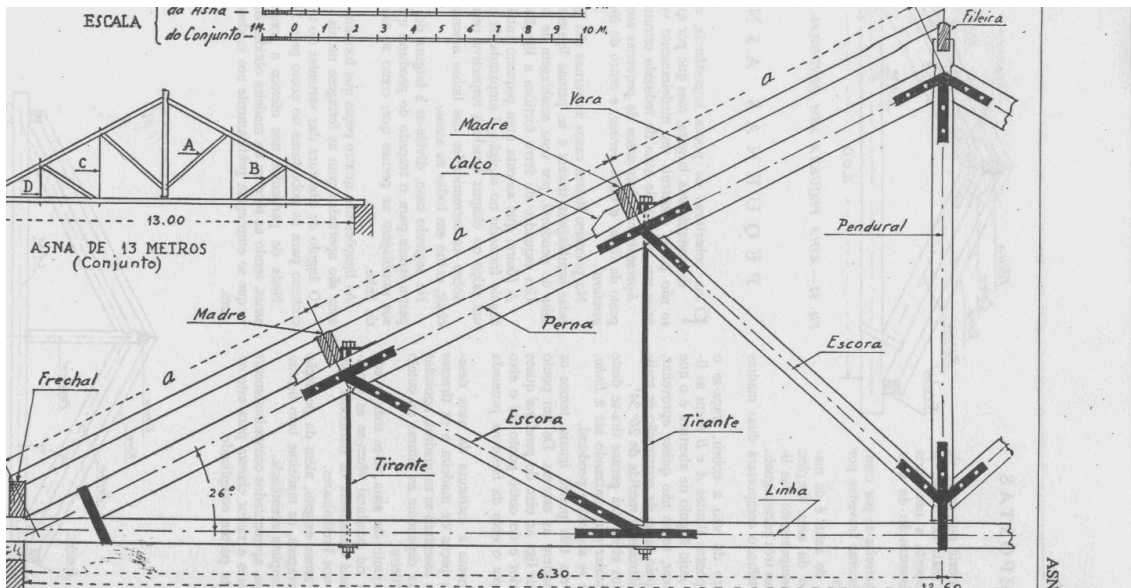


Figura 19 – Esquema de uma asna composta (Costa, F.)

2.2.2.1.3. PEQUENA ASNA

Coberturas de pequena importância até 4 m de vão. Dois casos: linha mais duas pernas, linha pernas e pendural.

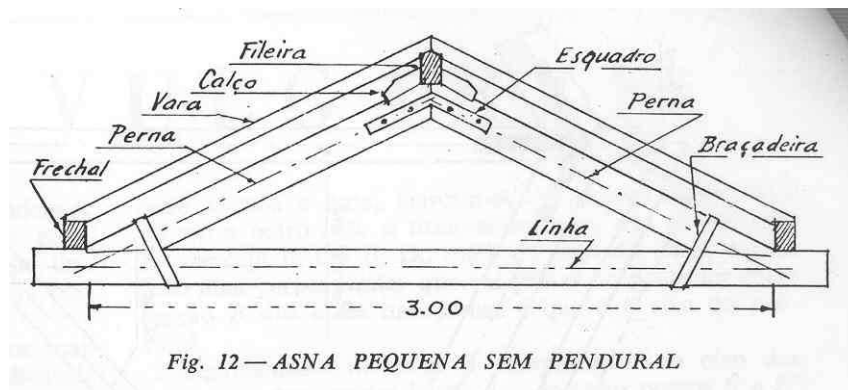


Fig. 12 — ASNA PEQUENA SEM PENDURAL

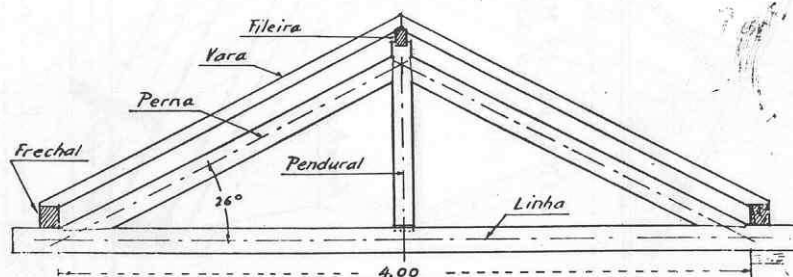


Fig. 13 — ASNA PEQUENA COM PENDURAL

Figura 20 e 21 – Esquemas de asnas pequenas com e sem pendural (Costa, F.)

2.2.2.2. MEIAS-ASNAS

Utilização comum em alpendres ou qualquer outra construção que fique encostada a outro edifício já existente, assim como em corpos salientes.

É comum, por motivos arquitectónicos, a inclinação da vertente ser diferente da usual. As secções dos elementos são idênticas às utilizadas em asnas.

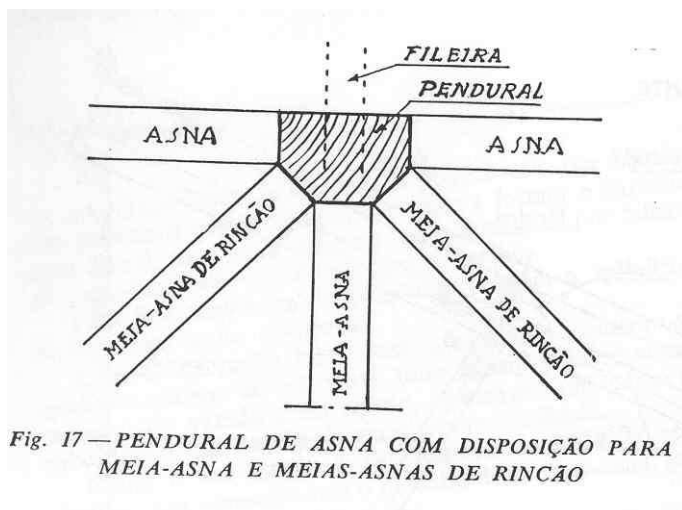


Figura 22 – Pormenor esquemático de união entre asnas e meias-asnas (Costa, F.)

2.2.2.2.1. MEIA-ASNA SIMPLES

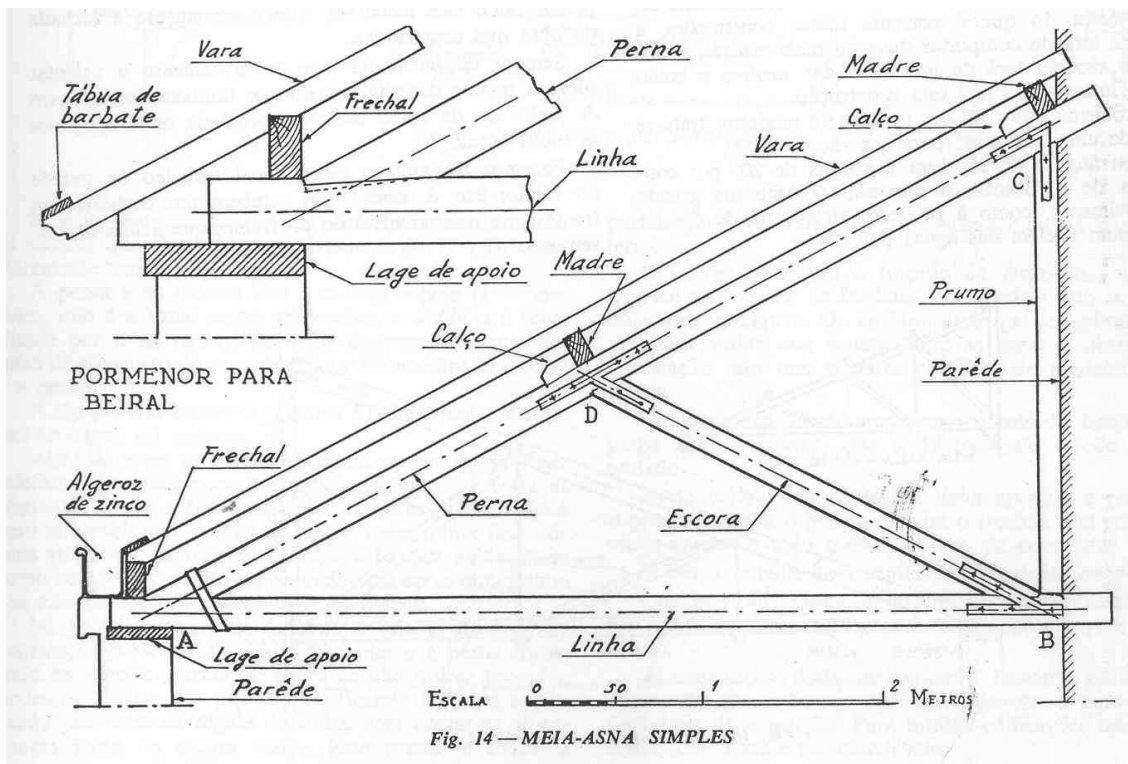


Figura 23 – Esquema de meia-asna simples (COSTA, F.)

2.2.2.2.2. MEIA-ASNA COMPOSTA

Corresponde a meia asna composta com as suas ferragens e pendural.

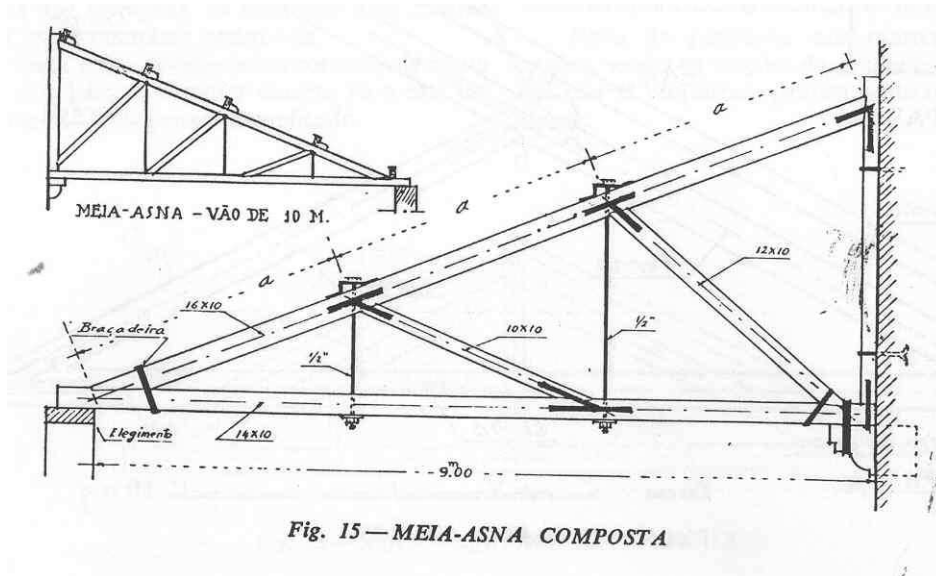


Figura 24 – Esquema de meia-asna composta (Costa, F.)

2.2.2.2.3. MEIA-ASNA DE ESCORAS

Exemplo de meia asna que tem de suportar uma cobertura de duas madres.

A linha é constituída por duas réguas de 5 cm de espessura que por meio de parafusos de porca apertam de encontro às escoras e à perna.

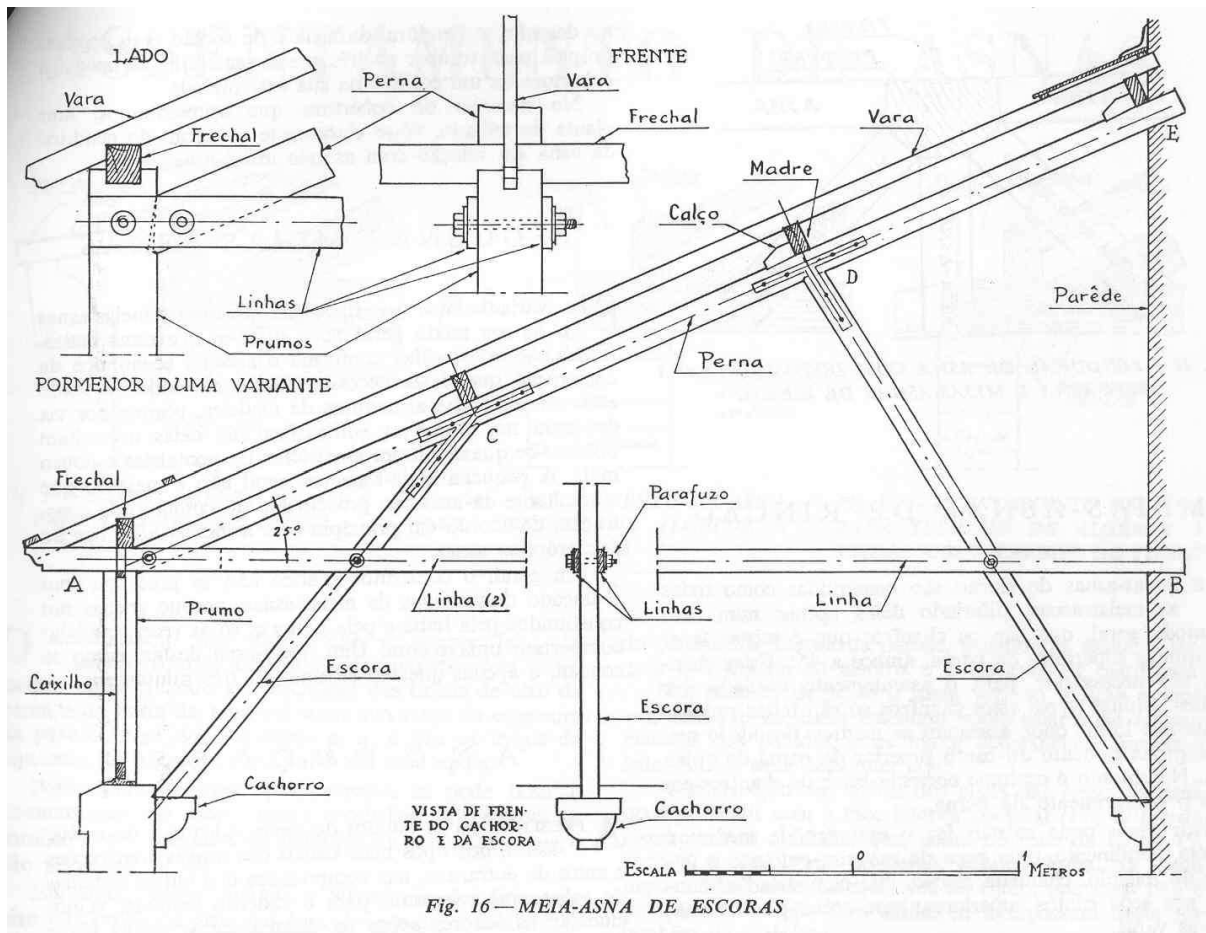


Figura 25 – Esquema de meia asna de escoras (Costa, F.)

2.2.2.2.4. MEIA-ASNA DE RINCÃO

As meias asnas de rincão são construídas como todas as meias asnas, diferindo delas apenas pela particularidade de terem as quinas superiores da perna chanfradas a 45° em ambas as faces. Muitas vezes os chanfros só são executados nos pontos de assentamento das madres. Nos casos em que não se utilizam madres aplica-se uma peça de madeira, chamada rincão, que comporta chanfros nos seus cantos superiores, para assentamento das varas.

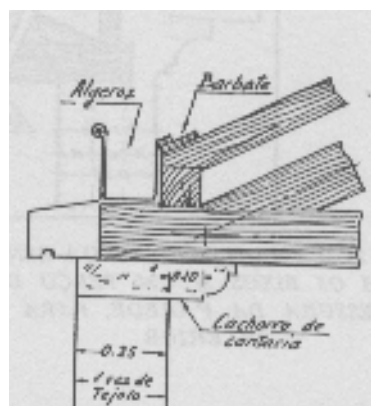


Figura 26 – Pormenor de apoio de asna e beiral (Costa, F.)

2.2.2.2.5. PEQUENA MEIA-ASNA

Utilizam-se em pequenas construções sendo na maioria das vezes substituídas por um sistema de pontaletes.

2.2.2.3. ASNAS DE MANSARDA

Asnas especiais para telhados dobrados (ver figura 32), da época de Luís XIV, devem o seu nome ao famoso arquitecto francês Francisco Mansard, e sobrinho-neto seu discípulo, Jules Hardouin Mansard (1646-1708) que esteve ao serviço do “rei sol” como primeiro arquitecto. Deixou em Paris, Versalhes, notáveis obras de arquitectura. Os telhados deste sistema, geralmente conhecidos por mansardas, constituídos por águas dobradas têm a vantagem de poderem comportar dentro da sua própria armação um pavimento. Em Portugal toma também o nome de estilo D. João V e teve grande aplicação na Arte Pombalina.

Genericamente, a mansarda comporta na sua parte superior uma asna de tipo vulgar. Assim, acima da linha temos as pernas, pendural e escoras e abaixo da linha temos as Pernas de Força. Geralmente, as pernas de força apoiam-se no vigamento do pavimento onde se erguem. Outras vezes encastram nas paredes da edificação.

Em boas construções, as pernas de força fixam-se a uma segunda linha que fica intercalada com o vigamento, mas onde o soalho não assenta. A asna fica independente do pavimento. Nas duas vertentes superiores pode-se aplicar qualquer tipo de telha e nas inferiores aplica-se um revestimento ou forro de chapas de zinco, de ardósias ou de outro material. As pernas de força têm geralmente secção de 0.15m ou 0.16m x 0.12m ou 0.14m.

2.2.2.3.1. ASNA DE QUATRO PARTES

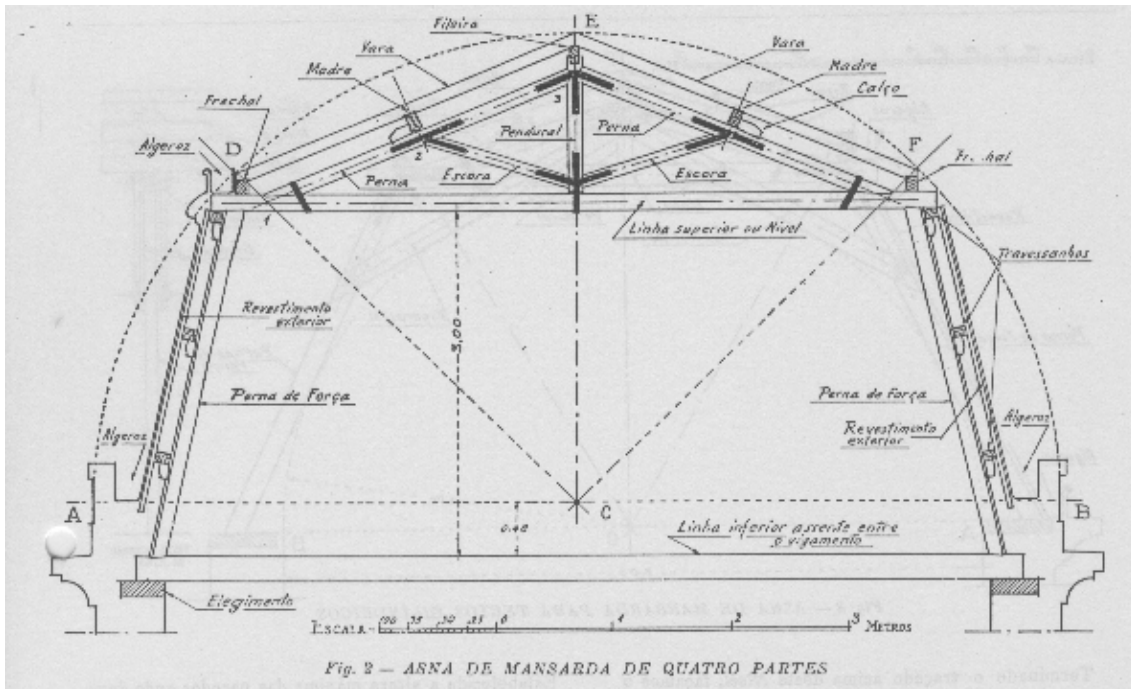


Figura 27 – Inscrição da asna numa semicircunferência, dividida em quatro partes (Costa, F.)

2.2.2.3.2. ASNA PARA TECTOS CILÍNDRICOS

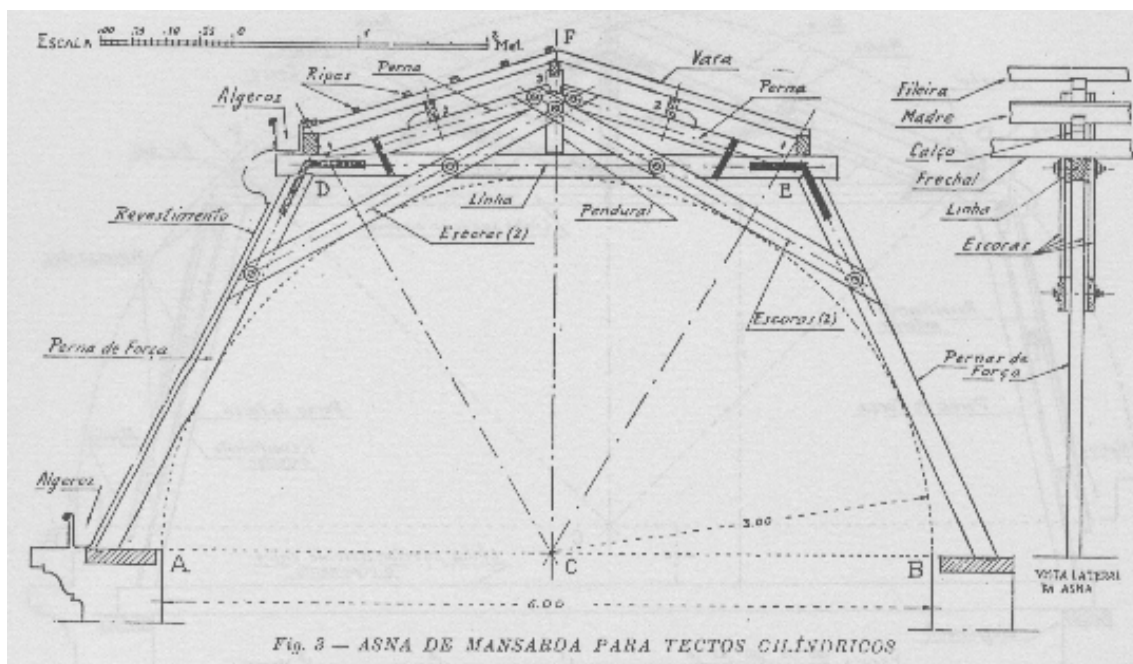


Figura 28 – Esquema de asna de mansarda para tectos cilíndricos (Costa, F.)

Comum em salões, armazéns ou igrejas. O tipo de asna tem de ser desprovido de linha. Asna sem linha para telhados de mansarda. Para a formação de tectos arqueados pregam-se cambotas sobre as faces das asnas onde se assentam as tábuas, o fasquiado, ou outro revestimento.

2.2.2.3.3. ASNA DE ESCORAS

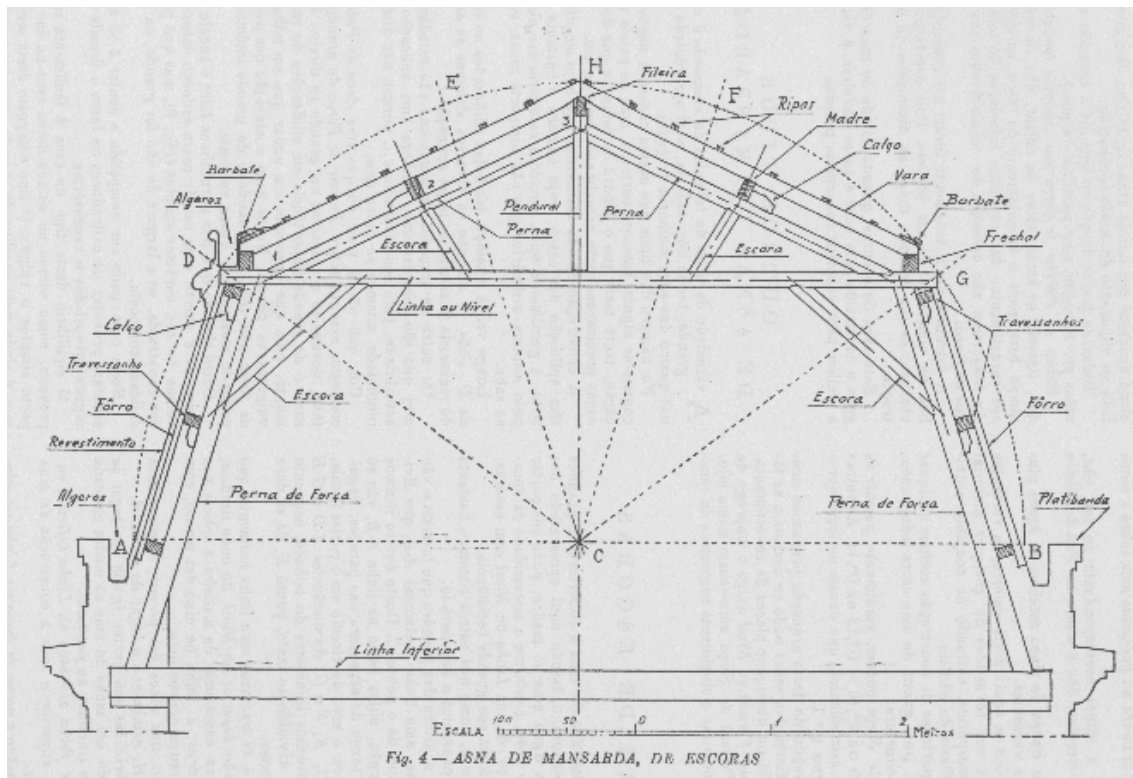


Figura 29 – Esquema de asna de mansarda de escoras (Costa, F.)

Reforço da linha ou nível com escoras.

2.2.2.4. ASNAS DE LANTERNIM

Destinadas à cobertura de armazéns em que, pela sua extensão, a luz e a ventilação se tornam insuficientes.

2.2.2.5. ASNAS ESPECIAIS

Cada uma destas construções obedece a uma necessidade prevista, e algumas vezes surgida tardiamente, dentro da obra a edificar.

2.2.2.5.1. ASNA DE ALPENDRE

Pensadas para suportar madeiramentos de dimensões apreciáveis, na cobertura de armazéns, hangares, recreios, cais, etc. Utilizada em recintos abertos. É uma asna apoiada em prumos que fazem parte da sua estrutura.

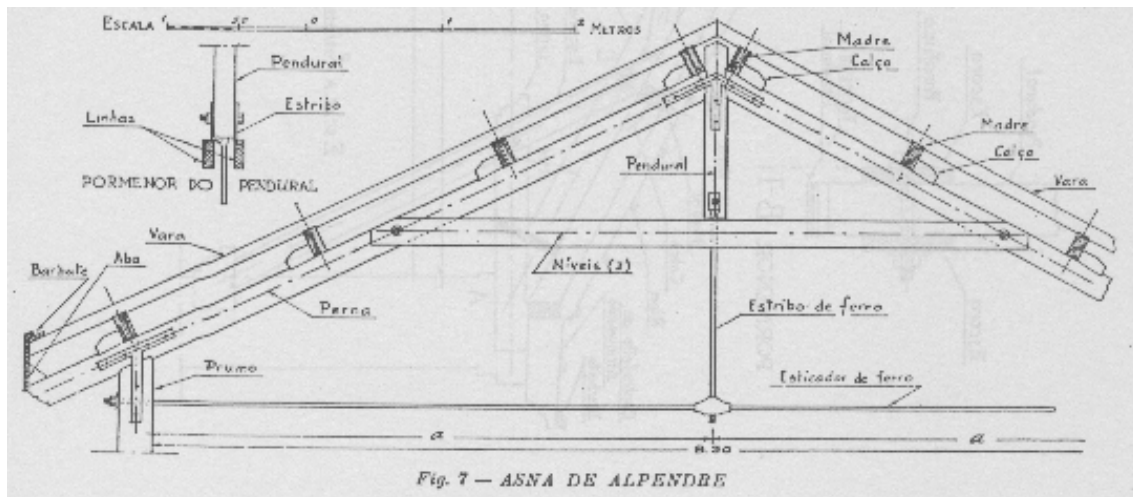


Figura 30 – Esquema de asna de alpendre (Costa, F.)

2.2.2.5.2. ASNA DE NÍVEL

Utilizada em vãos de grande largura tem a vantagem de possibilitar a utilização da parte central do sótão da edificação onde é aplicada.

Quanto maior for o vão que a asna ressalva maior o pé direito que se obtém na parte central do edifício. É comum a utilização de trapeiras nas coberturas com este tipo de armação. Para a execução do pavimento de sótão permitido por este tipo de armação deverá existir um vigamento próprio, onde assenta o soalho, ficando a linha da asna intercalada nesse vigamento e abaixo do seu nivelamento de superfície. O mesmo para a construção da esteira do tecto de sótão. [Costa, F.]

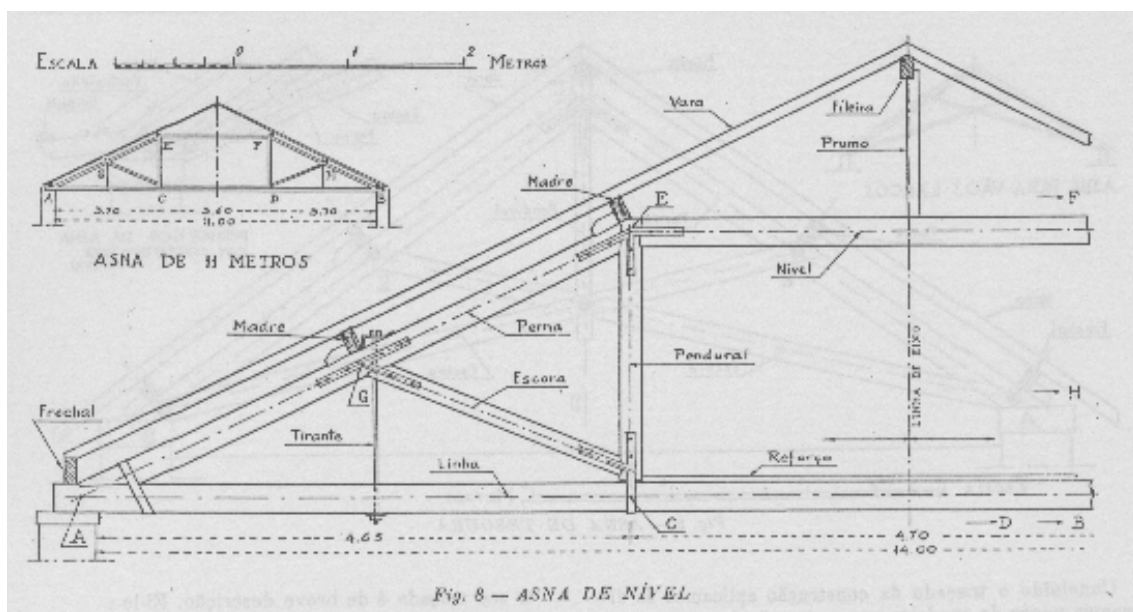


Figura 31 – Esquema de asna de nível (Costa, F.)

2.2.2.5.3. ASNA DE TESOURA

Este tipo de asna é utilizado, normalmente, quando é inconveniente a presença da linha na asna. [COSTA, F.]

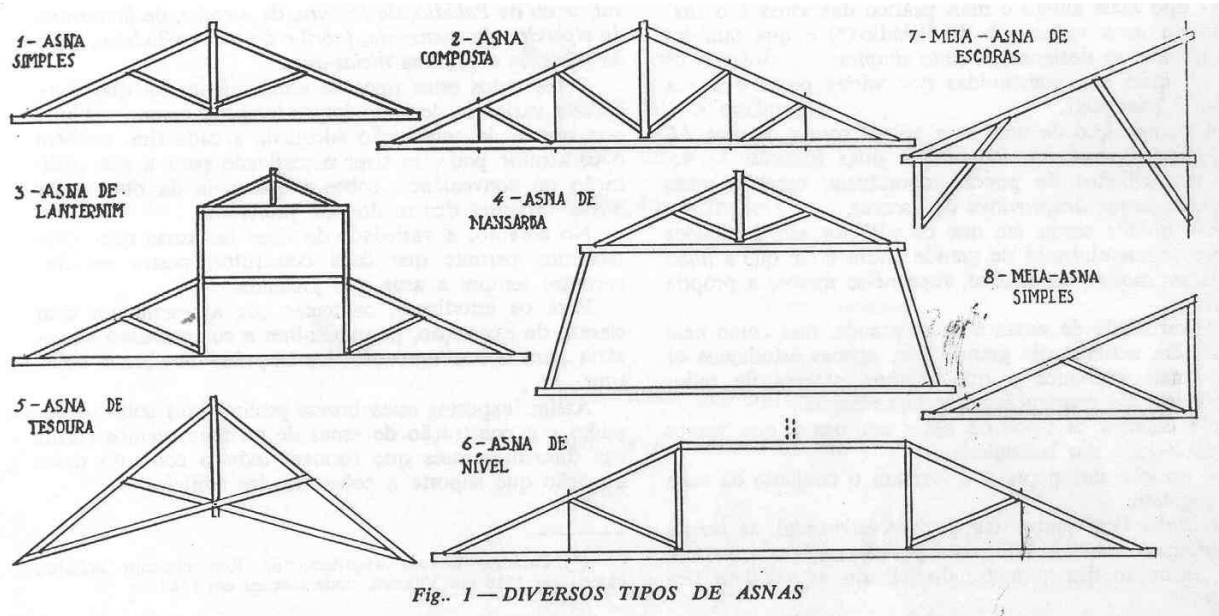


Figura 32 – Diversos tipos de asnas (Costa, F.)

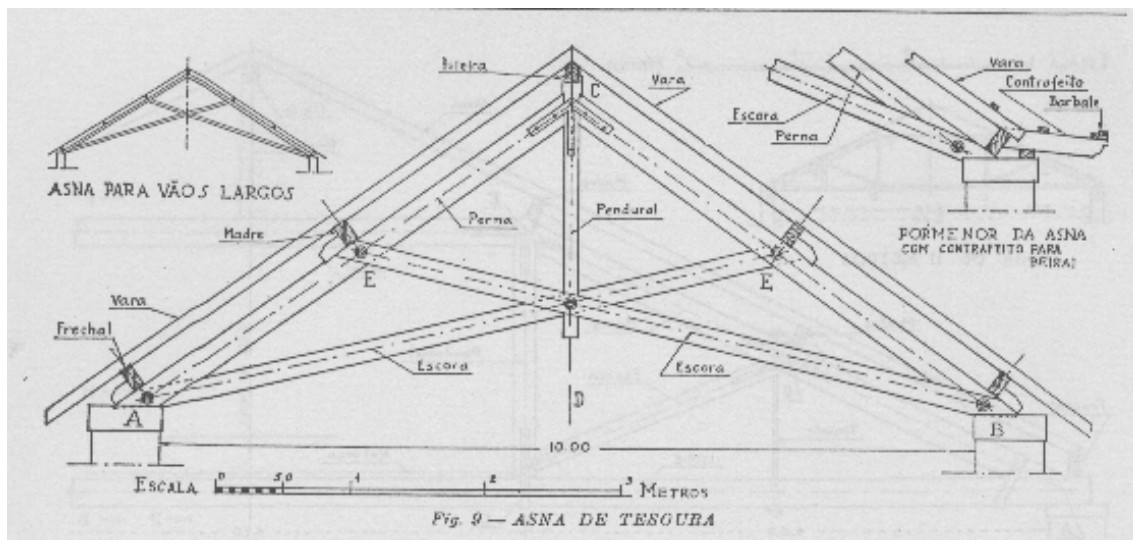


Figura 33 – Esquema de asna de tesoura (Costa, F.)

2.2.2.5.4. ASNAS DE TIPO FABRIL

Este tipo de asna, usualmente empregue em coberturas de grandes espaços industriais ou oficinas, montadas em cadeia para permitir a entrada de luz, é geralmente conhecido pelo nome inglês *shed*. A sua principal característica é a constituição de duas vertentes de telhado desiguais. Uma com o

ângulo habitual de abertura, outra com ângulo sempre superior a 50° (em Portugal usa-se 60° a 70°). A abertura entre as duas pernas nunca deve formar um ângulo obtuso.vão de 5 a 10 m.

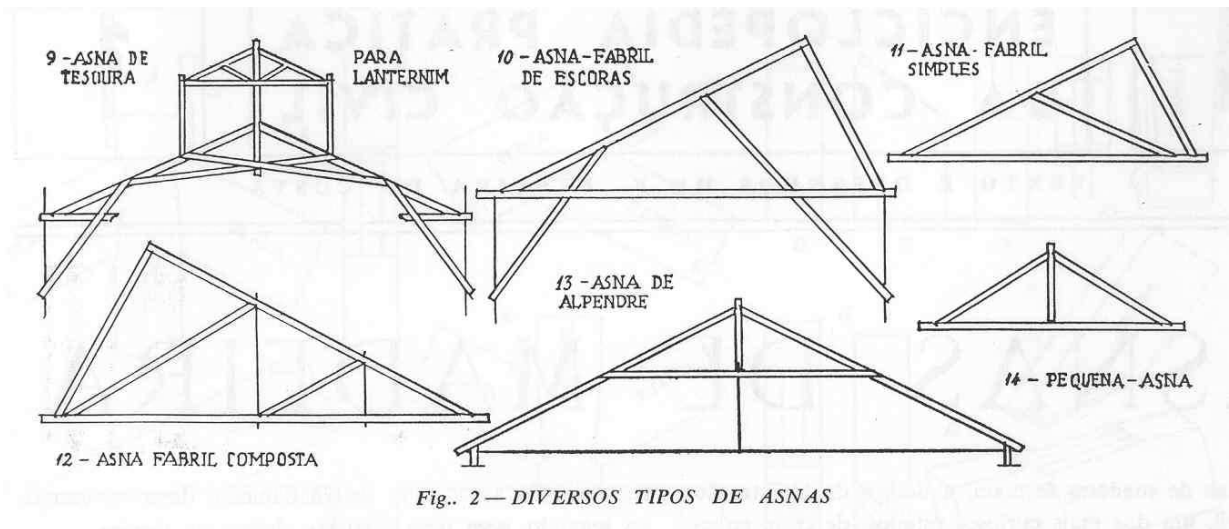


Figura 34 – Asnas de tipo fabril (Costa, F.)

2.2.2.5.4.1. ASNAS DE TIPO FABRIL SIMPLES

Sem muita utilidade já que como na generalidade é necessário vencer vãos de consideráveis dimensões utilizam-se os tipos seguintes. Apenas comporta uma escora com o seu estribo de ferro, estando limitada a um vão de 8 metros.

2.2.2.5.4.2. ASNAS DE TIPO FABRIL COMPOSTA

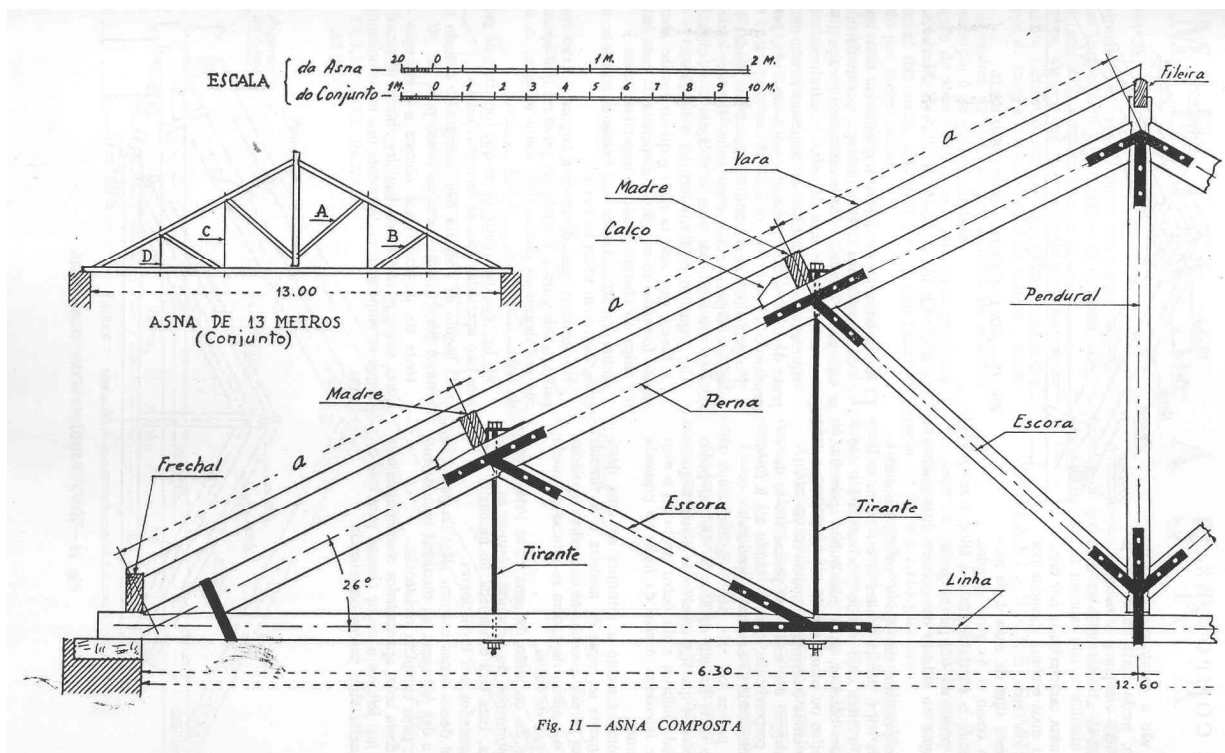


Fig. 11 - ASNA COMPOSTA

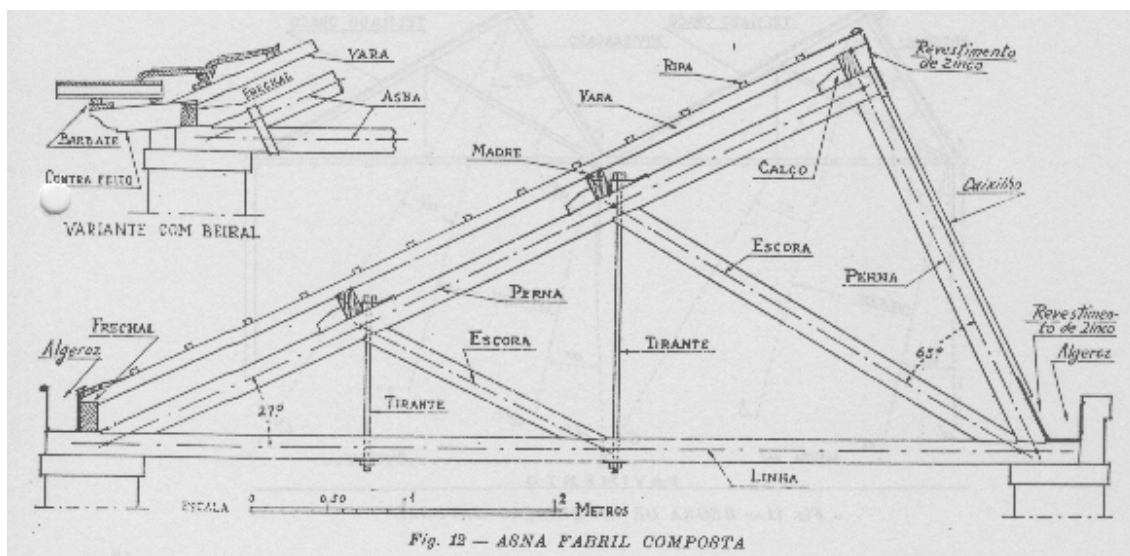


Fig. 12 - ASNA FABRIL COMPOSTA

Figura 35 e 36 – Esquemas de asnas de tipo fabril composta (Costa, F.)

2.2.2.5.5. ASNA TIPO BELGA

Este tipo de asna é constituído por dois prumos (pendurais), colocados simetricamente sobre a linha e em geral ligados por um tirante horizontal. [COLE, E., 2003]

2.2.2.5.6. TIPOLOGIAS DE ASNA SEGUNDO CONCEPÇÃO ESTRUTURAL

A classificação que tem por base a concepção estrutural assenta no seguinte critério, que é seguido noutros países latinos, nos quais a classificação não é função da "forma" da asna mas sim do modo

como os elementos se encontram ligados e do seu funcionamento como estrutura. Distinguem-se desta forma as asnas em: asna de cumeeira, asna de nós abertos, asna de nós fechados, asna aparente e asna espacial.

2.2.3. Cobertura tradicional nos edifícios antigos portugueses

A construção tradicional dos edifícios antigos em Portugal (desde os séc. XVIII e XIX até ao início do século XX) possuía estruturas de piso e de cobertura em madeira e, em alguns casos, também paredes de alvenaria reforçada com elementos ou estruturas de madeira.

A típica cobertura de madeira Portuguesa apresenta asnas como principal elemento estrutural, com uma pendente variável entre 20° e 30°, sendo materializada por telhas cerâmicas apoiadas sobre as varas espaçadas de 40-50 cm, que repousam por sua vez sobre a cumeeira, as madres e o frechal. [Branco, J., 2006]

Ainda existe um número significativo destes edifícios em uso, ainda que muitos deles tenham sofrido grandes modificações. Mesmo quando o uso de betão armado se generalizou, as estruturas de madeira mantiveram alguma importância na construção de coberturas.

As tradicionais estruturas de madeira de coberturas portuguesas são normalmente constituídas por asnas simples (ou de Paládio) com um vão médio de 6 a 7m.

A figura 15 mostra a configuração geométrica e a organização dos diferentes elementos da asna típica (que por ser a mais comum é também chamada de asna simples) em Portugal.

A ligação e articulação dos diversos membros são feitas através de nós, nalguns casos apresentando *tenon and mortise*, que podem ser simples ou duplas. As forças são transferidas directamente por compressão e/ou fricção. Para melhorar o contacto entre os elementos conectados, as ligações são correntemente reforçadas com elementos metálicos. A utilização destes elementos, para além de se destinar a contrariar as acções fora do plano da asna, serve ainda para garantir a segurança e estabilidade sob acções de sucção devidas ao vento. Correntemente, são usados estribos, cintas e pernos.

As espécies de madeira mais frequentemente utilizadas nas coberturas de madeira Portuguesas são: Pinho Bravo (*Pinus pinaster*, Ait.), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*, Labill.) e Castanho (*Castanea sativa*, Mill.). O uso de Madeira de Castanho é mais comum em edifícios nobres, nomeadamente eclesiásticos, de valor monumental ou económico. Já a utilização do Pinho bravo e do Eucalipto é comum em construções industriais, em particular, daquelas com data de construção situada na primeira metade do século passado.

Como estas espécies apresentam uma elevada durabilidade, é também normal que apareçam nas construções mais antigas. Nos últimos anos, dado o seu baixo custo, o uso de Eucalipto cresceu significativamente. O pinheiro bravo, como espécie mais disseminada em Portugal, esteve sempre presente na construção.

Na concepção de novas estruturas ou na avaliação das existentes, é comum modelarem-se as asnas considerando cada membro com ligações rotuladas nas duas extremidades. Contudo, estas ligações apresentam uma significativa resistência aos momentos e poderão ser melhor classificadas como conexões semirrígidas. Esta capacidade é especialmente importante quando submetidas a cargas não simétricas, como as que são induzidas pela neve, vento e principalmente sismos. Em trabalhos de reabilitação, a falta de modelos práticos e realistas para as ligações leva, geralmente, a muito conservativos *retrofits* e *upgrades* para satisfazer a segurança e capacidade de serviço requeridas nos mais recentes regulamentos e códigos. Para além disto, a incompreensão do comportamento global das asnas tradicionais pode resultar numa distribuição inaceitável de esforços nos membros como resultado de um inapropriado reforço/consolidação das ligações (em termos de rigidez e/ou forças).

Neste trabalho, considera-se este tipo de asna tradicional, mais comum no nosso país, no que se refere à análise do seu comportamento estrutural, das suas principais anomalias e soluções de reforço. Mais à frente desenvolve-se uma análise mais aprofundada ao comportamento estrutural, anomalias mais frequentes (capítulo IV) e soluções de reforço/reparação (capítulo V), sempre referidas a elementos de madeira inseridos neste tipo de asnas.

2.2.4. Execução das asnas

A intercepção das linhas de eixo da perna e da linha da asna deverá cair sobre um terço da espessura da parede onde a linha da asna se apoia. Quando a intersecção cai fora da parede deverá ser usado um cachorro de pedra para assentamento da linha da asna. O encastramento dos topos das linhas deve ter cerca de 0.20 a 0.30m de entrega. As ligações das asnas entre si numa cobertura completa são feitas pelos frechais, contra-frechais, madres e fileiras. Só nas asnas de tipo fabril e nos lanternins das asnas que os possuam se constrói, para ligação total das asnas, o sistema de contraventamento. Às vezes, em grandes construções, fazem-se interiormente, dentro do sótão, escoramentos entre asnas, dos pendurais ao vigamento. [Costa, F.]

A pormenorização construtiva é um indicador da capacidade do projectista e de perícia técnica de execução. O detalhe dá indicações imediatas sobre o valor e preocupações técnicas atendidas no momento de concepção da estrutura. [Barbisan, V; Lanner, F., 2000]

Os pormenores construtivos são indícios que nos permitem compreender a concepção original da asna. O diagnóstico de uma estrutura, em geral e em particular da cobertura, é um exercício que recorre ao “olho clínico” do técnico, no sentido em que é preciso reconhecer a lógica de base daquilo que foi executado.

Algumas hipóteses preliminares são obviamente necessárias para restringir a procura de dados relevantes, caso contrário, corre-se o risco de alguma dispersão em trabalhos inúteis.

2.2.4.1 Ligações

É de fundamental importância reconhecer-se a existência de uma grande dependência do modelo de cálculo dos nós de confluência dos modelos estruturais e tipo e qualidade da madeira empregue na estrutura. (Neste sentido, pode referir-se o estudo de Gaetano Della Giustina - *La pathologie des Charpentes en Bois*, Moniteur, Paris, 1985, de mais de 800 estruturas de madeira degradadas).

A maior parte dos danos de origem estrutural devem-se a secção insuficiente e a incertezas de projecto e/ou execução errada de nós de interface madeira/madeira e madeira/outro material.

[Barbisan, V; Lanner, F., 2000]

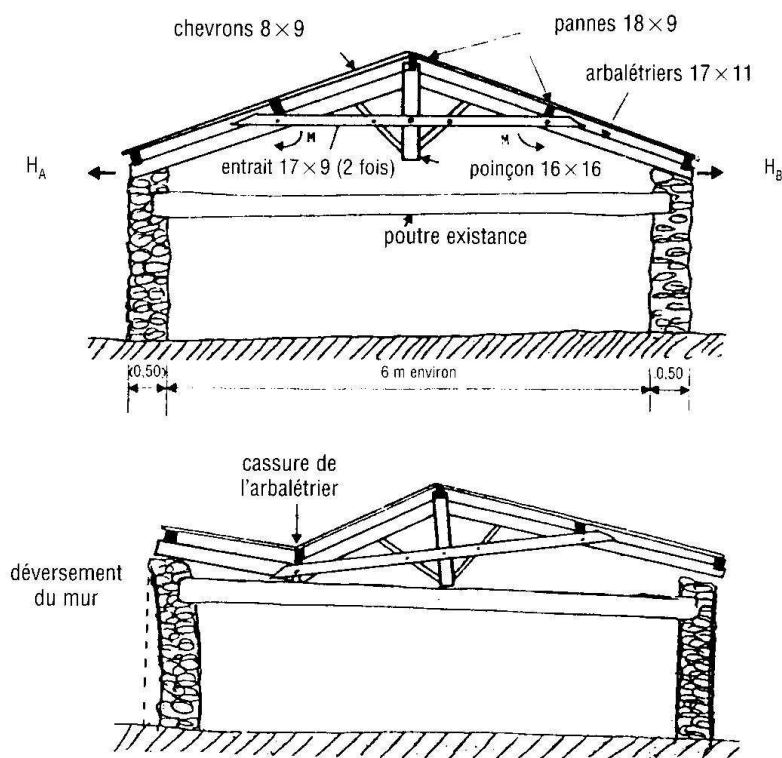


Figura 37 – Desabamento de asna mal concebida e debilitada na zona mais solicitada (G. Della Giustina Parigi, 1985)

Os ligadores correntes em Portugal são: cavilhas, parafusos de porca, agrafos, pregos, parafusos de enroscar e chapas metálicas denteadas.

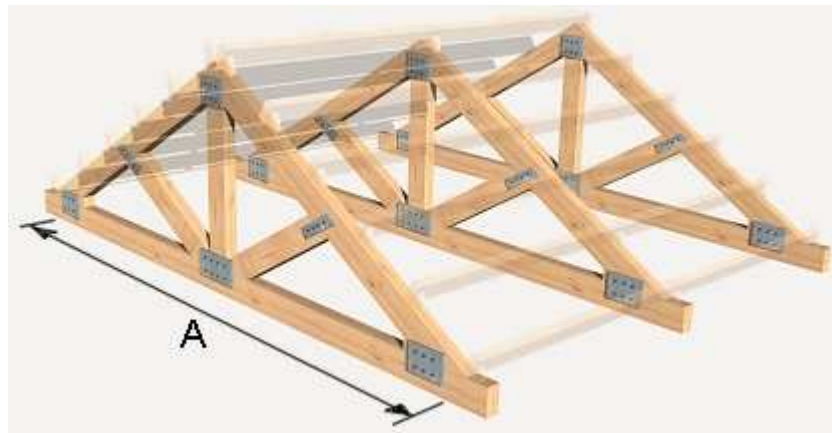


Figura 38 – Esquema tridimensional de asnas com ligadores metálicos (Cóias, V., 2007)

- SAMBLAGENS

Na linha e no pendural abrem-se umas mechas para receberem as respigas das pernas e nestas e no pendural também se abrem as mechas para as respigas das escoras. Todas as peças providas de respiga formam também com o seu topo um dente, que entalha numa murtagem que se abre na peça ligada, conforme desenhos. [Costa, F.]

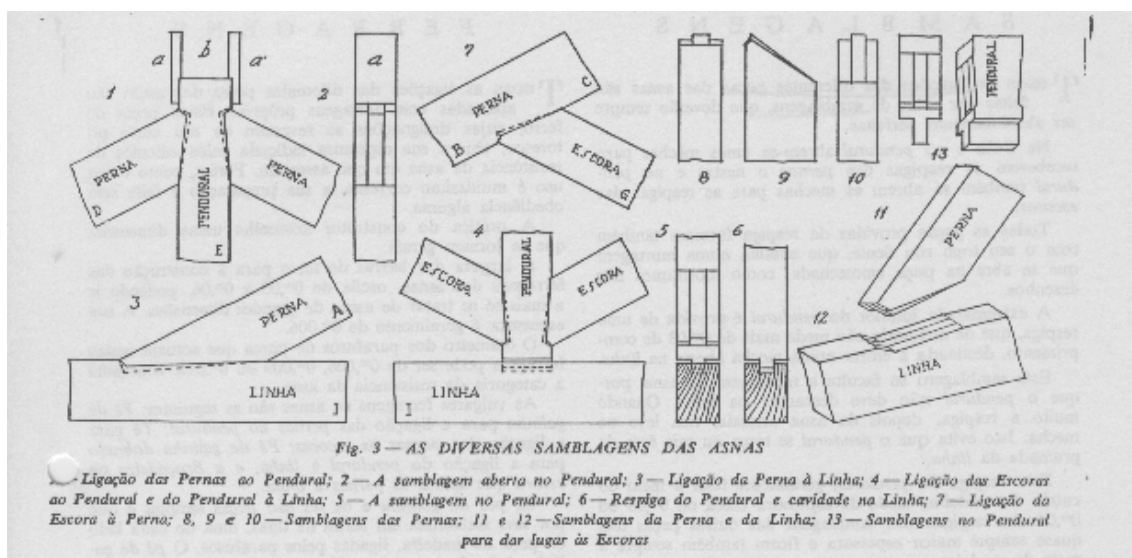


Figura 39 – Esquema de samblagens das asnas (Costa, F.)

A extremidade inferior do pendural é provida de uma respiga, que ordinariamente não mede mais de 0.03m de comprimento, destinada a entrar numa mecha aberta na linha. Esta samblagem só permite a montagem da asna porque o pendural não deve descansar na linha. Quando muito, a respiga, depois da asna armada, fica leve na mecha. Isto evita que o pendural se torça ou saia fora

da prumada da linha. Esta respiga do pendural, geralmente feita a meio do cutelo da madeira, mede de espessura cerca de 0.03m ou 0.04m. As respigas das samblagens das outras peças têm quase sempre maior espessura e ficam também a meio da madeira. Os dentes que acompanham as respigas nos topos das peças de madeira, não vão além, na sua parte mais saliente, de 0.02m. Nas construções com peças de madeira de pouca largura, fica-se muitas vezes apenas por 0.01m a 0.015m. As respigas também quase sempre não vão além, na sua parte mais saliente, de 0.04m ou 0.05m. As respigas acompanham os dentes na sua forma triangular, não sendo, todavia, chanfradas como eles. As murtagens deverão ser muito bem desempenadas, para que a junção das peças se faça com perfeição. Nisto reside de certo modo a garantia do bom desempenho da estrutura da construção. [Costa, F.]

As asnas são amparadas sobre a perna por calços ou cunhas de madeira, por sua vez pregados à mesma perna. Estes calços assentam numa murtagem, para que não haja escorregamento. A madre sofre um pequeno entalhe designado dente de cão, geralmente de 0.01 m de profundidade, para que não saia da perna da asna onde se deve conservar sempre. As madres correm de asna a asna estabelecendo a ligação entre elas, em todo o madeiramento. Convém por isso que o comprimento da viga que se aplica como madre coincida com apoio na asna, para se evitarem acrescentos nos vãos, ficando por conseguinte acrescentadas, se isso for necessário, sobre as pernas das asnas. [Costa, F.]

-FERRAGENS

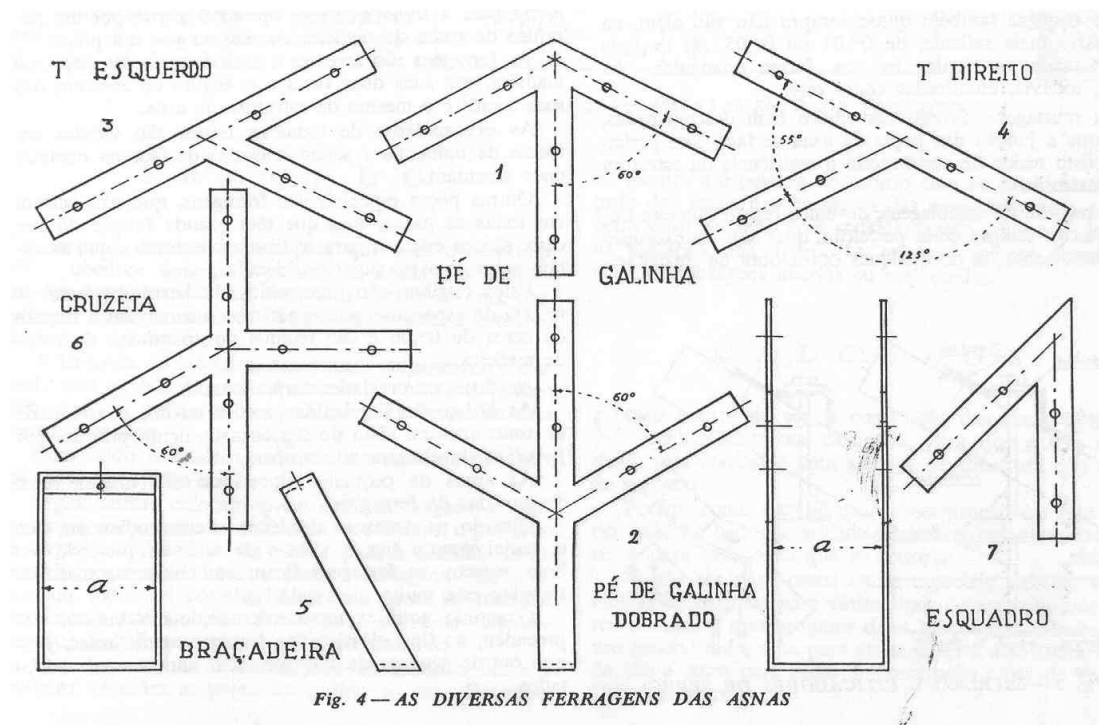


Figura 40 – Esquema de ferragens das asnas (Costa, F.)

Todas as ligações das diferentes peças das asnas são apertadas com ferragens próprias. A largura das barras de ferro para a construção das ferragens das asnas oscila de 0.05m a 0.06m, podendo ir a mais se tratar de asnas de grandes dimensões. A sua espessura é geralmente de 6mm. O diâmetro dos parafusos de porca que actuam nestas ferragens pode ser de 6mm, 9mm ou 12mm consoante a categoria de resistência da asna.

As vulgares ferragens de asnas são as seguintes (ver figura anterior): Pé de galinha, para a ligação das pernas ao pendural; Tê, para a ligação das pernas às escoras; Pé de galinha dobrado, para a ligação do pendural à linha, e a Braçadeira ou escora, que aperta as pernas à linha. Os Pés de galinha e os Tês são peças simples e que por isso trabalham em séries de duas, uma de cada lado da peça de madeira, ligadas pelos parafusos. O Pé de galinha dobrado é uma peça única que se enfia por debaixo da linha e cujas hastes são depois apertadas de um a outro lado, através da madeira, pelos parafusos. A Braçadeira, a que vulgarmente se dá também o nome de escora, enfia pela extremidade da linha e fixa-se apenas à perna, por um parafuso de rosca de madeira ou mesmo por um prego.

As ferragens são assentes a meia largura das peças de madeira, nas suas duas faces e o ângulo de abertura das hastes é o mesmo da estrutura da asna. As extremidades de todas as hastes são viradas em forma de unha, para serem cravadas de face na madeira onde assentam. Outras peças especiais das ferragens, que não entram em todas as asnas, mas que têm grande função no seu caso, são os estribos para os tirantes de ferro e que assentam sobre a parte superior da perna.

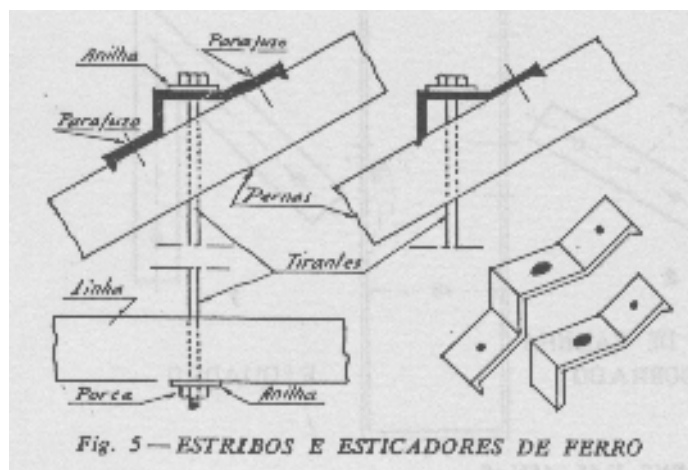


Figura 41 – Estribos e esticadores metálicos (COSTA, F.)

Estes estribos são construídos em barra de ferro de 6mm de espessura, largura de 6cm e são fixados por parafusos de rosca de madeira. As duas extremidades de madeira formam unha. As linhas são fixadas às paredes ou aos pilares onde as asnas se apoiam, além do seu encastramento próprio, por ferrolhos de chaveta ou âncoras. As asnas de pequena importância são muitas vezes desprovidas de ferragens. Quando as asnas se destinam a construções em que o madeiramento fica

à vista e onde se pretende um bom aspecto, as ferragens ficam embebidas na madeira, sendo obviamente este trabalho mais valorizado.

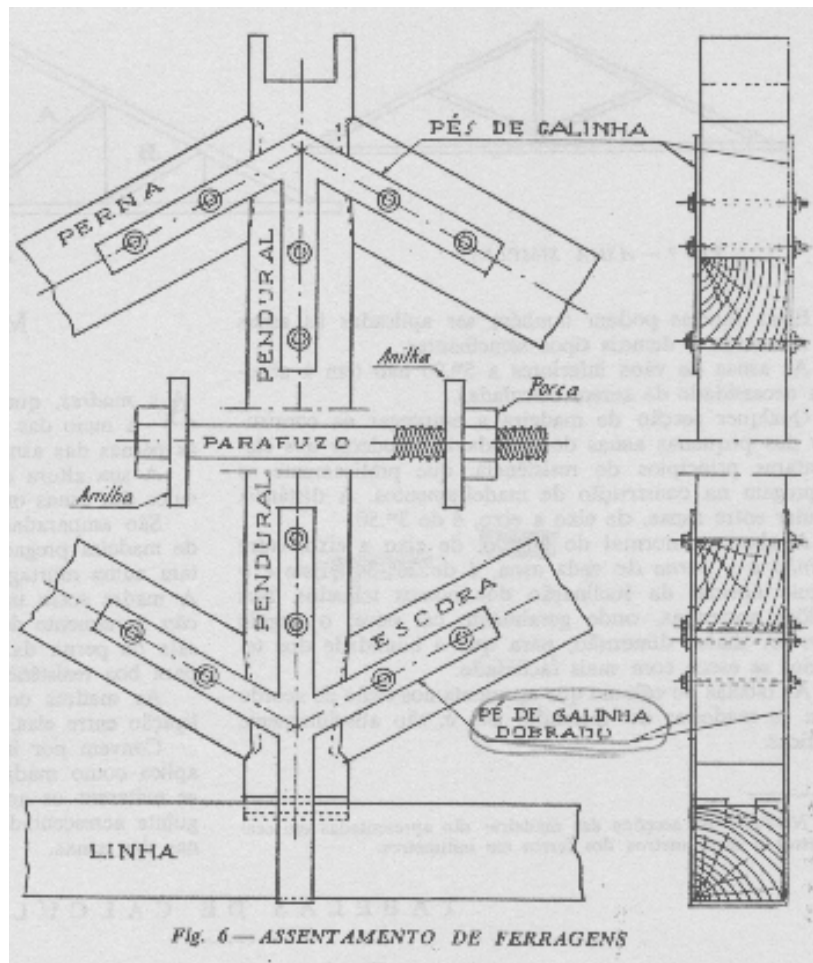


Figura 42 – Pormenores de execução de ligações entre elementos das asnas (Costa, F.)

- Pormenores de uniões

A asna tradicional portuguesa apresenta essencialmente esforços normais nos seus elementos causados por forças axiais e momentos flectores induzidos pelo peso-próprio e cargas assimétricas (como as produzidas pela neve e sismos). Os elementos mais esforçados são as pernas, em termos de esforço normal e transversal. A linha e as escoras apenas têm esforços significativos quanto ao esforço normal e o pendural apresenta só esforço normal.

Identificaram-se as variações do comportamento estrutural da asna em resultado dos modelos assumidos em projecto. A avaliação de antigas asnas existentes mostra várias diferenças nos respectivos modelos estruturais, aspectos mal definidos ao nível das ligações e as consequências no comportamento estrutural das asnas são assim realçadas. Apesar das recomendações construtivas serem desde há muito conhecidas, resultando de décadas de experiência, é frequente encontrar exemplos que contrariam essas recomendações.

A aplicação das cargas concentradas fora dos nós, por exemplo devido a um incorrecto posicionamento das madres, pode comprometer a segurança estrutural global. Para analisar o comportamento e segurança destas estruturas, é importante usar modelos adequados, considerando uma correcta rigidez das ligações.

A linha deve ser suspensa no pendural, através da montagem de peças metálicas do tipo pé-de-galinha dobrado pregado apenas no pendural, suspendendo a linha com uma conexão sem flexão-rigidez. Quando a ligação linha/pendural é rígida, as frequências próprias e modos normais de vibração da asna são claramente alteradas. [Branco, J., 2006]

2.2.4.2. PORMENORES CONSTRUTIVOS

- a) Interface asna – parede ou apoio em frechal – Os frechais transmitem as cargas ao suporte. É fundamental que o ponto de descarga das cargas pela asna “caia” na parede de suporte, caso contrário a excentricidade irá originar esforços perigosos na entrega da linha.

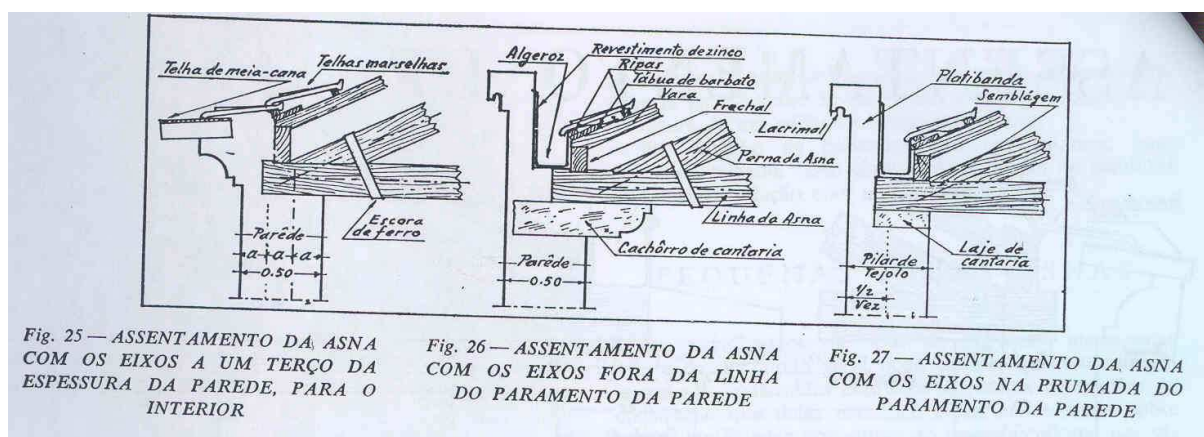


Figura 43 – Pormenores de assentamento de apoios de asnas (Costa, F.)

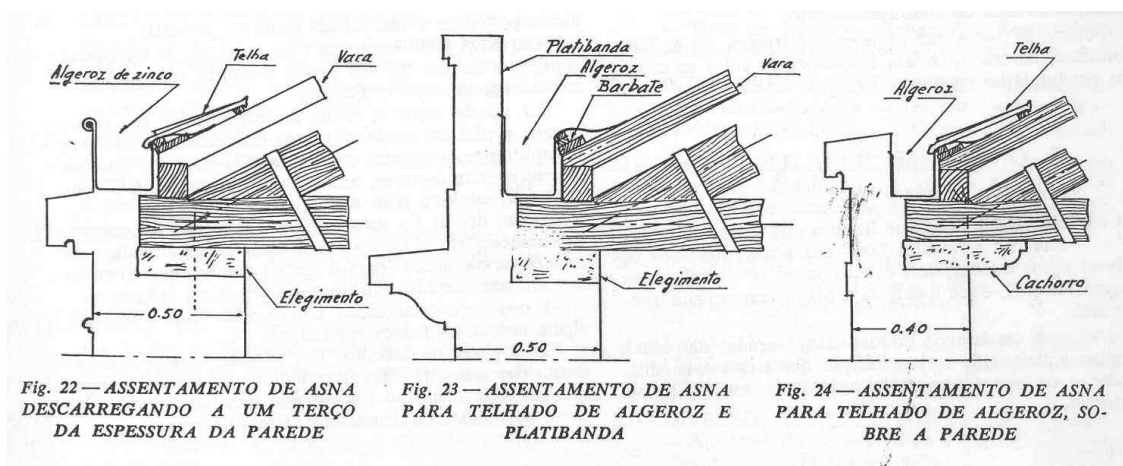


Figura 44 – Pormenores de assentamento de apoios de asnas (Costa, F.)

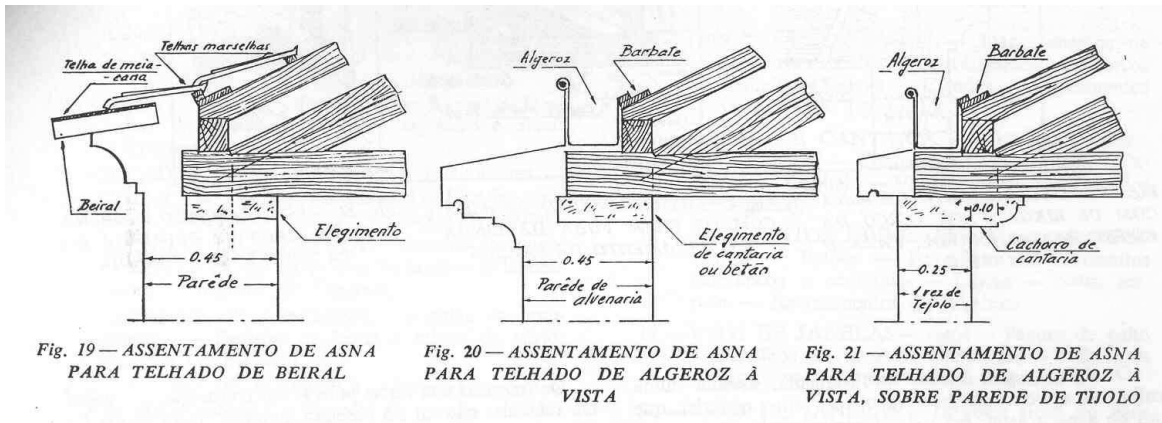


Figura 45 – Pormenores de assentamento de apoios de asnas (Costa, F.)

b) Ligação perna – linha

A linha impede que as pernas se afastem por acção das cargas.

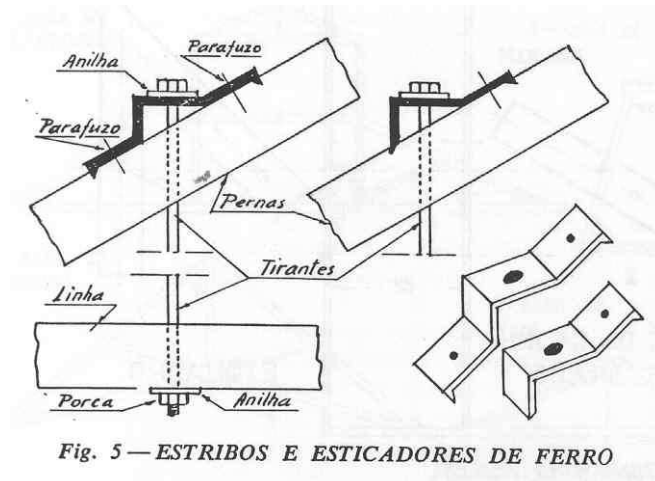


Figura 46 – Esquema da ligação perna-linha com tirantes metálicos (Costa, F.)

c) Ligação pendural – pau de fileira e pendural – pernas

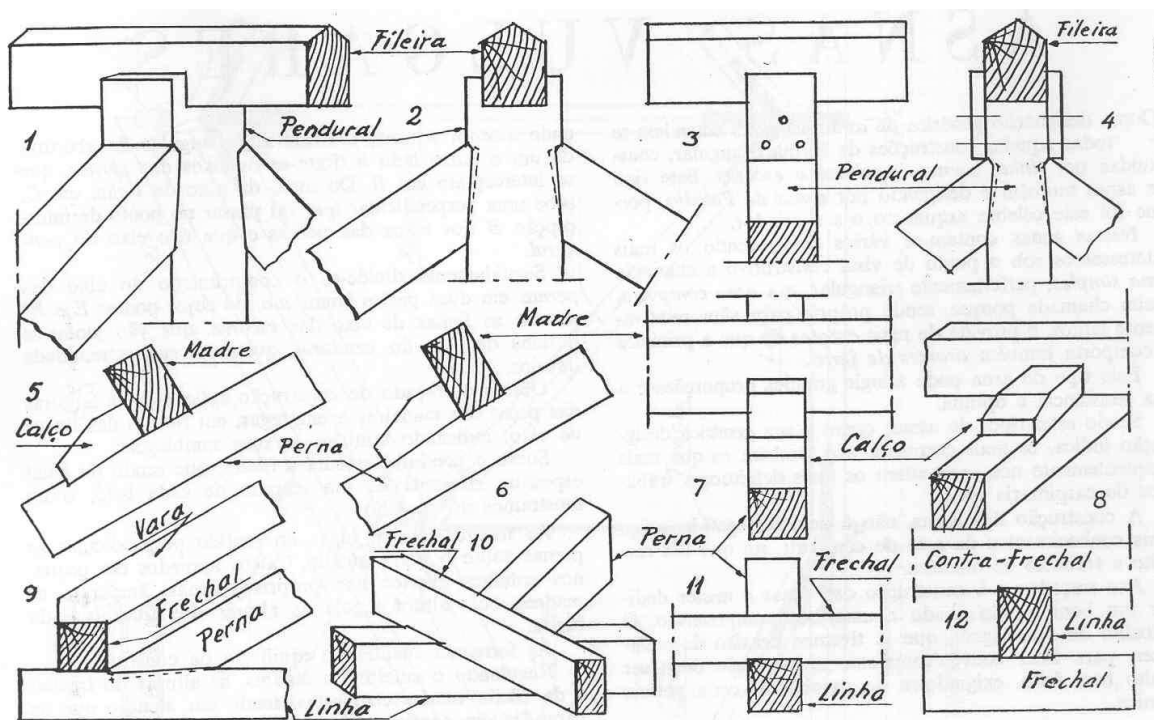


Fig. 9 — FRECHAS, CONTRA-FRECHAS E FILEIRAS

Figura 47 – Esquema de ligações pendural-pau de fileira e pendural- pernas (Costa, F.)

d) Ligação pendural – linha

Entre o pendural e a linha deve existir um afastamento mínimo de 2cm (regra tradicional) o pendural nunca se apoia na linha, pois se isto acontecer induziria flexão num elemento que não está preparado para isso, o que poderia originar o deslizamento dos apoios. O pé de galinha (ligação metálica) não é aparafusado à linha mas apenas serve para manter o alinhamento.

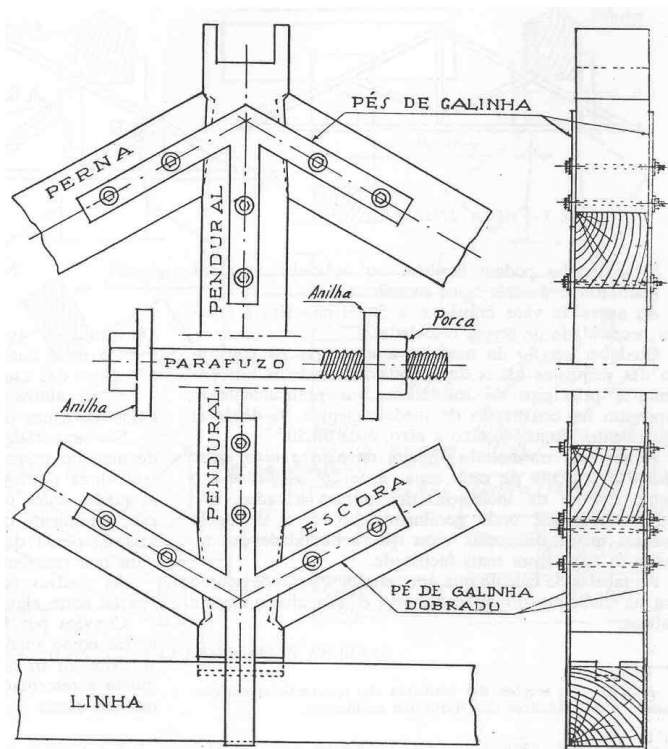


Fig. 6 — ASSENTAMENTO DE FERRAGENS

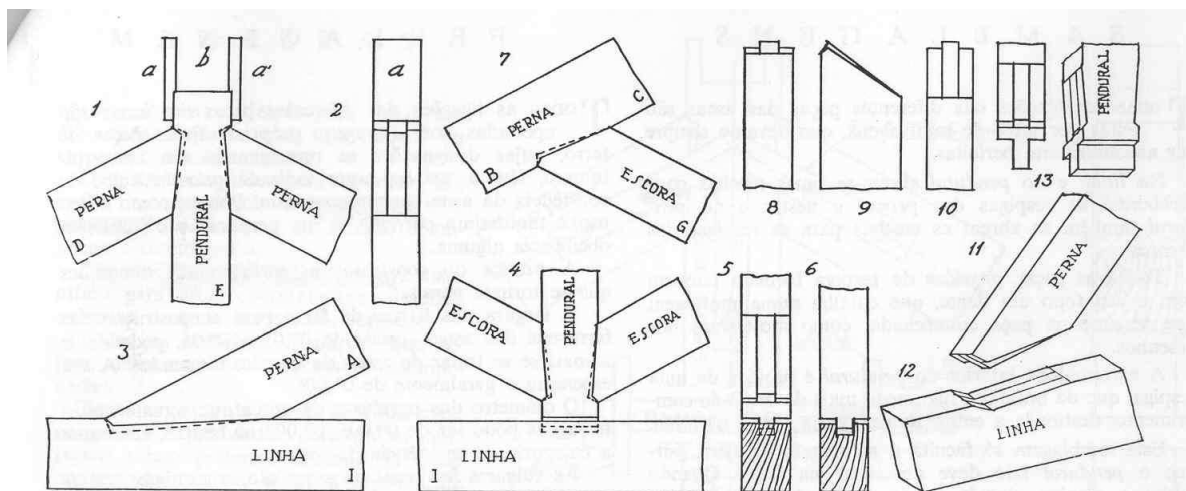


Fig. 3 — AS DIVERSAS SAMBLAGENS DAS ASNAS

1 — Ligação das Pernas ao Pendural; 2 — A samblagem aberta no Pendural; 3 — Ligação da Perna à Linha; 4 — Ligação das Escoras ao Pendural e do Pendural à Linha; 5 — A samblagem no Pendural; 6 — Respiga do Pendural e cavidade na Linha; 7 — Ligação da Escora à Perna; 8, 9 e 10 — Samblagens das Pernas; 11 e 12 — Samblagens da Perna e da Linha; 13 — Samblagens no Pendural para dar lugar às Escoras

Figura 48 e 49 – Pormenores de ligação pendural-linha (Costa, F.)

e) Ligação madres – pernas

As madres transmitem as cargas às asnas em pontos de descarga – nós – com escoras. As ligações de continuidade das madres não devem ser feitas sobre as pernas mas sim a cerca de $\frac{1}{4}$ do vão entre estas, onde os momentos são normalmente mais reduzidos.



Figura 50 – Madres (Cóias, V., 2007)

f) Linhas de asnas

As linhas das asnas sofrem fundamentalmente problemas de tracção e deslizamentos.

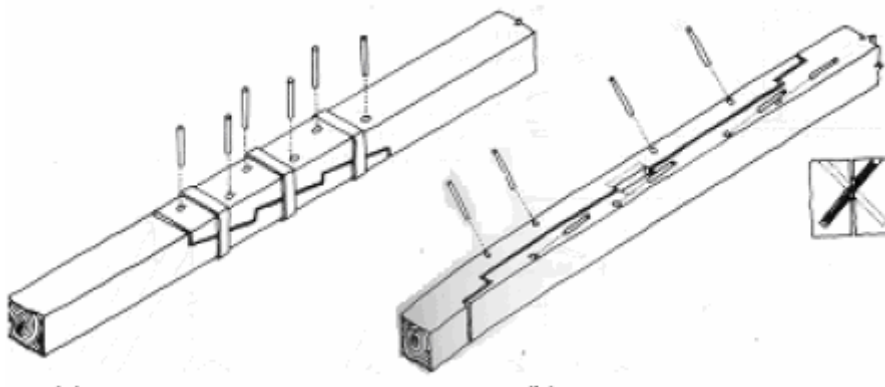


Figura 51 – Uniões em linhas (Barbizan, 2000)

g) Ligação perna – linha



Figura 52 – Ligação perna-linha em asna desmontada (Rodrigues, R., 2004)

No caso da figura anterior, as ligações perna-linha foram reforçadas com varões de fibra de carbono inclinados.



Figura 53 – Ligação perna-linha (ROTAFIX, 2007)

A excentricidade dos apoios das asnas com o nó perna/linha a não cair na secção da parede/suporte da asna é causa de roturas das entregas das linhas que se prolongam até aos muros de apoio. Esta situação pode ser resolvida através das soluções descritas no capítulo V.

A aplicação de firante e chapa metálica é uma hipótese para o reforço da ligação da perna com a linha da asna.

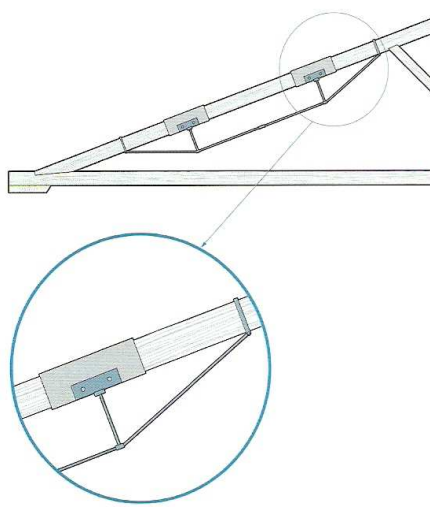


Figura 818 – Elementos metálicos para reforço de perna de asna de madeira

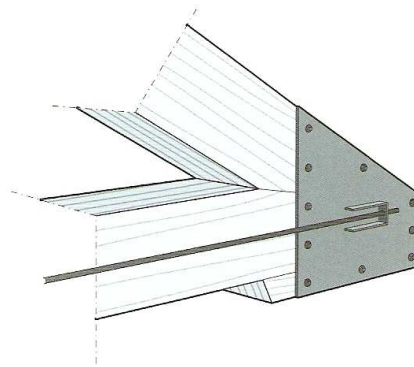


Figura 819 – Aplicação de tirante e chapa metálica para reforço de ligação de perna com linha de asna

Figura 54 – Ligação pendural – pernas (Paiva, J., 2006)



Figura 55 – Ligação pendural – pernas em asna nova (Rodrigues, R., 2004)



Figura 56 – Ligação pendural – pernas reforçada com colagem de nova madeira
(Rodrigues, R., 2004)

Quando a altura da secção de madeira da perna for elevada, pode optar-se por realizar a ligação pendural-perna com varões dispostos longitudinalmente segundo a direcção do centróide da peça e segundo os limites do seu terço central. Esta última localização tem como objectivo centralizar o reforço e assegurar apenas as compressões (esforço que ocorre nas pernas da asna).

h) Ligação pendural – linha

Uma incerteza habitual na definição do comportamento estrutural global das asnas tradicionais portuguesas está relacionada com a ligação entre o pendural e a linha. Ainda que os antigos manuais de construção sugiram a desconexão entre o pendural e a linha, na prática, os exemplos de ligações mal concebidas são frequentes. Na bibliografia tradicional é recomendado que a linha seja suspensa ao pendural através de uma tira metálica (pé de galinha dobrado) apenas pregada ao pendural (figura 58). Desta forma, a deformação da linha é reduzida e a deformação para fora do plano da asna é contrariada preventivamente.

Todavia, este sistema de ligação não era o único a ser utilizado. Em muitos casos (exemplo na figura 58) o pendural está ligado à linha através de pregagem ou pernos, modificando a rigidez da ligação, sem suspender a linha.

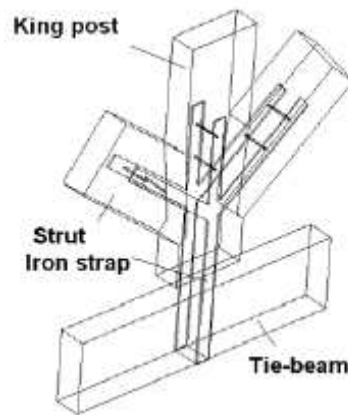


Figura 57 – Ligação ideal entre o pendural e a linha (ROTAFIX, 2007)



Figura 58 – Exemplo de uma ligação mal concebida entre o pendural e a linha (Branco, J., 2006)



Figura 59 – Ligação pendural-linha

i) Ligação escora – pendural



Figura 60 – Degradação de escora da asna principal (Rodrigues, R., 2004)

j) Ligação escora – perna



Figura 61 - Ligação escora – perna reforçada (Rodrigues, R., 2004)

Pormenores de ligações com chapas metálicas recuperadas e parafusos em aço inox.



Figura 62 - Ligação escora – perna em madeira lamelada-colada (Rodrigues, R., 2004)

l) Ligação madres – pernas

O apoio sobre as asnas é feito com recurso a calços de madeira ou berços metálicos, para evitar o escorregamento ou a rotação da madre. É fundamental garantir a não existência de excentricidades das madres relativamente aos apoios nos nós das pernas das asnas.

2.3. Considerações sobre o comportamento estrutural das asnas

A estrutura de uma cobertura é sempre concebida com a função de suportar a subestrutura e o revestimento e transmitir as cargas descarregadas por estes à estrutura do edifício.

Em qualquer caso as estruturas de uma cobertura, em particular as asnas, estão sujeitas a acções permanentes e variáveis. As primeiras consistem no peso-próprio dos elementos que suportam e as segundas consistem normalmente nas sobrecargas a considerar nas coberturas, na acção da neve e principalmente do vento (pressão e sucção), que deverá sempre ser tida em conta.

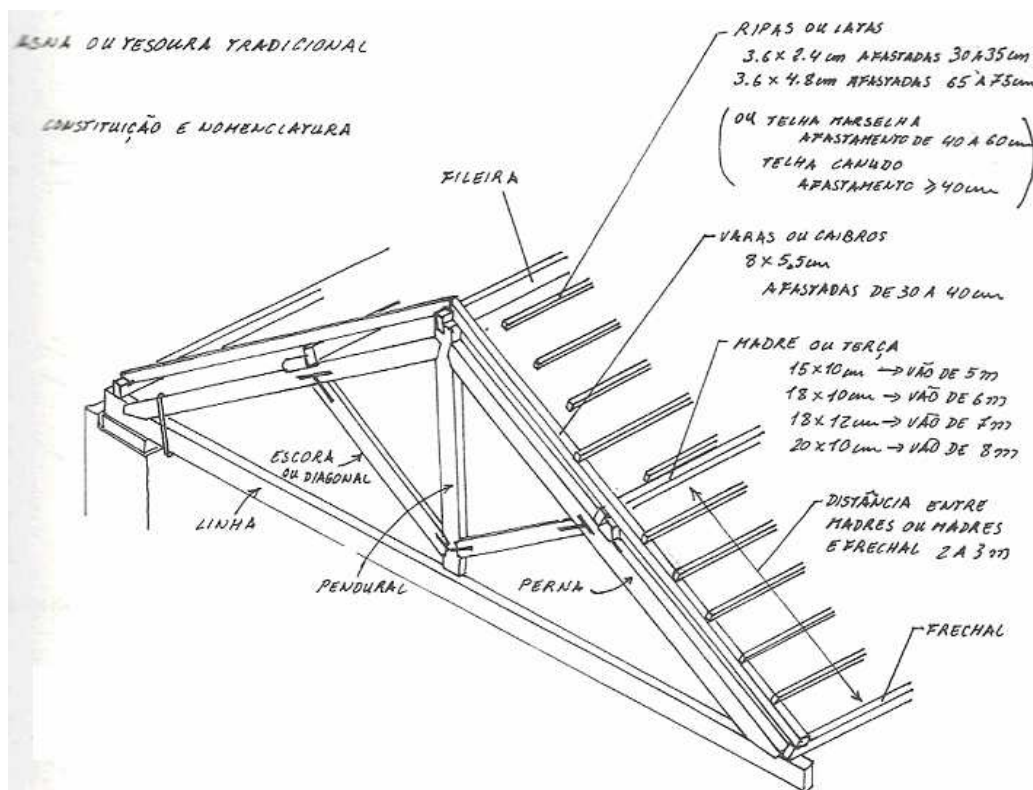


Figura 63 – Esquema de secções e afastamentos tradicionais de elementos estruturais das coberturas (Mascarenhas, J., 2006)

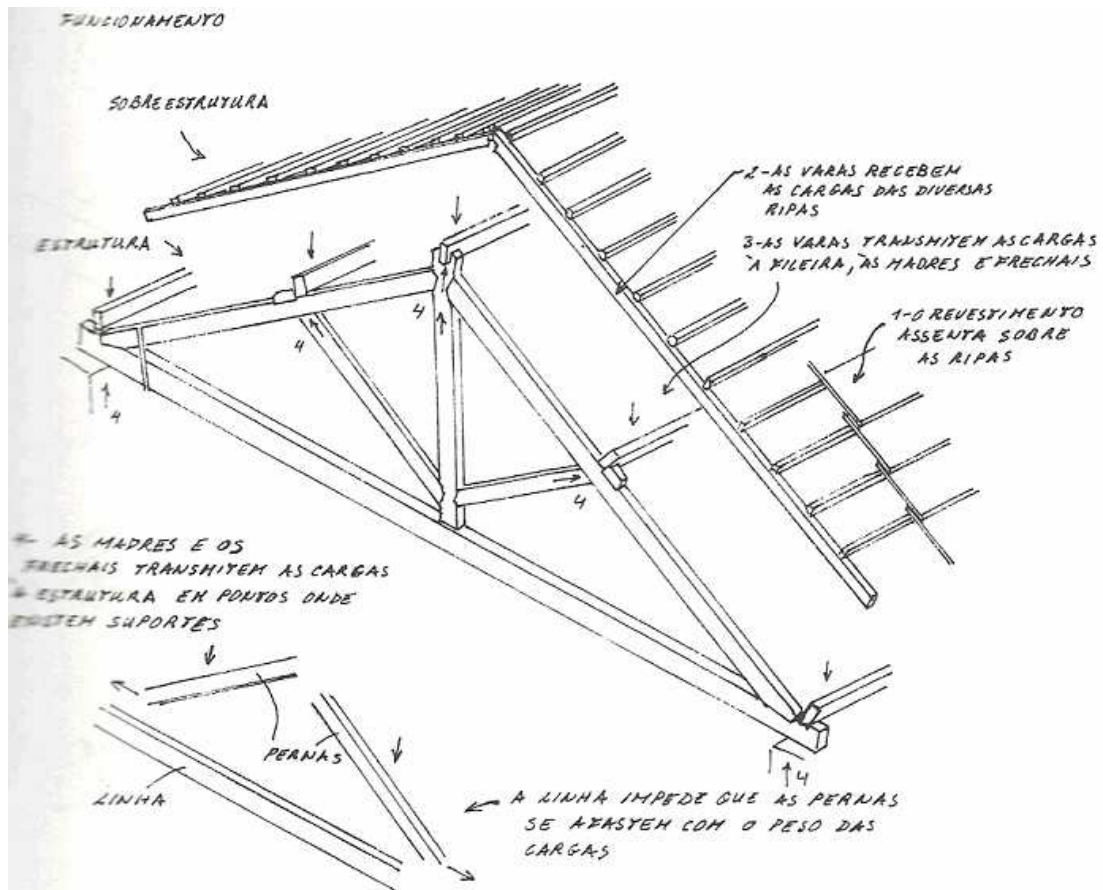


Figura 64 – Esquema de funcionamento e descarregamento dos vários elementos da estrutura de coberturas tradicionais (Mascarenhas, J., 2006)

Vãos	Linhas	Pernas	Escoras	Pendurais	Madres	Varas
5.00	12 × 10	12 × 10	10 × 10	10 × 10	16 × 10	6 × 4
6.00	14 × 10	16 × 10	12 × 10	10 × 10	18 × 10	6 × 4
7.00	14 × 12	16 × 12	12 × 12	12 × 12	18 × 10	8 × 6
8.00	16 × 12	20 × 12	12 × 12	12 × 12	20 × 10	8 × 6

Tabela II – ASNAS MISTAS

Vãos	Linhas	Pernas	Escoras		Pendurais	Tirantes		Madres	Varas
			A	B		C	D		
9.00	14 × 12	16 × 12	12 × 12	12 × 12	12 × 12	12 ∅	9 ∅	18 × 10	8 × 6
10.00	16 × 14	16 × 14	14 × 14	14 × 14	14 × 14	12 ∅	9 ∅	18 × 10	8 × 6
11.00	16 × 14	18 × 14	14 × 14	14 × 14	14 × 14	15 ∅	12 ∅	20 × 10	8 × 6
12.00	16 × 14	22 × 14	14 × 14	14 × 14	14 × 14	15 ∅	12 ∅	20 × 10	8 × 6

Quadro 1 – Tabelas tradicionais de dimensionamento estrutural expedito (Costa, P.)

Como valores correntes, para verificação expedita de asnas de madeira antigas, podem referir-se:

A distância média regular entre asnas, de eixo a eixo, é de cerca de 3.50m.

A abertura corrente do ângulo, de eixo a eixo, entre perna e a linha é de 26/27°.

Um factor que afecta o cálculo das estruturas de madeira diz respeito à dispersão de valores referentes à resistência mecânica o que, através da aplicação de coeficientes de segurança, origina uma leitura não muito clara em termos de eficiência estrutural. Esta dispersão é sobretudo sentida no caso da madeira maciça, não o sendo tanto no caso da madeira lamelada colada. A resistência mecânica da madeira varia entre as diversas espécies, não só de diferentes proveniências mas também entre elementos obtidos do mesmo tronco.

Dados experimentais, obtidos a partir de ensaios de resistência à flexão em provetes de madeira fornecem valores relativos ao coeficiente de dispersão, ou variação ($d=s/R_m$, quociente entre desvio quadrático médio e resistência média), que facilmente superam 0,20 (20%), indicando-nos o pouco sentido que faz a aplicação de critérios de verificação de segurança normais. Como se pode constatar da análise do gráfico que se segue, a relação coeficiente de dispersão / coeficiente de segurança é altamente aleatória quando na presença de grande dispersão de valores. É do senso comum considerar que quanto maior for a incerteza quanto à capacidade de resistência de uma estrutura mais se deve acautelar na sua execução/concepção.

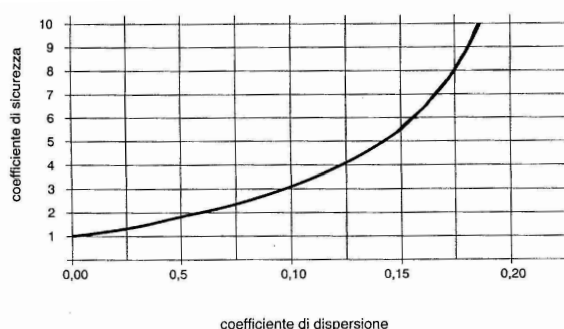


Figura 65 – Relação esquemática entre coeficiente de dispersão e coeficiente de segurança

Os materiais homogêneos (baixa dispersão) são afectados de baixos coeficientes de segurança. Aumentando a dispersão, aumenta o coeficiente de segurança. O andamento assintótico da curva denuncia o erro de se aferir coeficientes de segurança para d maior que 20%.

Esta dificuldade pode ser ultrapassada reagrupando-se os elementos estruturais em classes mais homogêneas, segundo o definido no Eurocódigo 5 – Estruturas de Madeira, onde se faz também especial referência aos detalhes construtivos e às condições em serviço da estrutura. A madeira lamelada colada atinge valores de coeficiente de dispersão de 0,04 a 0,06.

Princípios de dimensionamento de asnas (Sistemas estruturais pelo EC5 – parte 1.1)

- Calcular as asnas como estruturas reticuladas;
- Se houver forças a meio das barras poderá calcular-se o momento flector correspondente como viga simplesmente apoiada entre rótulas;
- Reduzir as forças aos nós das barras;
- Utilizar valores dos coeficientes de encurvadura indicados na parte 1.1 do EC5;
- Cálculo de ligadores metálicos do tipo chapa;
- Em princípio calcular as barras como peças à tracção ou compressão simples;
- Atender às excentricidades adicionais e aos momentos causados por forças fora dos nós, que implicam cálculo à flexão composta;
- É necessário verificar a deformabilidade das ligações.

2.3.1. Análise estrutural da asna tradicional de coberturas de edifícios antigos portugueses

Tanto no dimensionamento de construções novas como em acções de reabilitação ou reforço de estruturas antigas de madeira, é habitual assumir-se que as ligações das asnas de madeira são articuladas. Todavia, estas apresentam rigidez não desprezável. Esta capacidade de transmissão de momentos torna-se determinante sob o efeito de acções assimétricas como a neve, o vento e o sismo. A correcta definição do modelo estrutural e, em particular, da adopção de um valor adequado para a rigidez das ligações, ganha particular importância em estruturas antigas, onde os elementos estruturais apresentam grande variabilidade de inércias, e nem sempre as regras práticas de boa execução das ligações são seguidas.

Na reabilitação ou reforço de coberturas de madeira, a dificuldade em prever o real comportamento das ligações tradicionais frequentemente conduz a intervenções exageradamente do lado da segurança. Para além disto, a incompreensão do comportamento global da cobertura poderá resultar em tensões inaceitáveis nos restantes elementos em consequência de um inadequado reforço da ligação (em termos de rigidez).

As ligações das asnas são normalmente materializadas por entalhes de dente simples ou duplo e prevendo ou não respiga e mecha. Nestas ligações, ditas tradicionais, os esforços são transmitidos por compressão e/ou atrito. De forma a melhorar o contacto entre os elementos ligados são normalmente adicionados elementos metálicos. O uso destes elementos metálicos, para além de prevenir as deformações no plano ortogonal à estrutura, tem o objectivo de garantir a estabilidade

da ligação frente a forças cíclicas (inversão de esforços). Braçadeiras, esquadros e varões metálicos representam as soluções de reforço mais vulgares em ligações tradicionais de madeira.

O reforço de ligações de madeira pode ser executado de diversas formas: desde a simples substituição ou adição de ligadores, ao uso de elementos metálicos, ou materiais compósitos até à completa injeção de adesivos. Cada solução de reforço tem consequências únicas na resistência, na rigidez e na ductilidade finais da ligação. Apesar de frequentes, não existem estudos suficientes sobre o comportamento das ligações tradicionais de madeira e possíveis técnicas de reforço.

Alguns projectos de investigação têm sido elaborados (Branco, J., 2006) com o objectivo de estudar o comportamento monotónico e cíclico de ligações tradicionais de madeira identificando e avaliando possíveis técnicas de reforço.

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DAS ASNAS SIMPLES

Ao avaliar o comportamento estático e dinâmico de asnas simples de madeira sob o efeito de acções simétricas e assimétricas, a importância da ligação pendural-linha, a rigidez das ligações e a colocação das madres com ou sem excentricidade relativamente aos nós, representam alguns dos parâmetros a analisar, para uma melhor compreensão do comportamento destes sistemas estruturais.

Entre as principais conclusões dos referidos estudos (Branco, J., 2006), em que foi realizada uma análise numérica utilizando um programa de elementos finitos, considerando as acções regulamentares, salientam-se:

- As pernas são os elementos mais carregados, apresentando tensões normais e de corte. O pendural está submetido à tracção, as escoras à compressão e a linha está essencialmente traccionada mas exhibe também flexão devido ao seu peso próprio;
- Apenas para acções assimétricas, como por exemplo a neve, o vento e o sismo, a influência da rigidez das ligações é condicionante; Numa estrutura plana como é a asna, quando submetida a cargas pontuais aplicadas directamente nos seus nós, sem provocar qualquer flexão, a distribuição dos esforços é função da sua geometria;
- A colocação das madres com excentricidade relativamente aos nós altera a distribuição de esforços na asna, em particular, nas pernas. A consideração de uma excentricidade de apenas 20cm, um valor muito comum em várias obras visitadas, é suficiente para condicionar a segurança destes elementos (pernas);
- A linha deve estar suspensa no pendural de forma a reduzir as suas deformações devidas ao peso próprio. A ligação deve ser articulada e impedir as deformações no plano ortogonal ao plano da estrutura (asna);

- Quando a ligação pendural-linha apresenta rigidez, a frequência natural e os modos de vibração da estrutura vêm alterados;
- As ligações perna-linha são as mais condicionantes, não apenas pelos esforços que aí se concentram mas por serem zonas onde a deterioração biológica é mais frequente.

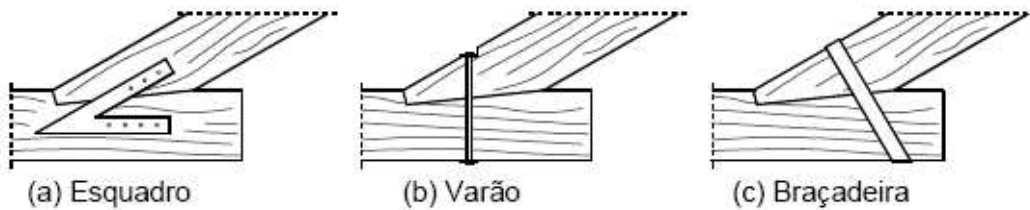


Figura 66 - Soluções de reforço estudadas para a ligação perna-linha

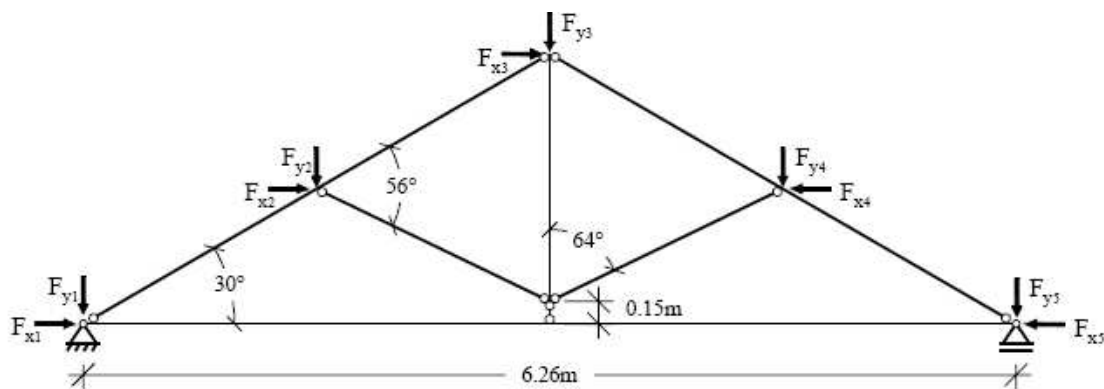
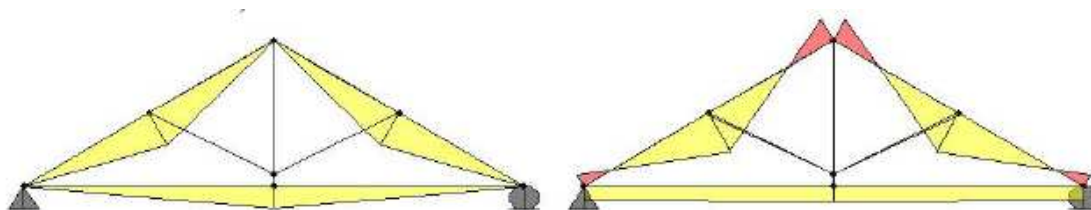


Figura 67 – Modelo de elementos finitos adoptado para a asna de forças concentradas (Branco, J., 2006)

a) Comportamento estático

- *Influência da rigidez dos nós*

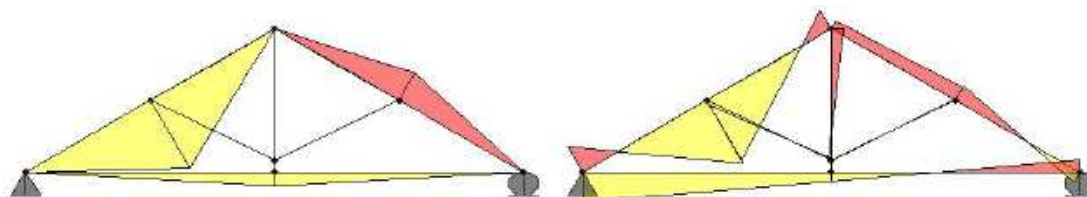
Normalmente as asnas de madeira são modeladas considerando articulações perfeitas nos topos de cada elemento. Contudo, as ligações correntes apresentam significativa rigidez. A rigidez dos nós está directamente dependente dos aparelhos metálicos adoptados nas conexões de madeira. Para estudar a influência da rigidez dos nós no comportamento global da asna, podem ser considerados dois modelos idênticos em termos de geometria, materiais e cargas, diferindo apenas ao nível da rigidez dos nós: o modelo A sem nenhuma rigidez e o modelo B com nós rígidos (Branco, J., 2006). As figuras seguintes mostram os diagramas de momentos flectores obtidos em ambos os modelos para um caso de carga simétrica (peso-próprio) e dois casos de cargas não-simétricas.



(a) Nós sem nenhuma rigidez

(b) Nós rígidos

Figura 68 – Diagramas de momentos flectores para a acção do peso-próprio (Branco, J., 2006)



(a) Nós sem nenhuma rigidez

(b) Nós rígidos

Figura 69 – Diagramas de momentos flectores para a acção da neve (Branco, J., 2006)

Apenas para as cargas não simétricas a influência da rigidez dos nós se torna relevante. Numa estrutura plana como as asnas em análise, submetida a cargas concentradas nos nós, sem flexão dos membros, a distribuição dos esforços na estrutura depende directamente da sua geometria.

- *Excentricidade das madres*

Um dos mais frequentes erros de construção está relacionado com o posicionamento das madres em relação aos nós. Quando as madres são colocadas com uma excentricidade relativamente aos nós, originam-se importantes momentos flectores nalguns elementos, que podem comprometer a segurança estrutural global. Este efeito pode ser visualizado através do modelo C considerado com uma excentricidade de 20 cm no posicionamento das madres, e nós sem qualquer rigidez.

A excentricidade das madres modifica a distribuição dos esforços, mas é mais evidente nas pernas da asna. Com a introdução da excentricidade das madres, os momentos flectores aumentam 106% nas pernas, para o caso de carga de peso-próprio. Para os casos de carga de neve e força mássica 1, os momentos flectores aumentam 35% e 3%, respectivamente, considerando uma excentricidade de 20 cm (Branco, J., 2006).

- *Ligação pendural/linha*

Uma incerteza habitual na definição do comportamento estrutural global das asnas tradicionais portuguesas está relacionada com a ligação entre o pendural e a linha. Ainda que os antigos manuais de construção sugiram a desconexão entre o pendural e a linha, na prática, os exemplos de ligações mal concebidas são frequentes. Na bibliografia tradicional é recomendado que a linha seja suspensa ao pendural através de uma tira metálica (pé de galinha dobrado) apenas pregada ao pendural (figura ...). Desta forma, a deformação da linha é reduzida e a deformação para fora do plano da asna é contrariada preventivamente.

Todavia, este sistema de ligação não era o único a ser utilizado. Em muitos casos (exemplo figura 71) o pendural está ligado à linha através de pregagem ou pernos, modificando a rigidez da ligação, sem suspender a linha. (Branco, J., 2006)

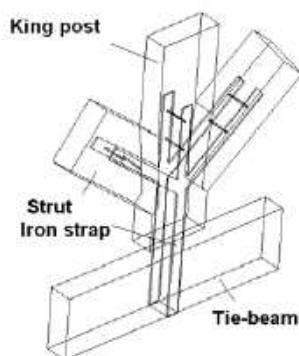


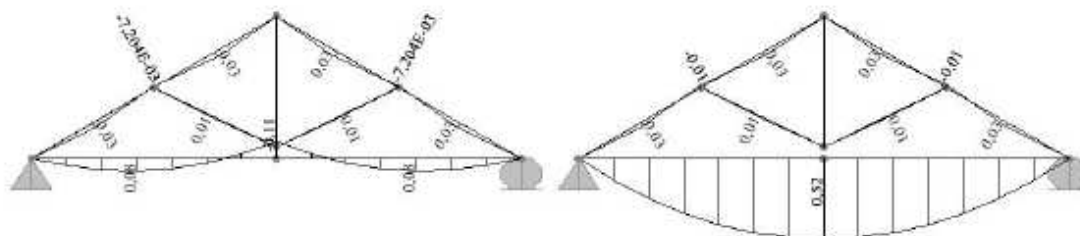
Figura 70 – Ligação ideal entre o pendural e a linha (Branco, J., 2006)



Figura 71 – Exemplo de uma ligação mal concebida entre o pendural e a linha (Branco, J., 2006)

De forma a realçar a influência da ligação entre o pendural e a linha podem ser analisados dois modelos. Considerando-se um modelo sem nenhuma ligação entre o pendural e a linha e comparando-se com o modelo similar com a linha suspensa no pendural. A diferença entre estes dois modelos é essencialmente o comportamento da linha. Quando a linha é suspensa do pendural, a deformação devida ao seu peso-próprio é reduzida e consequentemente, é reduzido o momento

flector neste elemento devido ao seu peso próprio (figura 72). Pode-se daqui concluir que a utilização do pé-de-galinha dobrado reduz a deformação devida ao peso-próprio e previne a deformação para fora do plano da estrutura. (Branco, J., 2006)

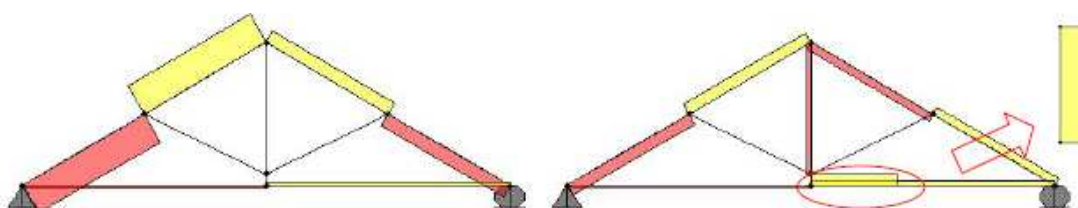


(a) Linha suspensa no pendural

(b) Linha desligada do pendural

Figura 72 – Diagrama de momento flector devido ao peso-próprio, (kNm) (Branco, J., 2006)

Outro modelo pode ser desenvolvido para avaliar a importância da rigidez da ligação linha/pendural. Este modelo difere do modelo inicial apenas na rigidez deste nó. Também neste caso, a rigidez do nó altera significativamente a distribuição dos esforços apenas para caos de cargas não simétricas. Neste caso, a distorção da asna conduz a importantes esforços transversos no pendural. Enquanto, com uma ligação ideal, a linha suspensa do pendural através de um nó sem rigidez, o pendural está apenas submetido a esforços de tensão axial. A figura 73 mostra o diagrama da distribuição de esforço transverso para o caso de carga de neve para os modelos antes referidos (Branco, J., 2006).



(a) Linha suspensa do pendural

(b) Ligação rígida pendural/linha

Figura 73 – Diagrama da distribuição de esforço transverso para os casos de carga de neve (Branco, J., 2006)

As asnas tradicionais comportam-se essencialmente como estruturas planas com esforços normais nos seus elementos. Comparando os resultados, em termos de esforços, para o modelo de referência, com os outros modelos em análise, verifica-se o seguinte (Branco, J., 2006):

- *Modelo – Nós rígidos*
 - Esforços normais na linha aumentam como consequência do maior momento flector;
 - No pendural surgem esforços transversos;
 - As escoras sofrem um aumento nos esforços normais, e os esforços transversos tornam-se significativos.

- *Modelo – Madres excêntricas*
 - Um aumento significativo do esforço transversal nas pernas verificou-se;
 - Conforme a classe de serviço considerada para a estrutura, este aumento pode comprometer a segurança estrutural (segundo o documento de aplicação nacional do Eurocódigo 5 para Portugal, todos os elementos em madeira maciça com uma secção de altura maior do que 100 mm devem ser considerados na classe de serviço 3).

- *Modelo – Linha desligada do pendural*
 - Removendo o apoio de meio-vão da linha, o esforço normal neste elemento aumenta devido à flexão causada pelo peso-próprio.

- *Modelo – Ligação rígida pendural/linha*
 - A rigidez da ligação linha/pendural apenas causa variação significativa dos esforços no pendural. Consequentemente, para este elemento, o esforço normal e o esforço transversal aumentam face ao modelo de referência.

b) Comportamento dinâmico

- Frequências naturais e formas modais de vibração

Para o estudo do comportamento dinâmico da asna tradicional, devem calcular-se, para vibração livre, as frequências naturais e os modos de vibração.

Analisando a primeira frequência natural obtida, não se observam variações significativas nos primeiros quatro modelos. Para o modelo com a ligação rígida linha/pendural encontra-se uma diferença significativa. O aumento da rigidez desta ligação resulta numa rigidificação global da asna, traduzida pelo aumento da primeira frequência fundamental.

Este aumento de rigidez também influencia a segunda frequência natural mas com menos importância, e não afecta os modos superiores.

Desligando a linha do pendural, um novo modo de vibração surge, com uma frequência, correspondente à vibração local da linha (Branco, J., 2006).

- *Análise sísmica*

A resposta sísmica da asna tradicional portuguesa mostra-nos que os elementos da asna são fundamentalmente sujeitos a esforços normais. As pernas são os membros mais esforçados. Quando os nós são modelados como rígidos, a linha mostra um aumento dos valores dos esforços, mas as escoras são os elementos onde o aumento de esforço transversal é maior. O pendural apresenta um aumento do esforço normal.

A excentricidade das madres produz essencialmente modificações de esforços nas pernas. Nestes elementos, o esforço normal aumenta e o esforço transversal aumenta ainda mais.

A desconexão dentre a linha e o pendural origina um aumento de esforços na linha e nas pernas. O aumento mais significativo é o de esforço normal nas pernas.

Considerando uma ligação rígida entre a linha e o pendural, o comportamento deste último é particularmente afectado. O esforço normal aumenta significativamente e o esforço transversal aumenta ligeiramente (Branco, J., 2006).

- *Recomendações e conclusões destes estudos:*

A asna simples tradicional da construção portuguesa apresenta, essencialmente, esforços axiais e de flexão, estes últimos, originados pelo peso próprio dos seus elementos constituintes e da actuação de acções assimétricas. As pernas são os elementos mais carregados, apresentando tensões normais e de corte. O pendural está submetido à tracção, as escoras à compressão e a linha está essencialmente traccionada mas exhibe também flexão devido ao seu peso próprio. Apenas para acções assimétricas, como são exemplo a neve, o vento e o sismo, a influência da rigidez das ligações é condicionante. As ligações perna-linha são as mais condicionantes, não apenas pelos esforços que aí se concentram mas por serem zonas onde a deterioração biológica é mais frequente. A colocação das madres com excentricidade relativamente aos nós altera a distribuição de esforços na asna, em particular, nas pernas. A consideração de uma excentricidade de apenas 20 cm, um valor muito comum em várias obras inspeccionadas, é suficiente para condicionar a segurança destes elementos (pernas). A linha deve estar suspensa no pendural de forma a reduzir as suas deformações devidas ao peso próprio. Esta ligação deve ser articulada e impedir as deformações no plano ortogonal ao plano da estrutura (asna).

No caso particular da reabilitação e/ou reforço de coberturas de madeira, a dificuldade em prever o real comportamento das ligações tradicionais geralmente conduz a intervenções exageradamente do lado da segurança. Além do mais, a incompreensão do comportamento global da cobertura poderá resultar em tensões inaceitáveis nos restantes elementos em consequência de um inadequado reforço da ligação (em termos de rigidez).

As ligações tradicionais, no caso particular, a ligação linha-perna, mesmo quando não é previsto qualquer reforço, exibem uma capacidade de transmissão de momentos não desprezável. Os resultados dos ensaios experimentais mostram que essa capacidade depende do nível de tensão de compressão na perna. Contudo, parâmetros como o ângulo da ligação, a largura dos elementos ligados e o coeficiente de atrito, são condicionantes.

O reforço das ligações tradicionais, normalmente executado pela adição de elementos metálicos, é indispensável para assegurar o comportamento estável destas, em particular, nas zonas sísmicas, onde existe inversão de esforços na ligação. Todas as soluções de reforço atrás referidas, que representam versões actuais de técnicas tradicionais, conduzem ao melhoramento do comportamento da ligação (Branco, J., 2006).

Capítulo III – Levantamento, inspecção e diagnóstico

3.1. Aspectos de carácter geral

Na reabilitação de estruturas de madeira de edifícios antigos o levantamento, inspecção e diagnóstico são fundamentais e devem ser considerados em todas as situações. O levantamento deverá ser efectuado antes da elaboração do projecto e durante a intervenção propriamente dita e deverá incluir:

- a) Pesquisa arquivística exhaustiva: história do edifício;
- b) Levantamentos arqueológicos (para perceber a relação entre o edifício e o local);
- c) Levantamentos técnicos (para identificar e caracterizar os materiais e soluções construtivas existentes);
- d) Levantamentos topográficos (terreno) e fotogramétricos (fachadas e coberturas);
- e) Levantamentos arquitectónicos (plantas, cortes, alçados, e pormenores do existente);
- f) Levantamentos geotécnicos.

O diagnóstico deverá ser, como atrás se refere, realizado num contexto pluridisciplinar. Durante a intervenção, e após ser possível o acesso físico em melhores condições aos diversos locais do edifício será necessário realizar:

- i. A avaliação mais detalhada do estado de degradação dos materiais e soluções construtivas;
- ii. A comprovação do diagnóstico anteriormente efectuado após acesso aos locais anteriormente ocultos;

- iii. A repetição de alguns trabalhos anteriormente realizados em condições deficientes de modo a poder comprovar a qualidade e rigor do levantamento inicial.

A inspecção preliminar da estrutura permite obter uma ideia geral dos problemas e estabelecer um plano de inspecção detalhado, mediante o inventário das anomalias evidentes, das condições de aplicação e dos possíveis riscos, bem como a distinção sumária expedita das madeiras empregues. Uma das coisas a investigar em primeiras visitas será a existência de eventuais fontes de humidade e de todos os pontos críticos sujeitos a degradação.

Numa segunda fase, faz-se uma inspecção detalhada, que deve ser tanto quanto possível global, permitindo o acesso visual (e directo quando necessário) aos elementos de madeira. Nesta fase para além da avaliação global e sistemática do edifício, deve reunir-se toda a informação disponível sobre a idade e a história do edifício (construção, ocupações, alterações, manutenção, reparações e tratamentos), tendo em conta aspectos particulares de interesse histórico-ambiental e que ajudará a esclarecer eventuais incoerências. A alertar para possíveis situações transitórias que possam ter introduzido danos de qualquer tipo na estrutura.

A inspecção detalhada, mediante a identificação dos agentes de degradação, a avaliação da degradação ocorrida, e a identificação da espécie e qualidade da madeira. Permite estimar a resistência da estrutura e estabelecer as medidas correctivas necessárias (tratamento e reforço).

Aspectos particulares, como o eventual interesse histórico do edifício ou de parte dele, poderão impor restrições ao trabalho de prospecção e à subsequente intervenção a realizar, devendo naturalmente ser consideradas caso a caso.

A inspecção visual é o principal método de inspecção e diagnóstico para estruturas de madeira, consistindo em examinar directamente, ou a uma distância relativamente pequena, a totalidade do elemento em causa, observando e registando todos os sinais indicadores de anomalias, defeitos, ataques de degradação, auxiliada por instrumentos simples (faca do mato, formão, etc.) em zonas não directamente visíveis. Para uma inspecção visual eficaz devem melhorar-se ao máximo as condições de acesso, limpeza e iluminação e proceder à análise com base em elementos gráficos ou desenhados adequados.

- Detecção de anomalias

Depois de se realizar uma observação visual prévia, deve verificar-se atentamente a existência de manifestações ou sintomas de degradação, tais como mudanças de coloração, micélios de fungos, orifícios de saída de insectos, fendas, etc.

Alguns equipamentos não destrutivos de percussão podem complementar esta primeira observação, como por exemplo o martelo, que produzindo um som a oco indica a existência de anomalias na peça de madeira.

Podem também depois serem extraídas amostras para realização de ensaios em laboratório, tais como: resistência à compressão, tracção e flexão, medição do coeficiente de dilatação térmica, do módulo de elasticidade, densidade, índice de porosidade e o grau de humidade da madeira, etc. Outros sistemas destrutivos de punção podem ainda ser utilizados, como a furacão com uso de brocas, que permitem reconhecer deteriorações internas, pelo tipo de serrim extraído e pela força necessária ou resistente à furação.

Ainda outros sistemas não destrutivos de utilização relativamente simples podem ser utilizados de forma a aumentar o rigor da detecção, tais como: medidores de humidade, lupas, espelhos, esclerómetros, extensómetros mecânicos e eléctricos, endoscópio.

Sistemas não destrutivos mais sofisticados podem ser utilizados (como os baseados na transmissão de ultra sons, análise de vibrações, resistógrafos que permitem a avaliação das propriedades mecânicas da madeira; o *pilodyn* e a densitometria mediante os raios gama; a dendrocronologia e o método de Carbono 14, que permitem determinar a idade da madeira.

3.2. Inspeção e Diagnóstico

A inspeção e avaliação das características estruturais dos elementos *in-situ* formam uma pequena mas importante parte do processo de reabilitação da estrutura. Para aumentar a eficácia do processo de diagnóstico e inspeção das estruturas, será necessário que seja devidamente coordenada e conduzida como uma actividade pluridisciplinar a cargo de técnicos especializados.

Geralmente, o diagnóstico de um elemento de madeira pertencente a uma estrutura inclui os seguintes aspectos:

- a avaliação da qualidade da madeira (espécie lenhosa, principais características do elemento, defeitos e anomalias presentes);
- a avaliação de eventuais alterações e danos (de agentes biológicos, etc.) no elemento, depois de colocado em obra;
- a determinação da secção resistente actual;
- a determinação de características físico-mecânicas relevantes (tais como a humidade, massa volúmica e módulo de elasticidade);
- a localização das zonas atacadas e os problemas resultantes das acções a que a estrutura está, ou esteve, sujeita;
- a realização de ensaios, sobretudo com recurso a técnicas não-destrutivas.

Feito o diagnóstico, importa avaliar a extensão da zona afectada e estimar o nível de dano, no sentido de definir a estratégia de reabilitação a adoptar. É oportuno ter em linha de conta que as técnicas e ensaios que utilizam equipamentos mais ou menos sofisticados podem ser utilizadas em função de dois objectivos distintos:

- defeitos ocultos – detecção de defeitos, alterações ou danos na madeira, em partes não visíveis ou inacessíveis da estrutura, utilizando-se os equipamentos como extensão “tecnológica” dos cinco sentidos do operador;
- determinação das características físico-mecânicas – determinação não destrutiva de grandezas físico-mecânicas correlacionadas com a resistência e/ou deformabilidade do elemento em estudo, com o objectivo de atribuir um nível de prestação tão próxima da realidade quanto possível, nos casos já citados, em que a inspecção visual se revela insuficiente.

Os elementos estruturais de madeira estão integrados em estruturas geralmente complexas e submetidas a acções em serviço. Apresentam-se de seguida os critérios e os métodos que permitem avaliar a secção resistente e as principais características tecnológicas e mecânicas destes elementos estruturais. O objectivo principal é fornecer, a todos os técnicos envolvidos no projecto de reabilitação estrutural, dados técnicos de suporte e orientação para:

- a verificação da segurança estrutural;
- o projecto de eventuais soluções de conservação ou reforço.

Os campos desta avaliação podem ser aplicados tanto a edifícios comuns como a edifícios de maior valor histórico ou artístico. Estes últimos podem apresentar problemas particulares e dificuldades acrescidas, seja pela realização da própria avaliação (necessidade de não danificar o aspecto dos elementos ou de eventuais decorações), seja pelas sucessivas intervenções do passado.

A verificação da segurança dos elementos estruturais deve ser feita mediante a contabilização da secção residual (útil) dos elementos degradados, e a adopção de valores para as tensões resistentes da madeira adequados à espécie florestal em causa, à qualidade da madeira empregue (atribuída por classificação visual dos elementos individuais para avaliação de defeitos, especialmente nós e inclinação do fio e ao teor em água da madeira.

Numa abordagem rigorosa haverá ainda a considerar, não só o teor em água previsto para as condições de funcionamento futuras, mas também o teor em água da madeira durante a fase de construção ou o período subsequente de secagem até à estabilização da estrutura, nos casos em que a madeira apresenta um elevado teor em água à data do início da intervenção.

O teor em água de equilíbrio a prever será função das condições ambientais e o teor em água actual poderá ser avaliado no local de forma expedita mediante a utilização de humidímetros.

No que se refere à quantificação e caracterização da secção útil e características mecânicas do material desta, além dos critérios gerais anteriormente referidos, pode ainda recorrer-se a um conjunto de meios auxiliares de diagnóstico, para esclarecer aspectos específicos não determinados por uma observação atenta dos elementos aplicados, com base no conhecimento da espécie de madeira em causa e das suas particularidades.

3.3. Principais aspectos a verificar numa inspecção

- Acesso à estrutura

O conjunto de ensaios, a observação e o contacto físico com os elementos de madeira são sempre necessários, o que implica necessariamente ter meios de acesso à estrutura. Assim nas inspecções realizadas em estruturas de madeira são necessários meios como: escadas, plataformas elevatórias, andaimes ou outros, que devem ser sempre montados e utilizados respeitando as normas de segurança adequadas.

Correntemente, a inacessibilidade resulta não só da distância física dos elementos em estudo, mas também da presença de diversos elementos construtivos que impossibilitam ou dificultam o contacto e mesmo a visão com os elementos a examinar (como por exemplo, os topos das peças inseridas nas paredes).

- Limpeza das superfícies de madeira

A inspecção nunca poderá ser realizada com os elementos em estudo cobertos por camadas de sujidade e pó, que deverão ser previamente removidos.

No caso dos elementos com decorações importantes, esta fase deve ser devidamente programada. A limpeza, para além de permitir a remoção do material mais grosseiro, deve permitir examinar a superfície externa dos elementos, e as suas características macroscópicas, (cor, os nós, as fissuras, etc.).

- Iluminação

Deve ser utilizada iluminação artificial adequada sempre que a luz natural se revele insuficiente, o que acontece com frequência. Idealmente deverá existir um sistema de iluminação geral, acompanhada de focos de iluminação portáteis. Podem ser utilizadas lanternas convencionais,

acompanhadas do respectivo capacete de protecção, que permitem uma boa iluminação enquadrada com a zona do campo de visão do operador, deixando livres ambas as mãos.

- Elementos gráficos, topográficos e outros elementos de desenho

A situação preferencial será a existência de um levantamento geométrico prévio da estrutura, de tal modo que seja possível a concentração de todo o trabalho na observação das características qualitativas nos defeitos e nas patologias existentes nos diversos elementos de madeira em estudo.

-Projecto

É necessário que o projecto de execução da reabilitação defina no caderno de encargos e no mapa de trabalhos e quantidades a necessidade de ser efectuado um acompanhamento e levantamento contínuo das situações da obra, garantindo nomeadamente:

- a) A adequada existência de andaimes e condições de segurança;
- b) A permissão para realizar trabalhos por peritos de materiais, arqueólogos, investigadores, entre outros) ao mesmo tempo que a obra decorre;
- c) A introdução das tarefas de arqueologia (normalmente as mais demoradas) no plano geral do empreiteiro;
- d) O controlo financeiro da obra;
- e) Realização de trabalhos omissos e não previstos com “gestão aberta”, devendo o empreiteiro definir previamente uma margem de encargos e lucros a aplicar nestas situações.

-Identificação da espécie lenhosa

As características dos elementos de madeira dependem, em primeiro lugar, da espécie lenhosa a que pertencem. É assim fundamental identificar a espécie a que pertence um dado elemento, sendo frequentes os casos em que numa mesma estrutura coexistem elementos de diferentes espécies. Em alguns tipos de construções era tradicional utilizarem-se espécies lenhosas diferentes de acordo com o tipo de esforços a que vários elementos estavam sujeitos. Nas construções antigas de valor histórico era normal a utilização de madeiras Folhosas de massa volúmica elevada (Castanho, Carvalho, Olmo) nas linhas das asnas de cobertura (solicitadas fortemente à compressão transversal) enquanto as cordas e pendurais (solicitados sobretudo na direcção longitudinal) eram realizadas em madeira com menor resistência e massa volúmica (por exemplo Abeto), do que as espécies referidas anteriormente.

A identificação da espécie lenhosa é, nalguns casos, uma tarefa bastante complexa, que exige conhecimento anatómico da madeira e das técnicas de reconhecimento macroscópico e, nalguns casos, microscópico (por formação específica e/ou ensaios laboratoriais).



Figura 74 – Várias espécies lenhosas encontradas numa asna: a corda e o pilar foram executados em madeira de Carvalho, enquanto a linha foi realizada em madeira de resinosas. Realça-se a inclinação helicoidal do fio do pilar.

- Pontos críticos em coberturas

As coberturas são, em qualquer edifício, zonas sensíveis para a entrada regular de água, quer por anomalia de projecto ou execução, quer quando se descuida a manutenção. Pode-se referir também que, por princípio, qualquer cobertura plana apresenta um risco superior a uma cobertura inclinada. Uma falha de impermeabilização entre a cobertura e as paredes de fachada origina imediatamente uma situação grave de degradação (apodrecimento) dos apoios da estrutura da cobertura e, eventualmente quando exista, do forro do tecto da zona habitada. Para além disto, poderá afectar todo o edifício, dependendo da gravidade e natureza da infiltração, causando danos potencialmente severos.

Por serem zonas de difícil acesso e, nalguns casos, é mesmo praticamente impossível dado o espaço exíguo para uma inspecção adequada, recorre-se frequentemente a instrumentos auxiliares de visualização, tais como espelhos colocados em barras extensivas.

Se a concepção, execução e manutenção da construção foram as mais adequadas e não ocorrem humidades persistentes, é provável encontrar a madeira em bom estado (correspondente ao estado

da madeira seca). Nestes casos é contudo frequente detectarem-se ataques de caruncho nos elementos antigos de madeira. Já os danos de podridão poderão encontrar-se habitualmente nas zonas dos apoios sobre muros ou nas zonas de caleiras.

A deslocação das telhas pela acção do vento e a obstrução das drenagens das águas provocam frequentemente a entrada de água pela cobertura, atingindo a estrutura de madeira. Como é sabido, a presença de humidade durante um longo período de tempo propícia o desenvolvimento de processos de podridão. Normalmente, os danos desenvolvem-se inicialmente nas ligações das peças que constituem a estrutura da cobertura e também nas zonas dos apoios, pois a água percorre as vigas, pernas e peças das asnas, por gravidade, e deposita-se em cavidades e nas partes inferiores da cobertura.

As falhas de impermeabilização nas chaminés e as zonas de encontro das pendentes do telhado com as clarabóias originam a entrada de água e a eventual retenção da mesma em determinados pontos cria as condições propícias ao desenvolvimento de fungos de podridão e de outras patologias associadas.

As rufagens mal executadas ou conservadas e a obstrução das caleiras e ligações do sistema de drenagem são causas importantes dos processos de degradação. Com a degradação dos entablamentos, vai aumentando a entrada da água, encharcando os apoios das vigas e permitindo o desenvolvimento de novas patologias (principalmente de fungos de podridão).

Por último, a falta de ventilação das coberturas, assim como em geral de todas as estruturas de madeira, potencia a criação de condensações nas peças e dificulta a secagem destas. É fundamental que as estruturas de madeira das coberturas sejam bem ventiladas, caso contrário o teor de humidade dos elementos de madeira terá grande probabilidade de atingir valores propícios ao desenvolvimento de várias patologias, sendo as biológicas as mais preponderantes.

3.4. Novas tecnologias de avaliação e diagnóstico de estruturas de madeira

A inspecção, e conseqüente diagnóstico, de estruturas existentes de madeira pressupõe, desde logo, a necessidade de se proceder à avaliação do estado e condições de conservação e das características mecânicas das diversas peças estruturais, preferencialmente e sempre que possível sem ter de se recorrer à sua desmontagem. Neste sentido, o recurso à realização de ensaios *in situ* de natureza não destrutiva tem várias vantagens, nomeadamente o respeito pela integridade e lógica construtiva da estrutura existente.

Nos últimos tempos e actualmente têm vindo a ser desenvolvidos diversos métodos de inspecção de elementos estruturais de madeira que permitem avaliar as suas características mecânicas por metodologias não destrutivas, e ainda auxiliar a análise e caracterização fornecida pelas técnicas

tradicionais (como a classificação visual, utilização de martelos e lâminas metálicas, caracterização do teor de água, entre outros), nalguns casos demasiado conservadoras no que se refere à avaliação da capacidade resistente das peças.

A redução do intervalo de valores entre as técnicas tradicionais e os métodos modernos de inspecção não destrutiva, conseguida nomeadamente através de contributos de teses recentes (Botelho, 2006) permite aos projectistas e intervenientes na reabilitação de estruturas de madeira conhecer informação experimentalmente apoiada, condição essencial para se poder contrariar uma tendência inconsciente de diversos agentes da construção que, por incapacidade de análise das condições existentes, optam quase sempre por substituições ou reforços desadequados de estruturas de madeira, desprezando por desconhecimento as suas totais potencialidades estruturais.

Os ensaios não-destrutivos são de enorme utilidade no diagnóstico e na avaliação de segurança destas estruturas. Contudo, uma avaliação quantitativa baseada puramente em ensaios não-destrutivos deve ser ainda encarada com reservas.

Assim, é de realçar que a eficiência e eficácia deste tipo de ensaios podem ser aumentadas se forem usados conjuntamente ensaios laboratoriais destrutivos para estudar a variabilidade das características mecânicas dos elementos de madeira (Botelho, J., 2006).

Os ensaios não destrutivos (NDT) podem ser divididos em 2 grandes grupos: métodos globais de ensaio (GTM) e métodos locais de ensaio (LTM). Os primeiros incluem os ultra-sons e outros métodos de propagação de ondas. Os últimos são os que mais directamente auxiliam a inspecção visual, nomeadamente o *Pilodyn* e o resistógrafo.

Usualmente os LTM estão relacionados com a avaliação da secção residual resistente através da análise de variações da densidade, geralmente associadas a perdas de massa que podem estar relacionadas com degradação biológica. Outros NDT podem ser aplicados a estruturas de madeira: termografia (Tanaka, 2000; Berglind & Dillenz, 2003), ondas sónicas (Ross *et al.*, 1999; Divós, 2000), raios-X (Bucur *et al.*, 1997, Bergsten *et al.*, 2001), método dos isótopos (Madsen, 1994; Feinberg, 2005) e uso de endoscópios.

O desenvolvimento destes e outros métodos está em pleno progresso. No entanto e tendo em conta as questões de segurança, custos envolvidos, questões técnicas, etc., a sua utilização na avaliação de estruturas de madeira tem sido relativamente limitada.

A carotagem, ou extracção de carotes, tem também sido utilizada na análise dendrocronológica de estruturas e elementos de madeira, sobretudo na determinação da densidade (Bernabei, 2005; Romagnoli *et al.*, 2005). Esta técnica é também usada na determinação da resistência característica dos carotes, que é depois comparada com a de provetes *standard*. Teoricamente, a relação entre

ambas as resistências deve ser próxima da unidade, sendo que na prática se verifica que esta relação é bem menor ($\approx 70-75\%$), devido a questões relacionadas com o condicionamento e confinamento dos carotes (Botelho, J., 2006).

Os sistemas não destrutivos ou ligeiramente destrutivos mais sofisticados são descritos a seguir, de forma mais detalhada: *Resistograph* – Perfurador (perfil de densidade, detecção de "ocos" ou fendas anelares), *Pyloidin* (dureza na direcção transversal), Raios Gama (perfil de densidade), Ultra-sons – *Sylvatest/Pundit* (estimação do módulo de elasticidade a partir da velocidade de propagação da onda sonora), Vibrações (estimação do módulo de elasticidade a partir da frequência própria de vibração), Detecção acústica de insectos xilófagos, Radiografia - raios X e raios gama (identificação de degradações, vazios e elementos diversos), Dendrocronologia (determinação do tempo da idade de determinado elemento estrutural de madeira).

No quadro abaixo, apresenta-se um resumo das principais vantagens e desvantagens/limites de aplicação das principais técnicas de inspecção não destrutiva de estruturas de madeira, disponíveis no mercado (adaptado de Botelho, J., 2006).

Método:	Vantagens:	Desvantagens/Limitações:
<i>Resistograph</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidade de utilização – é apenas necessário um operador para determinados modelos e condições de inspecção; - Possibilidade de se detectarem podridões/vazios/defeitos interiores, não visíveis por inspecção visual; - Informação qualitativa de grande interesse – fornece um registo desenhado da variação da resistência à perfuração, à escala 1/1, facilmente interpretável; - Possibilidade de avaliar o estado de conservação de elementos estruturais não acessíveis. 	<ul style="list-style-type: none"> - Método que implica algum dispêndio de tempo no tratamento estatístico dos dados – a sua utilização deverá ser considerada em função da natureza e importância da intervenção a realizar; - Existem algumas limitações no fundamento do método que poderão induzir em erros, sobretudo quando se pretende deduzir valores quantitativos; - Deverá haver conhecimento das propriedades da madeira, para ser feita uma análise correcta de determinados aspectos da saída de dados, (identificação de anéis de crescimento e zonas dos lenhos inicial e final, capacidade de distinção entre medições radiais e tangenciais, identificação de defeitos, entre outros).
Ultra-sons	<ul style="list-style-type: none"> - Bom estimador do módulo de elasticidade de elementos de madeira – boas correlações deste parâmetro com o valor da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas no sentido longitudinal, quando utilizado conjuntamente com outras técnicas de inspecção (classificação visual, 	<ul style="list-style-type: none"> - Método pouco adequado para estimação do valor do módulo de rotura de estruturas de madeira, pois este pode ser muito condicionado pela existência de defeitos localizados, os quais, podem todavia ter pouco reflexo sobre o valor global da velocidade de propagação de ultra-sons no elemento ensaiado. No

	<p>o Resistograph, o raios-X, entre outros);</p> <ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de obter um perfil de variação das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade à flexão) ao longo do comprimento das peças de madeira; - Bastante útil na detecção de defeitos localizados como nós, fendas, vazios e degradações; - Grande facilidade de uso, devido ao seu pequeno porte, peso e simplicidade metodológica do ensaio; - Adequado para a inspeção de estruturas <i>in situ</i>, conforme exposto nos pontos anteriores, e por permitir ensaiar peças com apenas uma face acessível, não danificando o elemento ensaiado; - Baixo custo, comparando com outras técnicas de inspeção não destrutiva de elementos de madeira. 	<p>caso de peças limpas de defeitos, este método consegue estimar a tensão de rotura à flexão e a massa volúmica com boa precisão;</p> <ul style="list-style-type: none"> - É necessário o conhecimento da espécie e da massa volúmica do elemento ensaiado. Nos casos em que não se obtêm essas respostas <i>in situ</i>, através de inspeção visual, terá de se proceder à extracção de provetes para análise laboratorial ou aplicar intervalos de classificação retirados da bibliografia; - Implica uma metodologia de ensaio cuidada, garantindo a existência em todos os ensaios efectuados das mesmas condições de contacto entre as sondas e a madeira, pois os resultados podem ser influenciados por isso.
Georradar	<ul style="list-style-type: none"> - Informação de grande precisão; - Possibilidade de detecção de diferentes materiais, humidades e fendas em elementos (estruturas de madeira, alvenarias, pavimentos, abóbadas, entre outros); - Possibilidade de se estabelecer uma reconstrução tridimensional com as características electromagnéticas do elemento inspeccionado, obtendo resultados visuais de fácil interpretação. 	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilita conclusões assentes, sobretudo, em bases qualitativas, sendo necessário realizar mais estudos que garantam resultados numéricos, passíveis de se correlacionarem estatisticamente com outros métodos de inspeção; - Os seus resultados são bastante sensíveis a pequenas variações de humidade; - Tratamento de dados moroso e complexo – a sua utilização deverá ser considerada apenas em casos cuja importância arquitectónica o justifiquem.
Método das vibrações induzidas	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidade de utilização – em determinados modelos pode ser manejado por apenas um operador; - Obtenção de um perfil de variação longitudinal da peça, sendo possível detectar podridões, vazios e defeitos interiores, invisíveis em inspeção visual. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bastante variável com a orientação das fibras; - Nem sempre é possível aplicar em estruturas em serviço, dada a necessidade de que ambas as faces da peça estejam acessíveis. - Para medições longitudinais torna-se difícil a sua aplicação, (topos das vigas não estão acessíveis).
Medição da densidade superficial – <i>Pylodin</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Método simples para estimar o estado de conservação superficial e a secção residual de peças de madeira; - Grande facilidade de utilização. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não garante correlações significativas com a resistência mecânica das madeiras; - Apenas é capaz de caracterizar o estado superficial da peça, não sendo sensível à existência de defeitos/degradações/vazios no seu interior; - Pode ser substituído por técnicas tradicionais, em inspeção corrente.

<p>Detecção acústica de insectos xilófagos</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Possibilidade de detectar a natureza e extensão do ataque de insectos xilófagos quando este ainda não é visível no exterior do elemento atacado; - Grande utilidade na detecção das zonas atacadas e monitorização de eficácia de tratamentos realizados; - Facilidade de utilização, por simplicidade instrumental e metodologia de análise. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não é um método de avaliação da capacidade resistente da madeira, mas apenas de detecção da existência de ataques biológicos por insectos xilófagos. Da mesma forma, não fornece qualquer informação em relação à secção residual das peças.
<p>Radiografia – raios X e raios gama</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente método de avaliação qualitativa – fornece resultados de grande precisão e informação visual. Sob a forma de registos radiográficos bidimensionais, no caso dos raios-X, e registos radiográficos em tempo real, no caso da radiografia digital; - Possibilidade de detectar facilmente degradações, vazios, descontinuidades e elementos diversos no interior das peças. 	<ul style="list-style-type: none"> - Custo elevado (principalmente, a radiografia por raios-X); - As radiações utilizadas têm algum perigo para os seus utilizadores, ainda que os modelos mais recentes tenham mais garantias de segurança neste ponto; - A portabilidade dos aparelhos não é a mais adequada, quando se pretendem inspecionar estruturas de difícil acesso; - Necessária ainda mais investigação quanto aos resultados quantitativos fornecidos por este método, no que respeita à avaliação da degradação em peças.

Quadro 2 – Principais vantagens e desvantagens das principais técnicas de inspecção não destrutiva de estruturas de madeira

Analisando a lista de vantagens e desvantagens, limitações e domínios de aplicação de cada técnica em particular, verifica-se que existe alguma diversidade de escolha, por entre as inúmeras técnicas não destrutivas para a inspecção e avaliação mecânica de estruturas de madeira, cada uma com as suas características particulares e específicas.

Apesar de, na sua maioria, estas permitirem obter informações, quantitativas e principalmente qualitativas, de grande valor na avaliação de estruturas *in situ*, estas técnicas deverão ser correlacionadas entre si e complementadas por técnicas tradicionais de inspecção (classificação visual, entre outras), de modo a aumentar o grau de fiabilidade e de segurança de uma inspecção.

A necessidade deste procedimento é maior na avaliação das propriedades mecânicas das madeiras, principalmente para a estimação dos valores da resistência, pois, por si só, nenhum destes métodos é capaz de o fazer com um grau de confiança aceitável.

Neste sentido, apresenta-se, de seguida, um quadro que resume uma proposta de critérios de selecção sobre a técnica de inspecção não destrutiva a aplicar, em função do objectivo da avaliação (adaptado de Botelho, J., 2006).

Objectivo da inspecção	Técnica não destrutiva
Identificação da espécie de madeira	- <i>Inspecção visual</i> - <i>Análise laboratorial</i>
Identificação de tipo de degradação biológica	- <i>Inspecção visual</i> - <i>Detecção acústica</i>
Detecção da extensão de degradação biológica	- <i>Meios tradicionais (lâmina metálica, martelo, etc.)</i> - <i>Resistograph</i> - <i>Raios-X</i> - <i>Método das vibrações induzidas – Metriguard</i> - <i>Georradar</i> - <i>Sylvatest</i>
Classes de qualidade	- <i>Observação visual</i> - <i>Sylvatest</i> - <i>Georradar</i> - <i>Raios-X</i>
Teor em água	- <i>Humedímetro</i> - <i>Georradar (de forma indirecta)</i>
Detecção de defeitos localizados	- <i>Sylvatest</i> - <i>Resistograph</i> - <i>Raios-X</i> - <i>Método das vibrações induzidas – METRIGUARD</i>
Determinação do Módulo de Elasticidade	- <i>Sylvatest</i> - <i>Resistograph</i> - <i>Método das vibrações induzidas - METRIGUARD</i>
Determinação da massa volúmica	- <i>Resistograph</i>
Determinação da densidade superficial	- <i>Pylofin</i>
<i>Datação das madeiras</i>	- <i>Dendrocronologia</i>

Quadro 3 – Selecção da técnica não destrutiva em função do objectivo da inspecção

3.5. Metodologia de reabilitação de estruturas de madeira em edifícios antigos

3.5.1. Aspectos de carácter geral

Na reabilitação de estruturas não existe uma metodologia exclusiva, de aplicabilidade apenas específica para estruturas de madeira, ou em particular para coberturas. Na reabilitação de estruturas, a metodologia é em grande parte comum a todo o processo que antecede a intervenção. De seguida apresenta-se uma proposta de alguns aspectos fundamentais a respeitar na reabilitação de estruturas em edifícios antigos ou históricos e que incluem:

- 1- Necessidade de se tomar decisões em tempo útil, com base na contribuição dos vários especialistas envolvidos (arquitectos, engenheiros, etc.);
- 2- Estimar o custo das intervenções, com base no estado real da estrutura, na utilização de materiais e mão-de-obra previstos;
- 3- A existência de um projecto completo, reflectido e analisado, que defina um programa de intervenção claro, objectivo e coerente, que trate globalmente o edifício no âmbito da intervenção;
- 4- Assegurar a ligação dos projectistas à execução da obra, de forma a garantir os ajustamentos necessários e corrigir dúvidas e omissões do projecto devidas a falhas de diagnóstico na fase inicial;
- 5- Garantir a exaustiva documentação da intervenção, de forma a permitir no futuro uma compreensão e actuação compatível com as decisões tomadas na intervenção;
- 6- Definir um plano de manutenção para a obra em fase de utilização;
- 7- Definir um plano de monitorização de degradação dos pontos críticos do edifício (aplicável a edifícios de valor histórico ou patrimonial);
- 8- Existência de um coordenador permanente e responsável pela satisfação da metodologia.

3.5.2. Principais critérios e regras a seguir na reabilitação de estruturas de madeira

O principal critério na reabilitação estrutural, pois deverá ser o primeiro a respeitar, é a verificação e restabelecimento da segurança estrutural de pessoas e bens (estados limites últimos e de utilização).

O segundo critério a respeitar, por ordem hierárquica de importância, consiste na renovação e melhoramento da funcionalidade da estrutura considerando outros critérios não exclusivamente estruturais.

Para além destes, vale a pena salientar um conjunto de princípios e regras importantes que deverão ser seguidos na reabilitação estrutural de estruturas de madeira, nomeadamente:

- Identificar completamente a origem das anomalias;
- Quantificar (estimar) a rigidez e resistência dos elementos estruturais de madeira;
- Interpretar o funcionamento da estrutura;
- Detectar os pontos da estrutura que requeiram reforço ou substituição;
- Manter a estrutura a um nível adequado (reduzido) de esforço mecânico em todos os elementos; Usar soluções robustas e resistentes com coeficientes de segurança elevados;
- Eliminar sempre todas as causas de degradação (especialmente as provenientes da envolvente do edifício, paredes e coberturas) antes de proceder às acções específicas de restauro;
- Preservar a autenticidade (as soluções originais) do monumento;
- Reduzir ao mínimo o sacrifício de materiais originais;
- Quando necessário manter no local os elementos estruturais degradados e que já não estão em condições de assegurar funções resistentes introduzindo novos elementos para assegurar funções resistentes;
- Controlar a fluência e o desempenho em serviço (deformações, vibrações) ao mesmo nível da resistência mecânica;
- Sempre que possível, adoptar soluções técnicas reversíveis;
- Recomendar medidas que impeçam a recorrência dos problemas;
- Garantir, no futuro, uma identificação física adequada da intervenção;
- Manter, se possível, o nível actual de restrições ao deslocamento e de apoios; evitar mudar a forma como os diversos elementos se encontram em serviço em termos de tipo de esforços;
- Evitar desmontar as estruturas existentes pois a futura montagem irá colocar esses elementos em diferentes estados de tensão como resultado das novas ligações;
- Verificar o desempenho dos restantes sistemas estruturais (fundações, paredes, tirantes de aço, etc.) em relação à estabilidade e nível de degradação;
- Fazer inspecções periódicas em serviço (controlar os seguintes factores: temperatura, humidade, taxa de renovação de ar, teor de água da madeira, deformação, defeitos dos elementos estruturais);
- Após o restauro, criar condições de acessibilidade de forma a garantir o exame visual da estrutura em serviço;
- Melhorar condições serviço das peças de madeira – essencialmente ventilação permanente e limpeza regular; Garantir a ventilação adequada da estrutura e dos apoios, evitando o contacto directo da madeira com outros materiais que possam reter humidade, favoreçam as condensações ou evitem que a madeira “respire”;
- Colocar peças de madeira nas mesmas condições termo-higrométricas de uso futuro;
- Utilizar sempre que possível madeira da mesma espécie;
- Colocar elementos de madeira da mesma classe de serviço em termos ambientais;

- Não esconder elementos estruturais com materiais de acabamento que impeçam a sua visualização;
- Restauro das estruturas da fundação para a cobertura; Assegurar a estabilidade e a baixa deformabilidade dos elementos de suporte, antes de intervir nas estruturas de madeira por eles suportados.
- Restaurar inicialmente os elementos mais robustos e/ou mais degradados.

Finalmente e em síntese, vale a pena salientar que, como princípio geral, dever-se-á tentar manter o mais possível a estrutura no seu estado inicial, aquando da intervenção. Nesta situação, a reabilitação limita-se à substituição de peças irrecuperáveis (intervenção que também pode ser considerada como restauro, ou até conservação), colocadas de novo de acordo com as técnicas antigas de montagem, mas usando ligadores de madeira ou respeitando integralmente os materiais e técnicas antigas (em estruturas pouco danificadas).

Outro problema que se coloca na reabilitação tem a ver com a funcionalidade e qualidade arquitectónica dos espaços reabilitados. Nestas situações, põe-se o problema de modificar ou aumentar de volume as estruturas já existentes.

Enumeramos de seguida as principais regras neste campo:

- Respeitar o passado preservando, tanto quanto possível, os materiais existentes;
- Assimilar a necessidade de intervenção futura, respeitar as intervenções anteriores e o seu contexto;
- Deixar boas indicações físicas da intervenção (ex. parafusos de aço inox à vista);
- Não usar soluções inovadoras mas pouco conhecidas;
- Se necessário introduzir uma segunda estrutura, nunca usar a capacidade residual das estruturas antigas de madeira (essa capacidade residual assegura-lhe uma esperança de vida maior);
- Projectar um “novo edifício” junto com o “velho”, partilhar o mesmo volume sem interferência directa;
- Não disfarçar os sistemas estruturais, velho e novo, permitir a sua fácil identificação;
- Usar sempre que possível sistemas de construção desmontáveis, pré-fabricadas, evitando o uso da água; utilizar sempre ligações reversíveis.

3.5.3. Grau de degradação dos elementos

A análise do grau de degradação do madeiramento conduzirá a uma das seguintes conclusões:

- O ataque é ligeiro, com ou sem presença do agente de degradação, e sem diminuição significativa da resistência mecânica, neste caso é necessário sustentar o ataque e impedir a sua renovação, aplicando produtos tóxicos;
- O material apresenta um grau de ataque em que se verifica já uma perda apreciável da sua capacidade resistente, impondo-se o reforço ou a substituição das peças atacadas, neste caso o reforço de uma dada peça resistente é feito normalmente por aplicação de empalmes ligados ao elemento a reforçar por pregos ou parafusos. A parte da madeira deteriorada de um elemento de uma estrutura pode ser reparada substituindo-a por um troço de madeira sã, fazendo-se a ligação por meio de forras também de madeira ou chapa metálica, aparafusadas nas faces e abrangendo as duas partes velhas ao novo elemento.

Embora seja prudente desprezar completamente a contribuição da madeira afectada, em termos de resistência mecânica, o que implica a necessidade da sua substituição ou reforço dos elementos afectados, os problemas são frequentemente circunscritos no edifício e a eliminação definitiva das fontes de humedificação (quando tal é possível) poderá ser suficiente para promover a secagem da madeira e a certa altura sustentar a progressão do ataque pelos fungos.

Deve ainda ter-se em conta que a secagem de grandes secções de madeira, tal como das alvenarias envolventes, poderá ser lenta, permitindo a progressão do apodrecimento durante mais algum tempo após a resolução das deficiências da construção que estiveram na sua origem. Há também, situações particulares em que não é possível garantir com segurança a eliminação completa e definitiva das fontes de humedificação. Nestes casos é essencial adoptar medidas correctivas específicas, que passam pela limpeza e pelo tratamento preservador curativo e preventivo da madeira.

3.5.4. Esquemas de apoio à decisão sobre a reabilitação de estruturas de coberturas

Em reabilitação, uma das primeiras decisões a tomar é a de saber até que ponto se deve manter a estrutura existente. A decisão de proceder à reabilitação de construções existentes, em alternativa à substituição por estruturas totalmente novas, é frequentemente ditada por razões económicas. Em outras circunstâncias, todavia, é a necessidade de preservar o património histórico ou cultural que impõe a recuperação da construção degradada, situação que geralmente determina o tipo de intervenção a realizar.

A esmagadora maioria dos edifícios antigos têm coberturas em madeira, pelo facto desta ser uma matéria-prima historicamente abundante no nosso país, resistente, fácil de trabalhar e por conseguir

vencer vãos elevados sem grandes dificuldades, comparativamente com outros materiais disponíveis na época.

A manutenção da estrutura é a actuação lógica naquelas estruturas nas quais os elementos resistentes de madeira não se encontram fortemente deteriorados nem deformados e podem seguir cumprindo a sua função estrutural sem alterar a secção; trata-se de manter os elementos estruturais tal como estão sem os modificar, nem eliminar. É ainda habitual encontrarem-se estruturas de madeira para reabilitar em que uma parte dela se mantém, uma outra parte se substitui e outra parte se reforça ou consolida.

Para uma correcta actuação sobre uma estrutura deteriorada, devem-se ter em conta os critérios descritos anteriormente, primeiramente, o conhecimento mecânico do estado da estrutura, e em segundo lugar, o conhecimento das técnicas que podem ser aplicáveis na reparação das anomalias verificadas e elementos degradados. O conhecimento das técnicas de reparação é fundamental na hora de tomar decisões em reabilitação.

Num caso concreto de reabilitação de uma cobertura em madeira de um edifício antigo, tipicamente, quatro situações específicas podem ocorrer (Amorim Faria, J., 2002):

- a) Reparação e substituição pontual de elementos degradados usando técnicas tradicionais;
- b) Reparação e substituição pontual de elementos degradados usando as técnicas tradicionais e materiais de ligação modernos;
- c) Substituição integral da estrutura usando madeiras antigas, materiais e técnicas de ligação modernas e desenhos arquitectónicos similares aos antigos;
- d) Substituição integral da estrutura por soluções modernas ao nível da concepção, madeiras, materiais e técnicas de ligação usadas.

De uma forma simplista e rápida poderia dizer-se que a melhor solução será a que corresponde às situações a) ou b). De entre estas será usualmente preferível a b) já que assegura um melhor desempenho. Na medida do possível, devem utilizar-se materiais que assegurem uma durabilidade mais elevada.

Os mais graves erros 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 rapidamente aos apoios das peças. Numa intervenção correcta deve-se garantir a adequada ventilação e protecção contra térmitas dos novos frechais.

Quando temos a degradação dos apoios e topos da estrutura das coberturas, situação muito frequente, é aconselhável utilizar próteses metálicas. No que diz respeito às próteses de apoio, a solução a adoptar será influenciada pela dimensão do ataque. 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, no caso de degradações mais extensas.

Não existem regras universais que indiquem qual é a melhor solução para cada caso particular. Em todas as situações é necessária a remoção das telhas, das ripas, dos forros e guarda-pós, de modo a colocar a estrutura à vista tanto por baixo como por cima.

A utilização de elementos metálicos na reabilitação de estruturas de madeira pode ser vista sob duas perspectivas: acrescentar aos elementos estruturais de madeira perfis metálicos de reforço da sua capacidade resistente, ou eliminar completamente os elementos de madeira deteriorados e substituí-los por elementos metálicos resistentes.

Este é um campo onde os avanços se estão a produzir muita rapidez, e onde se concentram esforços de investigação. O reforço ou reparação consiste em devolver a capacidade portante necessária ao elemento de madeira danificado para que volte a cumprir a sua função.

A substituição de elementos estruturais de madeira por elementos de madeira é a solução *a priori* mais lógica e normalmente mais simples (atendendo às consequências). Elimina-se a peça deteriorada e coloca-se no seu lugar outra da mesma secção e de mesmas características. Se o novo uso do edifício e as cargas que este uso implica não aumentam, e o problema do elemento não residia na sua secção, a peça nova deverá ter a mesma secção que a antiga. Se as cargas aumentam ou o elemento danificado não estava correctamente dimensionado para a sua função, haverá que aumentar a secção na medida em que o cálculo o indique. Esta solução é relativamente económica sobretudo em elementos estruturais simples.

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

Deve-se promover uma cultura de reutilização de madeiras antigas, por um lado, por uma questão económica e ecológica, e por outro lado, dado tratar-se de um acto puro de gestão, sabendo que uma peça de estrutura de madeira antiga é um material de elevado valor, devendo ser cuidadosamente reunida e guardada para futuras aplicações.

Peças degradadas nos extremos podem ser aproveitadas para realizar peças de menores dimensões. Deve-se salientar que uma peça estrutural de madeira antiga de uma espécie durável é um material estrutural de elevado valor devendo ser sempre cuidadosamente reunido e guardado para futuras utilizações. Por exemplo uma viga de 7 m de comprimento com 0,5 m de partes degradadas em cada lado permite realizar uma viga de 6m de comprimento em óptimas condições, cortando dos dois lados os topos degradados. A geometria de uma estrutura não é necessariamente coincidente com a estrutura original, devendo na medida do possível, seguir-se o traço original de modo a poder manter a memória do edifício.

A substituição integral por uma nova estrutura moderna é uma solução limite, a adoptar apenas em situações extremas na ausência de materiais antigos ou em casos onde os projectistas 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 hipótese definida anteriormente. 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.

Capítulo IV – Tipificação dos problemas

4.1. Introdução e generalidades

As anomalias em elementos e estruturas de madeira traduzem-se genericamente em deformações excessivas e várias deteriorações. As deformações excessivas podem ser atribuídas a deficiências de projecto e de execução, ao desconhecimento das características de resistência e deformabilidade da madeira, à aplicação de cargas excessivas não previstas e ao efeito de fluência, associado ao envelhecimento da madeira. A deterioração da madeira pode ser causada por falta de protecção ou protecção insuficiente dos elementos de madeira contra os agentes agressivos, sobretudo contra a humidade. A humidade da madeira e a temperatura influenciam o desenvolvimento e o crescimento de xilófagos, bem como a consequente degradação biológica da madeira. Após o diagnóstico e a análise das anomalias e das causas que lhes deram origem, é necessário escolher a técnica de intervenção mais adequada para proceder à reparação dos elementos em madeira. Para esse efeito, é necessário conhecer os materiais e as técnicas disponíveis para intervir neste tipo de estruturas.

Neste capítulo apresentam-se, sistematizados, os principais problemas que um técnico poderá encontrar num processo corrente de inspecção e diagnóstico.

As anomalias podem-se dividir entre as relacionadas com os materiais e as relativas às estruturas. Quanto às primeiras, podem depois distinguir-se entre as anomalias de origem, (os defeitos, tais como a existência de nós, desvio da inclinação do fio em relação ao eixo da peça, fendas, empenos, etc. - ponto 4.2) e as perdas de integridade das peças, estas resultantes dos ataques de origem biológica e ambientais (ponto 4.3).

Quanto às relativas às estruturas, as principais anomalias estruturais são descritas no ponto 4.4.

Este capítulo pretende assim funcionar como uma “check-list” dos referidos problemas potenciais.

Como já vimos, existe uma grande diversidade de factores que contribuem para a dificuldade de avaliação das características mecânicas dos elementos constituintes das estruturas em madeira.

Por exemplo, tentemos diagnosticar a origem da existência de uma rotura por fissuração de toda a secção num pendural da asna. Em princípio, a ligação metálica à linha, o encastramento superior na perna e as pregagens constituem os pontos mais débeis desta estrutura. Uma causa possível é a exposição desta estrutura a fortes carregamentos dinâmicos, tais como os resultantes da elevação de pesos ou a sujeição a assentamentos diferenciais, que poderão ter originado alterações ao funcionamento previsto dos nós da estrutura, mas não é muito credível que fosse suficiente para a rotura do pendural. Uma questão que se pode colocar é a de o pendural poder já ter sido colocado em serviço estando fissurado. Uma justificação seria a da rotura do tronco no momento do abate da árvore. Deste modo, a origem da rotura verificada seria consequência de um defeito das características mecânicas originais da madeira.

4.1.1. Pontos mais sensíveis das estruturas de madeira

A degradação de uma qualquer peça de madeira começa pela parte mais facilmente atacável, ou seja, por uma zona mais frágil face ao ataque ou deterioração.

Esta zona usualmente corresponde ao borne que se encontra numa zona externa da secção da peça. Nas estruturas de coberturas os cumes são zonas de difícil acesso e de potencial degradação. Numa peça de madeira, a superfície de maior risco é o plano de corte transversal à direcção das fibras, por apresentar uma grande porosidade e uma capacidade de absorção de água muito superior a qualquer outro plano de corte da peça. Em consequência, a maior retenção de humidade facilita o desenvolvimento de agentes biológicos, nomeadamente de fungos xilófagos (de podridão).

Assim, salientam-se de seguida os pontos mais sensíveis e críticos em análises a peças de madeira:

- Topos de peças (vigas, linhas e pernas de asnas) apoiadas em/dentro de paredes;
- Topos de peças que coincidem com uma zona de risco elevado (junto a fachadas, remates de cobertura, zonas de lavagens, com condensações, ou pouco ventiladas);
- Topos das peças expostas às intempéries;
- Samblagens de peças – as uniões entre peças são zonas de fácil retenção de água. Frequentemente as uniões têm rebaixos e encaixes onde se acumula água, o que consequentemente facilita o início da degradação;
- Extremo inferior dos suportes verticais: na zona de arranque de alvenarias que servem de base a pilares ou em pilares isolados no exterior. A humidade do solo pode atingir a base de pilar se esta não se encontrar devidamente isolada. No caso de pilares expostos à chuva, a água escorre pelas

faces do pilar e vai depositar-se na base, no caso de esta não facilitar a evacuação da água, esta favorece o início da degradação.

4.1.2. Principais causas da degradação

Em relação às deficiências construtivas destacam-se, desde já, as mais frequentes:

- Deformações relacionadas com a colocação de madeira verde em obra, ou com a existência de fenómenos cíclicos de humidade e secagem, ou ainda por inércia insuficiente;
- Infiltrações pela cobertura, por deficiente ou inexistente manutenção da mesma, por impermeabilizações mal realizadas, por quebra ou deslocação de telhas pela acção do vento, devida à obstrução das canalizações ou deficiente funcionamento de sistema drenagem de águas;
- Falta de ventilação das coberturas poderá originar degradações por podridão, consequência das condensações;
- Fungos de podridão em zonas húmidas, devido à existência de condensações e capilaridade;
- Deficiências de nivelamento dos elementos (paredes), onde são feitas as entregas das vigas.
- Deficiente utilização estrutural, supressão de apoios, deficiente concepção estrutural, erros nas ligações, materiais mal escolhidos; deficiente contraventamento das estruturas;
- Deficiente protecção contra o sol e a chuva.

4.2. Defeitos principais das peças estruturais em madeira – Anomalias de origem

Entre os factores que afectam a qualidade e os valores das propriedades físicas e mecânicas da madeira estão:

- a própria natureza heterogénea do material;
- a presença de defeitos e anomalias das peças originalmente montadas;
- as condições em serviço dos elementos em madeira (por exemplo, a fissuração por efeito de secagem da madeira tem repercussões diferentes num elemento colocado horizontalmente ou verticalmente).

Os principais defeitos a considerar são, em geral, os seguintes:

- Nós;
- Desvio da indicação do fio em relação ao eixo da peça;
- Fendas;
- Empenos;
- Taxa de crescimento irregular (velocidade de crescimento);

- Descaio;
- Bolsas de resina;
- Presença de medula e entrecasco;
- Madeira juvenil;
- Madeira de reacção;
- Deficiências no material lenhoso devidas a ataques de insectos e fungos.

A qualidade de uma peça de madeira é medida pelas características médias do lenho e pelo tipo, quantidade e distribuição de defeitos que apresenta. De seguida apresenta-se um conjunto de definições que resumem as características dos defeitos mais significativos, em conformidade com o disposto na norma NP180 e especificação E31 do LNEC, tendo em vista a utilização em construção.

- Defeito – qualquer anomalia da estrutura do lenho ou resultado de ataque de agentes vivos (animais ou plantas) ou imperfeição de laboração que possa determinar a diminuição do valor comercial de uma peça de madeira.
- Nós – defeitos associados ao processo de formação lenhosa, apresentando-se como secções simples da massa lenhosa que constituíam a porção base de um ramo inserida no tronco da árvore. Essa massa, de forma sensivelmente cónica, orienta-se na direcção da medula e tem nela, ou próximo dela, o seu vértice. A forma do nó numa peça de madeira é função da orientação do plano de corte da madeira relativamente ao ramo. O carácter depreciativo dos nós depende do tipo de utilização estrutural ou outro. A influência dos nós na resistência mecânica da madeira deriva do facto deles corresponderem a material inserido numa peça, cujas fibras são aproximadamente perpendiculares a direcção geral das fibras da peça. Dada a forte anisotropia da madeira, traduzida por uma resistência a tracção na direcção perpendicular as fibras, cerca de 30 vezes menor que na direcção paralela, facilmente se compreende que, independentemente de se tratar de nós ou grupos de nós aderentes, ou buracos de nós, é desprezável a contribuição da parte da secção transversal correspondente. Por esta razão, para utilizações estruturais, os limites impostos aos nós, ou grupos de nós, são estabelecidos em termos da percentagem de secção transversal da peça que eles ocupam, designada vulgarmente por KAR (*Knot Area Ratio*).



Figura 75 – Nó da madeira [Tampone, 2005]

A existência de nós implica o desvio localizado das fibras longitudinais que ficam sujeitas a solicitações diagonais, situação em que a madeira possui menor resistência. Este defeito é o

mais condicionante da resistência global da peça, sendo que não é tão gravoso sobre o valor do módulo de elasticidade em flexão.

- Desvio de inclinação do fio (Fio inclinado, fio diagonal ou fio torcido) – este defeito traduz-se numa inclinação mais ou menos acentuada do fio (direcção geral das fibras) relativamente ao eixo longitudinal das peças. Pode resultar de um mau processo de corte, serragem oblíqua das peças, ou da utilização de elementos de madeira cuja natureza morfológica possuía estas características ou anomalias de crescimento (por exemplo, o corte de troncos curvos com o fio torcido ou deformados). As suas consequências prendem-se com a anisotropia do material, por se afastar da situação ideal da aplicação dos esforços paralelamente ao fio da madeira. O desvio de fibras torna a peça difícil de trabalhar e, face a pequenas alterações de humidade, provoca fendas e empenos dadas as elevadas tensões internas que se instalam em madeira com estas características.
- Fendas – introduzem descontinuidade no material lenhoso e são o resultado das elevadas tensões instaladas pela contracção diferencial da madeira das zonas periféricas e interiores do lenho, que induzem esforços de tracção transversal que, por sua vez, tendem a romper a madeira segundo planos radiais. Produzem uma redução da secção útil resistente de peça e podem ser muito gravosas se forem repassadas, ou seja, se ligarem faces opostas das peças de madeira, assim como se estiverem localizadas em zonas de união entre peças ou em elementos sujeitos a compressão axial. As fendas não são sempre resultado de uma patologia estrutural, sendo que, dentro de determinados limites dimensionais estabelecidos nas normas de classificação visual, têm pouca influência na resistência da peça. Os seus efeitos na resistência da madeira dependem do tipo de esforço considerado, da sua localização, comprimento e profundidade, bem como da eventual associação com outros defeitos, como nós ou fio inclinado. As fendas de secagem desenvolvem-se no sentido das fibras da madeira partindo da periferia do tronco para a medula. Embora haja madeiras com maior propensão para fender que outras o seu desenvolvimento é potenciado por processos de secagem bruscos, com elevados gradientes de teor em água na secção transversal das peças, sendo um defeito de laboração. As fendas anelares resultam do descolamento entre camadas de crescimento consecutivas, tendo um desenvolvimento circular. Podem ocorrer em árvores sujeitas durante o crescimento a flexões frequentes e excessivas, nomeadamente por acção de ventos intensos, ou ainda por efeito da congelação.



Figura 76 – Exemplo de uma fenda longitudinal (Rodrigues, R., 2004)

- Empenos – são alterações na forma da peça relativamente a uma forma plana perfeita. Podem ser em arco de face, em arco de canto, em hélice e em meia-cana.
- Taxa de crescimento – indica e é avaliada pela largura média, em milímetros, dos anéis de crescimento anuais. Uma largura muito irregular dos anéis constitui um defeito de pequena importância. Não sendo um defeito, trata-se de um importante parâmetro de avaliação das madeiras de Resinosas. O seu interesse deriva de reflectir, de forma indirecta, a densidade da madeira, que por sua vez condiciona directamente a resistência e o módulo de elasticidade da madeira, mas que é mais difícil de estimar de modo expedito.
- Descaio – é um defeito de laboração que se traduz na falta de madeira numa ou mais arestas das peças, afectando-as parcial ou totalmente ao longo do seu comprimento. O descaio reflecte o remanescente da superfície do toro na peça de madeira, sendo um defeito de laboração. Implica sobretudo dificuldades de ligação apoio ou colagem já que a perda de resistência devida à redução de secção transversal é geralmente desprezável.
- Bolsas de resina – integram o material lenhoso e são em geral da pequena dimensão.
- Presença de medula ou entrecasco – as peças estruturais de madeira não devem ter presença da medula ou de entrecasco, que constituem um ponto fraco para a resistência mecânica da peça.
- Madeira juvenil – refere-se à existência de madeira menos resistente e estrutura anatómica mais débil nos primeiros anéis de crescimento de madeiras de resinosas.
- Madeira de reacção – consiste na presença de porções de material lenhoso torcido ou de forma irregular resultante de uma acção externa muito forte (vento, tronco torcido, árvore não ventilada, etc.) actuante sobre o tronco da árvore viva.

Um defeito que correntemente contribui para a menor resistência das peças é o desvio das fibras, provocando sempre uma fissuração de secagem mais ou menos inclinada.

Um nó situado numa zona traccionada muito facilmente pode dar origem a concentração de tensões, devido a possíveis desvios das fibras locais. O mesmo nó, numa zona comprimida, pode não causar qualquer dano.

Das madeiras existentes no mercado português as mais recomendáveis para a execução de estruturas, em especial de cobertura, são o pinho silvestre e o *pinus caríbea*. Das madeiras nacionais, o pinho bravo pode ser utilizado. Todas as peças devem ser de quina viva, galgadas e esquadriadas, para que as murtagens resultem perfeitas. Quando as asnas tenham de ficar à vista, é conveniente aplainar a madeira, usando-se também neste caso chanfrar as arestas nos comprimentos entre samblagens.

4.3. Patologias e anomalias mais frequentes que levam a perdas de integridade das peças

As construções degradam-se ao longo do tempo, em virtude das acções mecânicas que actuam sobre a estrutura e das acções físicas, químicas e biológicas que actuam sobre os materiais.

No caso de estruturas ou elementos de madeira que apresentem patologias, a identificação dos problemas, a avaliação da sua gravidade e a definição da metodologia a seguir para a reabilitação e/ou reforço dos elementos afectados pode revelar alguma especificidade, face à natureza deste material, localização dos elementos nas estruturas, função estrutural, etc.

As estruturas de madeira têm especificidades próprias que resultam da sua matéria-prima ser de origem vegetal, possuindo um processo de degradação diferente do previsto para as estruturas executadas com base em materiais de origem mineral. As principais causas da degradação das madeiras são assim as seguintes:

1. Degradação biológica, por efeito de fungos, insectos, moluscos e crustáceos (estes últimos em ambiente marítimo);
2. Envelhecimento resultante da acção termo – higrométrica, (a madeira é um material com comportamento mecânico anisotrópico e varia de dimensões, de propriedades físicas, químicas e mecânicas, em função do teor em água que, por sua vez, varia com a humidade absoluta do ambiente que a envolve);
3. Utilização estrutural inadequada sob diversos prismas que se reflecte em erros de projecto e/ou execução ao nível das ligações e apoios bem como no subdimensionamento face às sobrecargas a que as estruturas têm de resistir.

A humidade não constitui isoladamente, por si própria, um factor de degradação das estruturas de madeiras. A permanência descuidada e por um certo período de tempo das estruturas de madeira em ambientes húmidos e de deficiente ventilação, é que propicia as condições ideais de vida aos agentes biológicos da sua degradação, sendo estes os principais responsáveis pela degradação da madeira.

A interpretação correcta dos sinais apresentados por uma estrutura de madeira deve ser feita no contexto das propriedades deste material, de forma a distinguir os efeitos reversíveis dos irreversíveis, e aqueles de exclusiva importância estética dos que podem indicar degradação efectiva da segurança da construção.

Seguidamente faz-se uma descrição resumida das diversas patologias e anomalias que afectam correntemente as estruturas de madeira.

4.3.1. Descrição das principais patologias e anomalias que levam a perdas de integridade

Os danos que podemos encontrar numa estrutura de madeira podem ter três origens: os danos de origem biológica, relacionados com os organismos xilófagos; os danos de origem ambiental, onde se incluem as consequências da exposição às intempéries e ao fogo; e os danos de origem estrutural.

Frequentemente os problemas estruturais têm como origem erros de cálculo e de construção, não se relacionando com a presença de organismos xilófagos. Todavia muitas vezes os danos produzidos por estes provocam também problemas mecânicos que podem afectar a segurança estrutural.

Alguns indícios de potenciais patologias ou, pelo menos, do mau funcionamento da construção/estrutura e da sua eventual susceptibilidade para o desenvolvimento de diversas anomalias, devem ser tidos em conta em qualquer inspecção e diagnóstico de edifícios antigos e estruturas de madeira. Como exemplos simples e claros temos os seguintes: detecção de canais de terra, existência de serrim, cheiro a mofo, manchas na madeira, deformação excessiva de tectos e pavimentos (ou de outros elementos não estruturais como portas e telhados), entre outros.

Normalmente a presença de defeitos naturais e também de danos da madeira é revelada através de uma observação cuidada da superfície dos elementos e, quando necessário, com o auxílio de uma lâmina afiada. A superfície dos elementos deve estar limpa e, sempre que possível, lisa, para que se possa realizar a identificação de características como a inclinação do fio, a alteração cromática das superfícies devido ao ataque de fungos, a variação de cor entre cerne e borne, as galerias de insectos, etc.



(a)



(b)

Figura 77 – (a) linha com fenda de secagem extensa e que indica a direcção inclinada do fio, e (b) exemplo de apoio bem executado e com boa ventilação de todas as faces dos elementos.

- PATOLOGIAS DE ORIGEM BIOLÓGICA

As patologias de origem biológica são, em geral, a causa mais frequente de degradação da madeira. Segue-se neste capítulo a apresentação dos diferentes tipos de organismos xilófagos.

O ataque por agentes biológicos é uma das mais correntes patologias e que mais graves danos produz nas estruturas de madeira.

Os grandes grupos em que podemos resumidamente classificar os organismos xilófagos são os seguintes:

- Fungos xilófagos;
- Insectos xilófagos;
- Xilófagos marinhos.

Destes os que se aplicam a coberturas interiores são os fungos e os insectos xilófagos.

-Fungos xilófagos

A madeira, não obstante o grau de resistência natural que possui à infecção por agentes xilófagos, pode, em determinadas circunstâncias, ser degradada ou mesmo destruída pela acção de fungos.

A presença de fungos é detectável pela cor anormal da madeira em determinadas zonas, a sua manifestação à superfície aparece sobre forma de *micelias*. Frequentemente a degradação do material está associada à presença dos insectos xilófagos que normalmente acompanham os fungos.



Figura 78 – Aspecto de degradação por fungos de podridão de um rodapé

A contaminação por peças já atacadas ou a germinação de esporos na madeira húmida, transportados pelo vento, nas ferramentas de corte, através da picada de insectos, são a origem do ataque dos fungos, que se desenvolverá dependendo das condições de humidade e temperatura do ambiente em que a madeira é aplicada.

Uma humidade baixa não permitirá a sua progressão, esta só se dará com um teor em água da madeira de valores normalmente superiores a 21%.

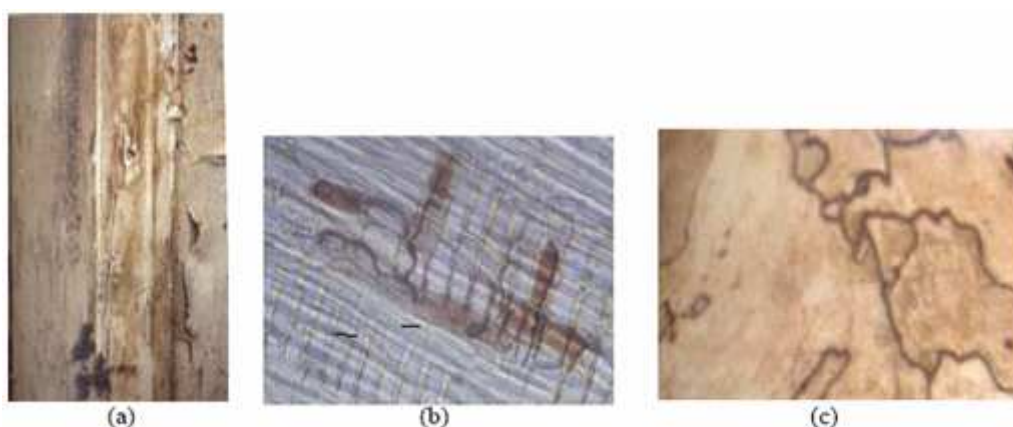
Desta forma, os madeiramentos das construções não expostos aos agentes atmosféricos (nomeadamente vigamentos, soalhos e estruturas de cobertura) não se encontram normalmente em situação de poderem vir a ser atacados por fungos, a menos que se verifique o contacto com outros elementos da construção que recebam água por capilaridade. Quanto aos elementos situados ao ar livre (varandas, janelas e portas exteriores), é mais corrente atingirem condições bastante mais favoráveis ao desenvolvimento dos fungos.

Dentro dos fungos xilófagos podem diferenciar-se dois grandes grupos em função do tipo de degradação que produzem, o dos bolores e fungos cromogéneos, e o dos fungos de podridão.

Os ataques provocados por fungos cromogéneos e bolores são superficiais e não produzem degradações na parede celular, não tendo grandes consequências para a resistência e propriedades mecânicas da madeira. O seu efeito é apenas um ligeiro aumento da sua permeabilidade e a coloração da superfície atacada, por isto os fungos cromogéneos e os bolores não são considerados como verdadeiros organismos xilófagos.

Uma vez que apenas alteram a superfície da madeira, são facilmente removidos por limpezas superficiais. Os bolores são detectados pela presença de uma superfície com uma aparência de algodão transparente ou com tonalidades entre o branco e o preto.

Os bolores e os fungos cromogéneos não apresentam um perigo significativo (embora possuam uma acção de degradação mecânica insignificante e aumentam a higroscopicidade potenciando assim o desenvolvimento de fungos de podridão) para a madeira para além da inconveniente alteração estética. São facilmente eliminados por meio de um pano ou acção mecânica, mas devem ser tidos em conta, pois são o sinal de que estão criadas as condições necessárias para o desenvolvimento de ataques de outros agentes biológicos nomeadamente dos fungos de podridão.



– Exemplo de um bolor (a), hifas do fungo cromogéneo, *Ceratostomella picea* Munch na madeira de pinho (b), e pasmo da madeira de faia (c)

Figura 79 – Exemplos de degradação por bolores e fungos cromogéneos



Figuras 80 e 81 – À esquerda, degradação provocada por bolores. À direita, degradação provocada por fungos cromogéneos [Arriaga, 2002]

Os fungos de podridão, encontrando condições adequadas para o seu desenvolvimento, podem produzir graves danos nos elementos de madeira.

Os fungos de podridão desenvolvem-se, regra geral, em madeira com teor em água superior a 20% não saturada, estando o limite máximo tolerado de teor em água relacionado com as necessidades de oxigénio livre de cada um dos fungos em causa.

Os sintomas deste fungo são a diminuição da resistência, a desintegração da madeira, o som a oco, a descoloração (cinzenta ou branca), e o odor a mofo.

Uma vez que o desenvolvimento de fungos está muito dependente da humidade, normalmente o apodrecimento da madeira ocorre somente em zonas localizadas, pontos sensíveis da construção, nomeadamente nas entregas de vigamentos nas paredes exteriores, junto de canalizações ou sob pontos singulares das coberturas, em zonas de apoio, nos ensambles, nos nós de ligação das estruturas da cobertura, em ladrilhos, rebocos ou argamassas antigas que perdem a sua alcalinidade, podendo afectar a madeira que esteja próxima.

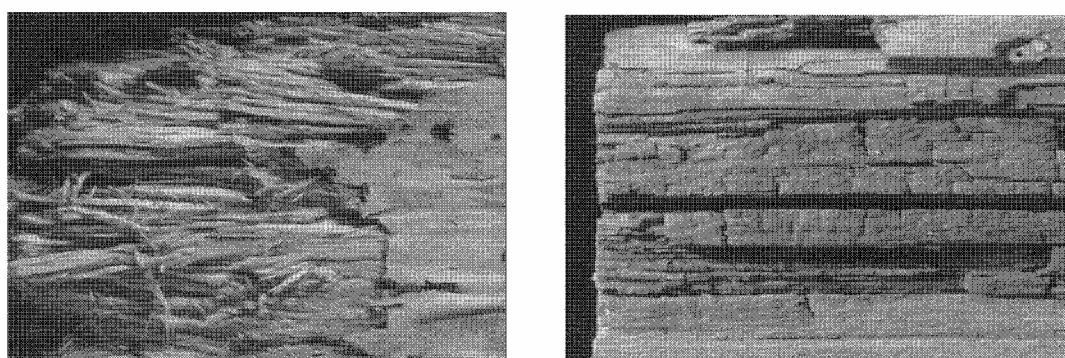
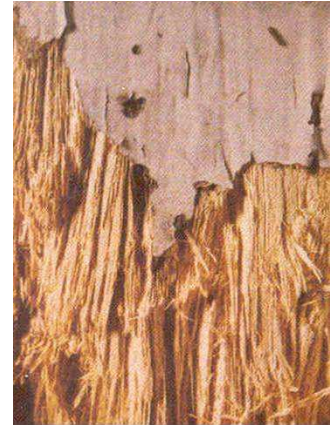


Figura 82 – Aspecto de madeira atacada por fungos de podridão [Arriaga, 2002]

Existem várias classificações relativamente ao tipo de podridão existente, sendo que vulgarmente se classificam nos seguintes tipos, em função da cor e aspecto que apresenta a madeira atacada (Arriaga, 2002):

- Podridão parda ou cúbica;
- Podridão branca ou fibrosa;
- Podridão branda.

Os fungos da podridão acinzentada ou cúbica são os mais perigosos.



Figuras 83 – À esquerda, exemplo de podridão parda. À direita, exemplo de podridão branca ou fibrosa. [Arriaga, 2002]

- Insectos xilófagos

Os insectos xilófagos caracterizam-se por (à excepção da classe dos Isópteros) iniciarem a infestação por uma operação de postura vulnerável, não só por ser cobijada por outros animais que a parasitam ou dela se alimentam, como também pelo facto dos ovos serem frágeis e estarem desprotegidos face a acções mecânicas, e principalmente, por necessitarem para a sua eclosão e desenvolvimento de condições ambientais favoráveis (determinadas temperaturas e variações térmicas ao longo do ano, humidade, iluminação reduzida e má ventilação).

Os principais grupos de insectos xilófagos são os insectos de ciclo larvar (classe dos coleópteros) e os insectos sociais (classe dos isópteros). A fase inicial ou ingestão é idêntica em todos os insectos, consistindo na abertura de galerias na madeira por destruição mecânica e, simultaneamente, ingerindo o material lenhoso.



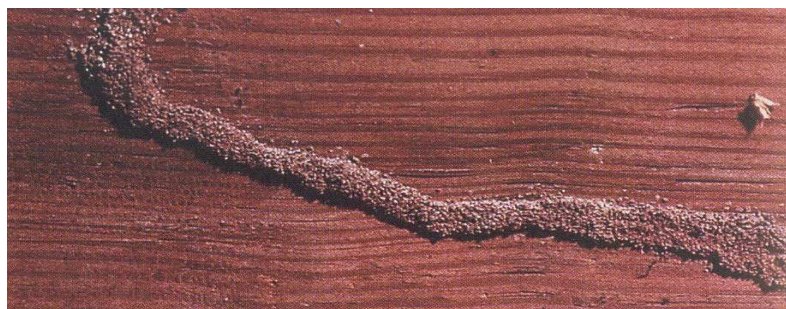
Figura 84 – Exemplo de peça atacada por insectos xilófagos

Os insectos sociais, generalizadamente conhecidos por térmitas, são insectos da ordem Isóptera, que vivem de acordo com uma organização social avançada, em comunidades organizadas e hierarquicamente representadas, as colónias, em que cada indivíduo e grupo desempenha funções específicas com vista ao desenvolvimento da comunidade. São incapazes de viver isoladamente.



Figura 85 – Aspecto da madeira degradada pela térmita *Reticulitermes lucifugus Rossi*

Todas as madeiras nacionais usadas na construção, em especial o pinho, são susceptíveis ao ataque por térmitas. Já quanto às espécies florestais importadas, em particular as tropicais, o cerne apresenta, nalguns casos, resistência ao ataque por térmitas.



Figuras 86 – Exemplo de galeria exterior fabricada pelas térmitas para circulação [Liotta, 2000]

Os danos por esta espécie são muito característicos, deixando nas galerias verdadeiras tiras de madeira, o que se revela muito característico do seu ataque. A explicação para esta situação é que se alimentam de madeira branda da Primavera, e deste modo deixam intacta a madeira mais dura formada no Verão. Geralmente encontram-se em madeiras estruturais de cobertura ou nos pisos inferiores em contacto com o solo.

Normalmente levam vários anos para provocar danos perigosos num edifício, mas a degradação que produzem nas estruturas de madeira é bastante grave e perigosa, principalmente porque, frequentemente só são detectadas num estado avançado, quando se verificam deformações excessivas, fendilhações de revestimentos ou mesmo a rotura do elemento estrutural.

- PATOLOGIAS DEVIDAS À EXPOSIÇÃO AO AMBIENTE

Os principais agentes de degradação abiótica e ambiental da madeira são os agentes atmosféricos (o sol a chuva), as acções mecânicas (como o desgaste), os agentes químicos e o fogo. Estes têm influência nas propriedades mecânicas, logo podem influenciar e ser detectados nos resultados da avaliação com recurso a métodos de inspecção não destrutivos.

Uma parte das patologias de carácter abiótico devem-se a uma deficiente concepção e/ou utilização das estruturas. É frequente executarem-se alterações nas estruturas tais como: aberturas, cortar apoios de vigas, aumentar as sobrecargas de utilização, suprimir apoios verticais, aumentar o vão de peças, ou mudar as condições termo-higrométricas de serviço facilitando condensações ou entradas de água líquida devido a alterações arquitectónicas ou falta de manutenção, entre outras.

As anomalias das estruturas de cobertura devidas à exposição aos elementos atmosféricos, sol, chuva e vento, estão directamente relacionadas com uma inconveniente protecção dos elementos de madeira da estrutura. Assim, estas estruturas deverão, sempre que possível, ser projectadas para as classes de risco 1 ou 2. Isto poderá fazer-se através da correcta orientação dos vãos, da criação de alpendres, telheiros ou beirais, da inclinação conveniente dos telhados, da não exposição de elementos de madeira à radiação solar através de clarabóias, entre outras medidas de protecção passiva das estruturas de cobertura em madeira.

Dos agentes atmosféricos que provocam a degradação da madeira, destacam-se fundamentalmente a acção da radiação solar, da chuva e da alternância de ciclos de secagem e humedecimento, que actuam sobre a superfície da madeira colocada no exterior e particularmente sobre a sua superfície.

Quando a madeira se encontra directamente exposta à radiação solar, a sua superfície sofre uma degradação, essencialmente através da acção dos raios ultravioleta. Dá-se uma alteração da sua coloração superficial desaparecendo a sua tonalidade inicial. A madeira inicialmente escurece (intensificando a sua cor característica) para depois se tornar acinzentada (tonalidade associada frequentemente a madeira “velha”). Este fenómeno resulta da decomposição química da lenhina pelos raios ultravioleta, afectando a camada superficial da madeira.

Contudo, quando a madeira é exposta à chuva (principalmente com incidência directa), este processo pode ser acelerado. Através do escoamento da água por erosão, a chuva leva à remoção progressiva do material deteriorado pela acção do sol e a lavagem da superfície da madeira, expondo à radiação ultravioleta uma nova camada de madeira sã.

A actuação da água e do sol de forma combinada potenciam-se entre si multiplicando os seus efeitos. Todavia convém realçar que a degradação que produzem é relativamente lenta (estima-se em 1 a 13 mm por ciclo) pelo que afecta a madeira sobretudo do ponto de vista estético. A

remoção dessa camada exterior, com 1 a 2 milímetros de profundidade, é normalmente suficiente para por novamente à vista a cor característica da madeira subjacente, com todas as suas propriedades originais.

Note-se que a degradação da superfície depende muito da sua orientação, independentemente da espécie de madeira e do clima. As superfícies no Hemisfério Norte expostas a Sul, Sudoeste e a Sudeste são mais atingidas pela acção do sol.

Os raios infravermelhos provocam uma degradação indirecta, por um processo de aquecimento superficial, que gera o aparecimento de fendas na superfície exposta e provoca a ascensão das resinas à superfície. A humidade contida na madeira depende também da temperatura desta. Tendencialmente a superfície aquecida perde humidade. Com o interior da peça de madeira a uma temperatura mais baixa, o teor de humidade do interior é diferente do teor de humidade superficial. Esta diferença de teor de humidade entre a superfície e o interior cria tensões na zona de interface. A superfície exterior tende a contrair-se ao diminuir o seu teor de humidade pela acção do calor e a contracção é dificultada pela parte interior, o que pode originar o aparecimento de microfendas, em grande parte invisíveis ao olho humano.

O aparecimento de fendas depende também da espécie de madeira utilizada, ou seja, do coeficiente de retracção desta, que quanto maior for mais favorece o aparecimento e a profundidade das fendas.

Como vimos anteriormente, o teor de humidade da madeira não é, por si próprio, uma causa de degradação. Verifica-se todavia que, quanto maior for o seu valor, menor será em média a resistência mecânica da madeira, e maior vai ser a sua expansão volumétrica e a respectiva susceptibilidade aos ataques ser atacada por agentes biológicos. Frequentemente as superfícies de madeira ficam progressivamente recobertas por mofos, devido à humidade e aos produtos de fotodegradação, dando à superfície uma cor cinzenta ou negra.

Uma causa importante de degradação da madeira, tendo como causas remotas a acção das águas das chuvas, da radiação solar e da temperatura, é a ocorrência da alternância de ciclos de humidificação e secagem, com a consequente variação volumétrica do material. Esta variação volumétrica dá origem a importantes tensões internas nas peças, resultando daqui o aparecimento de fendas (normalmente longitudinais), curvaturas e empenos.

Esta causa, para além de resultar no envelhecimento da estrutura celular e na diminuição da resistência da peça, facilita o ataque de agentes biológicos, pois as fendas criadas constituem novas vias de ataque e permitem uma maior retenção da humidade na madeira.

A aplicação de produtos de revestimento, como tintas, vernizes ou velaturas, por reflectirem ou absorverem a radiação ultravioleta, assim como por terem características hidrofugas, poderá reduzir a velocidade desta degradação.

-PRODUTOS QUÍMICOS

A maioria das madeiras são ácidas devido à presença de ácidos livres, predominantemente o ácido acético. As madeiras tradicionalmente utilizadas na construção, como o pinho e o carvalho, têm valores de pH de 5 e 4, respectivamente.

A acidez não é problemática, excepto se a madeira estiver húmida. Algumas madeiras como o carvalho e o castanho perdem o ácido acético no processo de secagem ao longo do tempo, contudo, se a madeira for sujeita a ciclos de humidade e secagem, pode produzir mais ácido pelo processo de hidrólise. O carvalho verde contém elevados níveis de ácido acético que pode provocar a corrosão em metais não adequadamente protegidos.

O aparecimento de manchas de cor negra e azulada são resultado da formação de compostos de ferro. Estas manchas podem eliminar-se com uma solução aquosa de ácido oxálico, diluído a 8% nas zonas afectadas que, depois de tratadas, devem ser bem lavadas com água, de forma a eliminar outras reacções com outros componentes da madeira.

A madeira é, em regra, pouco alterada pelo contacto com produtos químicos, sendo por isso considerado como um material bastante resistente a uma ampla gama de ambientes químicos.

Este comportamento torna-a correntemente recomendável para ambientes quimicamente agressivos, como sejam piscinas ou estruturas junto ao mar, sem requerer cuidados de manutenção especiais.

O efeito do contacto com produtos químicos resulta normalmente em simples mudanças da coloração superficial da peça atacada. Sendo em geral muito resistente aos agentes químicos. No entanto, a madeira pode em ambientes mais agressivos (acção de ácidos fortes, lixívia alcalinas e detergentes), dependendo das espécies, sofrer alterações mais importantes (Arriaga, 2002).

A madeira, principalmente a madeira das folhosas, pode sofrer danos de origem química em ambientes ácidos ou através de óxidos metálicos que, por serem muito solúveis na água, podem actuar como bases enérgicas.

Em ambientes fortemente ácidos, podem ser quebradas as cadeias de carbono da composição da madeira (hidrólise), ficando a parte afectada com um aspecto fibroso semelhante ao da podridão parda. É mais frequente em madeiras folhosas e em ambientes industriais de grande contaminação e podem ainda acontecer nas coberturas em madeira, de espécies resinosas.

Em ambientes bastante alcalinos, ocorre um dano diferente e mais grave. É degradada a lenhina e a hemicelulose, (enquanto os ácidos afectam a celulose mas têm pouca influência sobre a lenhina)

perdendo a madeira parte da sua resistência e coesão. Para a madeira de construção este é o dano por ataques químicos mais relevante.

A cal apagada em estado fresco pode exercer também uma acção corrosiva se estiver muito tempo em contacto com a madeira.

- FOGO

A acção do fogo prejudica a capacidade resistente dos elementos estruturais de madeira, devido aos danos que provoca na sua estrutura intercelular, fundamentalmente nas zonas mais próximas da área exposta. A redução de secção das peças por acção do fogo potencia ainda a influência dos defeitos existentes na capacidade resistente global do elemento estrutural (por exemplo, havendo redução de secção, a área de um nó, relativamente à área total, é superior).

A madeira e os seus componentes derivados são formados essencialmente por celulose e lenhina, que se compõem de carbono, hidrogénio e oxigénio. A madeira maciça, apesar de ser combustível, não arde rapidamente, sendo raros os casos em que num incêndio de um edifício a madeira é o primeiro material a arder.

Em caso de incêndio, a madeira começa a secar por acção da temperatura. Sem a presença directa de chama, a madeira precisa de atingir uma temperatura superficial superior a 400°C para começar a arder rapidamente. Na presença da chama (faces expostas ao fogo) necessita de uma temperatura superior a 300°C, durante um certo período de tempo, antes de se dar a ignição.

A madeira estrutural, mesmo quando se encontra exposta a um incêndio em fase de desenvolvimento, apresenta um comportamento com características bastante favoráveis. Inicialmente produz-se uma combustão rápida na superfície da madeira que origina uma camada carbonizada. Debaixo desta camada, outra produz a pirólise da madeira, e debaixo desta camada permanece madeira não afectada pelo fogo.

É importante salientar que a madeira é um material com grande capacidade de isolamento térmico, o que é uma importante vantagem face a outros materiais em caso de incêndio. O coeficiente térmico das coníferas na direcção perpendicular à fibra varia aproximadamente de 0,09 a 0,12 kcal/mh°C (em madeiras muito ligeiras é de cerca de 0,005 e nas pesadas pode chegar aos 0,30).

A capa superficial carbonizada permanece aderente ao elemento e é um bom isolante térmico (cerca de três a seis vezes mais isolante que a própria madeira), o que faz com que o interior da peça se mantenha a uma temperatura normal e as suas propriedades físicas e mecânicas inalteradas, contribuindo para retardar a subida de temperatura do material subjacente. Por esta razão pode até, nalguns casos, acontecer que a temperatura na superfície exterior da madeira seja insuficiente para promover a progressão da carbonização, extinguindo-se o processo de combustão.



Figuras 87 e 88 – Estrutura de madeira queimada (Rodrigues, 2004)

O prejuízo da capacidade resistente das peças estruturais de madeira, num incêndio, deve-se fundamentalmente à redução da secção por queima da sua camada mais superficial.

A combustibilidade da madeira está ligada à relação entre a superfície e o volume da peça, sendo que, quanto maior é esta relação (como ocorre em peças de pequena esquadria) mais fácil é a ignição e mais rápida é a propagação da chama. As arestas vivas e as secções com partes delgadas aumentam esta relação conduzindo a um comportamento ao fogo mais desfavorável.

As fendas também potenciam os efeitos devidos ao fogo. Por este motivo a madeira lamelada colada tem uma velocidade de carbonização menor que a madeira maciça.

A madeira com maior densidade entra em ignição com menos facilidade e arde de forma mais lenta. O teor de humidade da madeira também influencia o seu comportamento ao fogo, no caso de este se situar entre os 8 e os 15%. Isto significa que, por cada tonelada de madeira, deverão evaporar-se entre 80 a 150 kg de água, antes que a madeira entre em combustão.

No final do incêndio e até se iniciar a reparação do edifício pode decorrer um tempo considerável, ao longo do qual, a água utilizada para apagar o fogo fica retida nos muros e na madeira criando condições propícias para o início de processos muito acelerados de podridão.

4.4. Principais anomalias estruturais

Embora o ataque biológico esteja frequentemente na origem da maioria das situações de deterioração e mesmo de rotura dos elementos de madeira aplicados em edifícios, ainda que

nalguns casos em conjunto com outros agentes de degradação, em certos casos ocorrem também danos estruturais fundamentalmente relacionados com os esforços a que a estrutura está sujeita.

Após um correcto diagnóstico, este tipo de anomalias terão de ser resolvidas de forma adequada.

Refira-se que os erros de concepção estrutural, tal como o mau dimensionamento das estruturas, são mais frequentes do que é normalmente imaginado, sendo nestes casos fundamental corrigir as deficiências de base, mesmo em intervenções previstas como pouco intrusivas ou de programa inicial mais cingido à conservação.

As anomalias estruturais mais frequentes em estruturas de madeira resultam dos seguintes factores:

- Sobrecarregamento, secção subdimensionada, má qualidade da madeira, ataque de agentes biológicos;
- Mudança de uso com aumento não controlado de sobrecargas;
- Eliminação de apoios;
- Alteração ou degradação das ligações entre elementos estruturais, causando deformações, rotações e transferência de cargas que as peças contíguas não suportam.

4.5. Proposta de classificação dos problemas

De uma forma simplificada, agruparam-se no quadro abaixo as degradações, patologias e danos estruturais mais importantes e frequentemente relacionadas com a estabilidade das estruturas de cobertura e que, de forma geral, se traduzem em problemas correntes das estruturas de madeira.

Problema	Causas/Descrição
Secção insuficiente	Com eventual rotura de elementos e deformações excessivas, para as solicitações e cargas actuantes ou devido ao aumento das cargas originais
Deformações excessivas	Devidas ao efeito da fluência (principalmente em peças colocadas ainda verdes, ou a secção insuficiente, e consequentes roturas a longo prazo)
Falhas nas uniões ou rotura dos ligadores	Devido a um mau dimensionamento ou um desenho ou execução incorrecta destas, que também podem dar origem a deformações. Rotura por esmagamento por compressão sobre os elementos metálicos de fixação, ou por esforço de corte nos empalmes e ensambles;
Roturas pontuais em elementos	Devidas a defeitos locais, (por exemplo, por existência de nós a

	meio vão);
Rotações dos apoios	Por falhas nos ligadores ou por alteração de cargas;
Escorregamento nas ligações	A estrutura pode sofrer deformações elásticas em consequência dos deslizamentos que se produzem nas ligações;
Inexistência ou deficiências de (vigamento de) contraventamento nos planos da cobertura	Devido a eventuais afastamentos excessivos entre asnas;
Perda da secção resistente	Provocada pela acção de agentes biológicos;
Empenamento	Devido a fendas de retracção da madeira após a secagem, a assimetria de cargas, aos efeitos induzidos das vigas e dos elementos de apoio;
Encurvadura	Dos elementos comprimidos originada pelo excesso de esbelteza das peças de madeira, ou por solicitações excessivas e não previstas;
Insuficiente entrega	Dos elementos estruturais em muros ou sobre outros (vigas mestras, frechais, etc.), que, como regra geral, deve ser no mínimo $1.5\text{cm} + \frac{1}{2}$ da espessura da peça;
Pormenores construtivos mal concebidos ou mal executados	Como exemplo: aplicação de madres excêntricas em relação aos nós das asnas).

Quadro 4 – Problemas de estabilidade de estruturas de cobertura



Figura 89 – Empenamento de vigas de madeira (Rodrigues, R., 2004)

Na maior parte dos casos estas anomalias manifestam-se algum tempo depois da construção das estruturas, frequentemente devido ao uso de sobrecargas inadequadamente quantificadas nas coberturas, como por exemplo no caso das solicitações relativas à neve, ou até ao vento.

Num menor número de casos as peças estão insuficientemente dimensionadas para as cargas de longa duração, donde pode ocorrer a rotura ao fim de alguns anos. Neste caso as deformações são muito significativas e vão gradativamente aumentando.

Este caso pode ocorrer em coberturas de edifícios com sobrecargas (nomeadamente de neve) pouco relevantes, e onde a carga permanente é muito mais importante.

Analisam-se em seguida de forma um pouco mais detalhada os problemas identificados no quadro anterior.

4.5.1. Secção insuficiente

A secção insuficiente provoca uma excessiva deformação da peça, o que serve como um claro indício da anomalia. Como vantagem para as estruturas de madeira refira-se que as flechas em peças de madeira são mais facilmente visíveis do que noutros sistemas construtivos.

A secção insuficiente pode ser originada por erro de concepção estrutural ou mau dimensionamento, mas também por carga excessiva, devida à modificação do uso dado ao edifício ou por alteração do funcionamento da estrutura (por reforço local de ligações ou alteração dos apoios, por exemplo).

Como indicação de referência, a flecha de uma viga correctamente dimensionada deve aproximar-se de $l/300$ para as condições de carga total. Em qualquer vistoria a um edifício é normal encontrar apenas a carga permanente e uma pequena parte da sobrecarga de utilização.

A capacidade de carga da viga estará esgotada se a sua flecha superar a seguinte relação: $l/\text{flecha} = 3125 (l/h)$, sendo l o comprimento da viga e h a altura.

Quando a madeira é colocada ainda verde as deformações devidas à fluência aumentam e podem atingir-se flechas até 1,6 vezes superiores. Por exemplo, no caso de $l/h = 20$ as flechas seriam $l/96$ e $l/53$, respectivamente para madeira seca e para madeira verde. Isto explica alguns casos em que se encontram deformações aparentemente muito exageradas para as cargas actuantes.

4.5.2. Deformações excessivas e roturas a longo prazo

A estrutura de madeira de um edifício sofre diversas deformações ao longo da sua vida útil, com origem, periodicidade, amplitude e consequências distintas:

- Deformação devida a insuficiente secagem natural inicial,
- Deformação devida à variação cíclica da humidade do ar,
- Deformação devida à inadequação do grau de humidade da madeira, no momento da aplicação, às condições termo-higrométricas de serviço,

- Deformação permanente, eventualmente evolutiva, sob acção de cargas permanentes,
- Deformação ocasional por acção de sobrecargas e acções climáticas exteriores (neve e vento)
- Deformação devida à variação da temperatura.

As deformações são ampliadas pelo efeito da fluência da madeira, especialmente quando se aplicam em obra peças ainda verdes. Assim, a deformação das cargas permanentes devido à fluência aumenta para cerca do dobro da deformação instantânea. De forma a justificar as flechas existentes é necessário considerar o efeito da fluência nos cálculos das deformações.

Em peças inteiras é também frequente que a peça sofra um certo abaulamento ou empeno em consequência da contração da madeira durante o processo de secagem (principalmente quando colocada verde em obra e seca em serviço), e que é resultado pelo crescimento em espiral das fibras da madeira.

Note-se que a resistência da madeira é dependente da duração das cargas. A madeira apresenta maior capacidade de resistência às cargas de curta duração do que às cargas de longa duração. Este é um dos factores mais importantes no cálculo a seguir à qualidade da madeira. Quando as estruturas foram dimensionadas para cargas permanentes inferiores às reais e as cargas variáveis são relativamente pouco importantes, como é frequente acontecer em coberturas, acontece que a estrutura pode cumprir as exigências estruturais mas apenas durante um tempo limitado, podendo ser este inferior à vida útil prevista para a estrutura. Como as cargas permanentes, nestes casos, são muito elevadas e se prolongam no tempo, isto implica que as deformações aumentem progressivamente até à rotura da peça. Foram verificadas roturas deste tipo após 60 anos e serviço.

4.5.3. Uniões/ligações

As falhas nas uniões ou a rotura dos ligadores podem ocorrer devido a um mau dimensionamento ou a um desenho incorrecto destas, também resultantes de esforços excessivos para a ligação, por carga excessiva (modificação do uso dado ao edifício) ou por alteração do funcionamento da estrutura (por alteração local de ligações ou alteração dos apoios, por exemplo).

As ligações são pontos críticos das estruturas, embora muitas vezes tenham pouca atenção no contexto do dimensionamento da estrutura. É fundamental analisar os detalhes construtivos das uniões (por onde se pode aperceber da lógica e qualidade construtiva de uma estrutura antiga) e detectar indícios de esmagamento localizados sobre os elementos metálicos de fixação. Estas falhas são frequentemente visíveis no início da vida útil da estrutura. Podem também encontrar-se roturas em samblagens tradicionais de carpintaria.

As estruturas sofrem normalmente pequenas deformações elásticas em consequência dos deslizamentos das uniões. Este incremento de deformação de cálculo pode ser correntemente estimado e na generalidade dos casos não tem grande relevância. Situações mais graves são as degradações pontuais numa zona de união, devidas a podridão ou ao esmagamento das superfícies de samblagem.

As estruturas antigas de madeira, nomeadamente as das coberturas, possuem muitas vezes configurações e ligações complexas que obrigam a uma elevada compreensão da respectiva constituição e comportamento.

Infelizmente, estas estruturas são vulneráveis e apresentam correntemente elevados níveis de hiperstaticidade e ligações danificadas, o que pode modificar o comportamento global. É assim fundamental estimar a rigidez a considerar nas ligações reais realizadas entre peças estruturais.

4.5.4. Roturas localizadas

Podem-se encontrar pontualmente peças partidas inseridas numa estrutura em bom estado e sem deformações significativas. É frequente, nestes casos, que a falha seja o resultado de um defeito exagerado (normalmente um nó ou grupo de nós) que reduziu a qualidade e resistência da madeira nesse ponto. Também em zonas de reforços ou de escoramentos provisórios é frequente acontecerem.

4.5.5. Rotações nos apoios

É frequente haver uma insuficiente entrega dos elementos estruturais das estruturas de cobertura em muros ou sobre outros (vigas mestras, frechais, etc.), que, como regra geral, deve ser no mínimo 15cm + metade da espessura da peça.

É fundamental garantir que os apoios das asnas se encontrem secos e ventilados, pois a grande maioria das patologias da madeira depende da presença de água (humidade, condensação ou vapor) para se desenvolverem. Assim, para ventilar a base dos apoios deverão ser criados espaços arejados na envolvente dos apoios das asnas de madeira, de forma a evitar a habitual perda da secção resistente provocada nestas zonas pela acção de agentes biológicos.

4.5.6. Escorregamento nas ligações

A estrutura pode sofrer deformações elásticas em consequência dos deslizamentos que se produzem nas ligações.

4.5.7. Contraventamento insuficiente ou deficiente

Inexistência ou deficiências de contraventamento nos planos da cobertura, e eventuais afastamentos insuficientes entre asnas. As treliças planas carregadas segundo o seu plano são bastante sensíveis aos fenómenos de instabilidade transversal (bambeamento). Apesar de este fenómeno ser particularmente relevante nas estruturas metálicas (em consequência da reduzida secção e inércia das barras utilizadas), não deve ser menosprezado nas estruturas de madeira, em especial no caso das coberturas de grande vão e desenvolvimento.

4.5.8. Empenamento das peças e fendas devidas a retracção

A existência de fendas e de empenamento é muitas vezes devida a retracção da madeira após a secagem, a assimetria de cargas, e aos efeitos induzidos das vigas e dos elementos de apoio.

A madeira, depois de aplicada, sofre habitualmente uma certa retracção. Como resultado desta retracção a madeira pode fendilhar, desapertando-se os parafusos. As samblagens perdem então resistência e os elementos reunidos deformam-se.

As samblagens sofrem ou podem sofrer deformações, o chamado fogo das samblagens. Estas deformações, normalmente não são perigosas quanto à estabilidade da estrutura, a menos que sejam devidas ao esmagamento da madeira. São inestéticas e se a obra é submetida a choques, então corre-se o risco das cargas se encontrarem em elementos inclinados e por conseguinte haver possibilidade de uma excessiva deformabilidade e até mesmo de rotura. É necessário utilizar samblagens com fixações adicionais por parafusos, fazendo uma revisão periódica.

As fendas, nos casos de grandes secções de madeira maciça, são normais e de alguma forma inevitáveis. A contracção transversal de madeira de espécies coníferas é da ordem dos 0,20% por cada grau de teor de humidade. Significa isto que numa madeira que passe da condição verde (30% de teor de humidade) a seca (10% do teor de humidade), abrir-se-ão normalmente fendas de dimensão total na ordem de 4% das suas dimensões transversais.

Após o abate, a madeira deve ser serrada para que sejam evitados os defeitos no processo de secagem. O método mais eficaz de armazenamento do material é a empilhagem das peças com separador permitindo maior circulação do ar, protegendo-as da chuva e colocando-as em zonas ventiladas.

O tempo de secagem é aproximadamente 1 a 2 anos para madeiras macias e 2 a 3 anos para madeiras duras. Pelo facto da secagem natural ser muito demorada, são usados processos artificiais, fazendo passar as peças empilhadas por zonas de circulação de ar quente com temperatura e humidade controladas. O tempo de secagem varia entre 10 a 30 dias por polegada

de espessura da peça. Estes processos de secagem rápida devem ser fiscalizados para que não ocorram fendas na madeira, propícias ao ataque dos agentes biológicos e físico-químicos.

4.5.9. *Encurvadura*

A encurvadura dos elementos comprimidos é frequentemente originada pelo excesso de esbelteza das peças de madeira, ou por solicitações excessivas e não previstas.

4.5.10. *Pormenores construtivos mal concebidos ou mal executados - asnas*

- Linhas de asnas – tracção e deslizamentos

A linha das asnas pode romper por tracção. No caso de ser reforçada com empalme denteado de nova peça de madeira ligada à existente, esta ligação está submetida ao corte simples.

Quando a linha de uma asna é empalmada por meio de pernos, sofre sobre-tensões.

- Ligação perna – linha

Neste nó, a força que é descarregada pela perna decompõe-se numa componente horizontal e noutra vertical. A vertical serve para o dimensionamento da secção do apoio, enquanto a horizontal representa a solicitação que passa para a linha e que solicita o talão da ligação perna-linha, de tal forma que este tende a destacar-se por fissuração.

É boa prática que os três eixos da perna, linha e apoio (parede ou frechal) se encontrem num mesmo ponto, caso contrário, geram-se momentos flectores e esforços tangenciais potencialmente perigosos e que devem ser tidos em conta no dimensionamento das secções resistentes.

Neste tipo de ligação, o nó deve permitir pequenas rotações. Pode recorrer-se a um maior ou menor grau de encastramento através da pregagem, aparafusamento ou cintagem, consoante escolha do projectista e condicionamentos estéticos ou de disponibilidade.

Para a protecção ao fogo, elementos metálicos interiores, ou seja protegidos pela madeira, são preferíveis aos exteriores, sendo o caso ideal, aquele em que as ligações sejam feitas apenas com madeira não necessitando de protecção adicional ao fogo.

- Ligação pendural – pernas

Também este nó pode ser concebido com um grau de encastramento parcial e com recurso a formas de ligação mais ou menos ostensivas esteticamente.

A cabeça do pendural resulta, por reacção ao esforço transmitido pelas pernas, solicitada fortemente à compressão na direcção transversal às fibras. Por este motivo, a tradição privilegiava para este elemento o emprego de espécies de madeira mais resistentes a esta solicitação.

É sabido que a madeira é mais vulnerável à compressão transversal pelo que esta peça deve ser particularmente concebida para resistir a esta acção, podendo ser de espécie diferente dos restantes elementos. As soluções de aplicação de madeira lamelada neste nó são particularmente adequadas por facilitarem a aplicação de chapas metálicas no seu interior.

- Ligação pendural – linha

O pormenor construtivo deste nó revela a capacidade tecnológica do executante e demonstra a concepção estrutural da asna. Se o pendural for concebido desligado da linha recorre-se à estribagem, que obviamente não deve apoiar na linha nem ser a esta conectada.

Se o nó é concebido ligado, funcionando como asna reticular, o pendural apoiará na linha e o estribo fará a conexão entre o pendural e a linha, unindo os dois elementos.

- Ligações madres-pernas

Um dos mais frequentes erros de construção está relacionado com o posicionamento das madres em relação aos nós. Quando as madres são colocadas com uma excentricidade importante relativamente aos nós, originam-se importantes momentos flectores nalguns elementos, que podem comprometer a segurança estrutural global.

Capítulo V – Tipificação das soluções – Catálogo de soluções de reforço e reparação

5.1. Introdução e generalidades

Em geral, nos edifícios antigos as estruturas de madeira estão associadas a pavimentos, a coberturas e a escadas. Frequentemente estes elementos necessitam de uma reabilitação profunda. Em intervenções de grande envergadura, que ocorre normalmente após longos períodos onde apenas se realizam pequenas operações de manutenção, é necessário decidir o âmbito e a profundidade da intervenção. Antes de se partir para uma determinada reabilitação, é necessário elaborar uma metodologia de análise e decisão para a intervenção nas estruturas de um edifício antigo, considerando as diversas hipóteses em aberto.

5.2. Generalidades sobre técnicas de intervenção estrutural

A intervenção estrutural e inclui uma multiplicidade de medidas e técnicas de carácter estrutural a preconizar no projecto de reabilitação que é resultado do processo de levantamento, avaliação e diagnóstico da estrutura. O primeiro objectivo de qualquer intervenção estrutural deve ser a recuperação dos níveis de segurança e estabilidade da estrutura e de todo o edificado. Geralmente, a diversidade de problemas encontrados podem dividir-se em dois grupos: o primeiro, danos de origem biológica, que normalmente se traduz em perda de secção resistente das peças de madeira por acção dos agentes xilófagos; e o segundo, o cumprimento de exigências normativas de cálculo actuais (Verificação dos Estados Limites Últimos e de Utilização), que requerem a contabilização de elevadas acções de cálculo, nomeadamente cargas de uso nos casos muito frequentes de alteração do uso da construção ou parte dela, e de uma limitação restritiva quanto às deformações permitidas.

Da análise global dos problemas do edifício e mais concretamente da estrutura deverá elaborar-se a estratégia global da intervenção e, dentro desta, pormenorizarem-se as soluções mais adequadas para cada caso (elemento estrutural com um dado diagnóstico patológico).

A solução mais radical será sempre a simples e completa substituição das peças cujo estado seja considerado irrecuperável. A opção de consolidação das peças deterioradas, garantido a recuperação da capacidade resistente e desempenho original e as soluções de reforço, para aumentar a capacidade (por diferente uso) ou as limitações de serviço (deformação) da estrutura, devem sempre ser devidamente avaliadas a par da primeira solução.

Primariamente as técnicas de reabilitação de estruturas de madeira podem ser divididas em dois grupos: as técnicas de reparação ou consolidação e as técnicas de reforço. As primeiras, têm como objectivo repor a capacidade resistente inicial da estrutura, enquanto as segundas têm por finalidade aumentar a capacidade de carga, ou limitar a deformação da estrutura (Maria de Lurdes B. C. Reis; Fernando G. Branco; Jorge Morarji Mascarenhas).

Para qualquer objectivo, existem sempre diferentes técnicas de intervenção. A escolha da técnica mais adequada para cada situação dependerá de vários factores que devem ser correctamente avaliados caso a caso, nomeadamente dos objectivos e contexto da intervenção, do tipo de material existente e que eventualmente se pretenda aplicar, do tipo de anomalias e degradação a eliminar, das vantagens e limitações específicas de cada técnica com aplicação neste âmbito.

De seguida, enumeram-se e analisam-se resumidamente as principais técnicas utilizáveis na actuação em coberturas (adaptado de Cruz, H. e Feio A.):

a) Técnicas Tradicionais

1 - Reforço de elementos de madeira por aplicação de empalmes e talas de madeira;

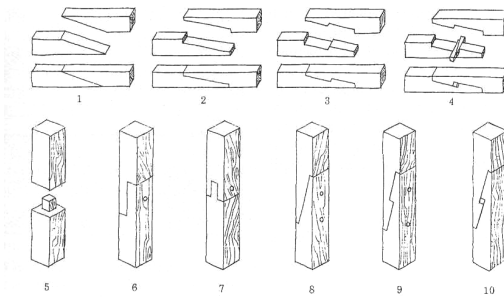


Figura 90 – Ligações de prótese de topo em peças de madeira
[CECCOTI, A, 1998]

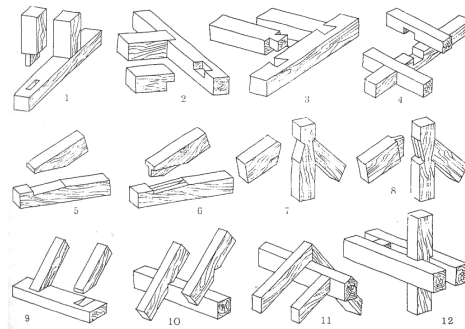


Figura 91 – Ligações de samblagem em peças de madeira
[CECCOTI, A, 1998]

2 - Reparação de fendas com parafusos;

3 - Reparação de fendas por cintagem;

4 - Adição de novos elementos de estrutura de reforço: asnas paralelas às existentes, colocação de vigas transversais;

5 - Reforço de elementos por colocação de elementos e próteses metálicas (chapas e perfis de aço).



Figura 92 – Reforço de asnas de coberturas de edifícios antigos da “Baixa Pombalina” de Lisboa (Cóias, V., 2007)

b) Técnicas recentes

1 - Técnicas de reparação e reforço com produtos de epóxico;

- 1 - Reparação de fendas com adesivo de epóxico;
- 2 - Reparação de fendas com adesivo de epóxico e varões de reforço;
- 3 - Aumento da inércia das vigas de madeira com recurso a argamassa de epóxico;
- 4 - Reforço de vigas de madeira com compósitos FRP;

c) Reparação, substituição parcial ou reconstituição de secções de madeira;

- 1 - Consolidação de discontinuidades por colocação de uma armadura distribuída na madeira;

- 2 - Reforço da ligação entre peças/juntas com elementos de madeira, Cavilhas inox ou aço e resina de epóxico;
- 3 - Reforço de ligações de topo entre elementos de madeira;
- 4 - Substituição do apoio de uma asna deteriorado com argamassa resinas de epóxico armadas com varões de reforço;
- 5 - Substituição do apoio de uma asna deteriorado por uma peça idêntica do mesmo material;

d) Técnicas de aplicação de pré-esforço e tirantes de aço;

e) Outras técnicas de reparação e reforço não consideradas neste trabalho (reforço com betão, com estruturas internas, uniões de madeira colada, etc.).

5.3. Descrição geral das Soluções por problema – Técnicas de intervenção correntes

Seguidamente pretendem-se descrever possíveis soluções para a reabilitação de estruturas de cobertura e suas peças estruturais. Estas actuações podem classificar-se pelos problemas ou âmbito/pormenor alvo de aplicação: utilização de apoios, utilização de perfis metálicos, soluções com recurso a betão armado, soluções com madeira e soluções com resinas de epóxico.

Refira-se que problema principal que apresentam as peças de asnas e estruturas de coberturas é a degradação de origem biológica que surge nos apoios. No entanto, há situações em que o problema prende-se com toda a estrutura.

5.3.1. SECÇÃO INSUFICIENTE

(com eventual rotura de elementos e deformações excessivas) para as solicitações e cargas actuantes ou devido ao aumento das cargas originais; Roturas pontuais em elementos devidas a defeitos localizados.

Esta situação está normalmente relacionada com uma secção insuficiente para as cargas a suportar, com uma tensão ou deformação admissível. A aplicação de uma normativa mais exigente ao nível das acções pode invalidar, por não cumprimento da norma, uma estrutura. O problema pode ainda apresentar-se como consequência de um ataque biológico no vão da peça, ou devido a roturas pontuais devidas a defeitos da madeira de uma importância excessiva numa secção concreta, como por exemplo um nó que tenha um tamanho demasiado grande. A consequência desta falha, é que a peça deixa de suportar a sua carga correspondente e as sobrecargas adjacentes. Para recuperar a

continuidade e/ou garantir a resistência podem empregar-se diversas técnicas que a seguir serão descritas.



Figura 93 – Rotura de peça de madeira

Uma outra situação corrente na prática é o reforço de elementos em serviço, por meio de perfis colados à face ou embebidos no interior dos elementos de madeira. Estas intervenções podem recorrer a elementos de reforço em aço macio (chapas aparafusadas ou coladas, ou varões de construção colados) ou, muito frequentemente, a materiais compósitos colados. Dependendo do problema específico a resolver, o método de reforço pode envolver a colocação de uma armadura distribuída atravessando a secção do elemento de madeira para absorção de esforços de corte, ou para impedir a propagação de fendas longitudinais, ou então o reforço das zonas de tracção e de compressão (figura ...). Refira-se que, contrariamente às intervenções em estruturas de betão armado, é corrente nos elementos de madeira o reforço simultâneo nas zonas superior e inferior das vigas, se houver condições de acesso, já que a resistência à tracção da madeira é da mesma ordem de grandeza que a sua resistência à compressão.

Os métodos empregues diferem no material utilizado para devolver à peça a sua capacidade portante e na forma de fazer trabalhar conjuntamente o material de reforço e a madeira original.

5.3.1.1. REFORÇO DE ELEMENTOS DE MADEIRA POR AUMENTO DE SECÇÃO COM NOVA MADEIRA

Nos casos em que as peças não apresentam uma suficiente capacidade resistente, uma solução relativamente simples e tradicional consiste na adição de novas peças ligadas ou intercaladas às originais. A sua execução é simples, sempre que o apoio das novas peças seja realizável sem necessidade de fazer novos entalhes. Os problemas que podem surgir devem-se ao facto das peças originais terem em geral uma deformação permanente, e as novas a colocar ainda não terem sofrido deformações.

O aumento de secção pode fazer-se através de colagem (regra geral é desaconselhável pois envolve uma tecnologia altamente especializada e controlo de qualidade apertado), pregagem ou

aparafusamento de novos elementos de madeira. Entre as causas habituais deste tipo de situação estão a alteração do uso e conseqüentemente das cargas na estrutura, os incêndios, ataques por insectos, etc. Nos dois últimos casos, será necessário avaliar a secção residual da madeira com características mecânicas inalteradas.

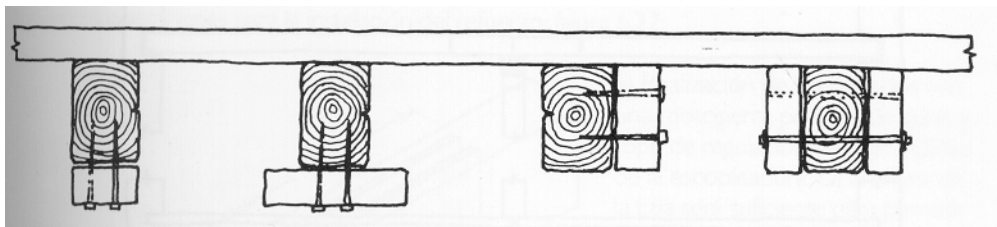


Figura 94 – Reforço de secção com nova madeira (Arriaga, F., 2002)

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira é feito por fixação de novas peças de madeira, pregadas ou aparafusadas.

Principais aplicações:

Reforço e consolidação de elementos de estruturas de madeira com secção reduzida face aos esforços aplicados, vítimas de incêndios e ataques biológicos. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a pernas, madres e escoras.

Materiais utilizados:

Pregos e parafusos de aço inoxidável ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão, novas peças de madeira nova tratada e devidamente seca.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e legibilidade da intervenção.

Inconvenientes: Existência de deformações diferentes entre as peças originais e as novas.

5.3.1.2. REFORÇO DE ELEMENTOS DE MADEIRA POR APLICAÇÃO DE EMPALMES

A técnica de reforço de elementos de madeira por aplicação de empalmes consiste na aplicação de novos elementos de madeira de um ou de ambos os lados da peça a reforçar, fazendo a ligação entre os elementos novos e os existentes por meio de parafusos e/ou parafusos e porcas, restabelecendo a continuidade das peças da estrutura (Figura 95 a, b e c).

Esta técnica aplica-se em elementos partidos ou fissurados, em zonas não localizadas junto a nós.

Os novos elementos a adicionar devem ter altura igual aos elementos existentes, e assegurar um comprimento mínimo de sobreposição entre os elementos novos e os antigos, que permita a ligação dos novos elementos a zonas não deterioradas dos elementos existentes.

Para a aplicação com sucesso desta técnica, é necessário garantir uma concepção estrutural adequada, definindo nomeadamente a distância de aplicação dos ligadores às extremidades da peça, o espaçamento entre ligadores e verificar a redução da secção útil que acarretam.

Cada parafuso necessita obrigatoriamente de duas anilhas, uma em cada extremidade, imediatamente antes da porca.

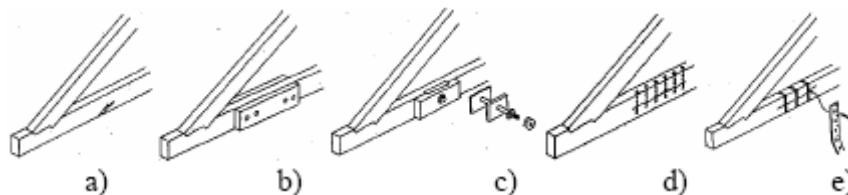


Figura 95 – a), b), c) Fases do reforço por aplicação de empalmes d) reparação de fendas com parafusos; e) Reparação de fendas por cintagem (Cóias, V., 2007)

A linha das asnas pode ser reforçada com empalme denteado de nova peça de madeira ligada à existente por braçadeiras metálicas e varões de reforço colados com argamassa de epóxido. Esta ligação está submetida ao corte simples com incremento de 20% no aumento da resistência por se tratar de uma ligação colada.

Quando a linha de uma asna empalmada por meio de pernos, sofre sobre-tensões, então reforça-se a peça através da colagem de varões de reforço com argamassa de epóxido, colocados simetricamente e obliquamente, conforme se apresenta na figura seguinte.

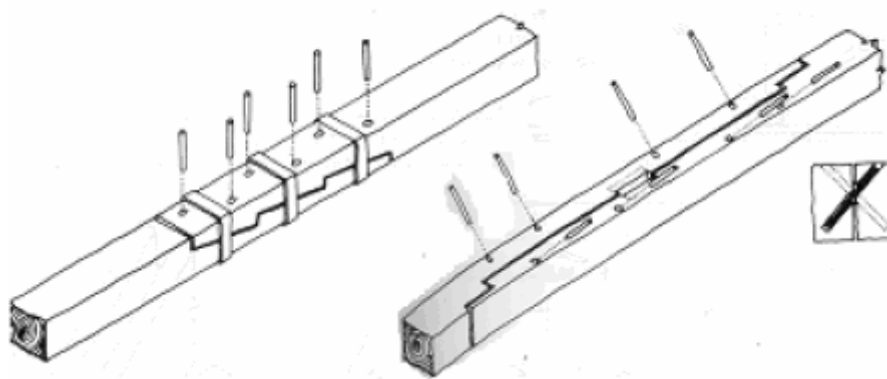


Figura 96 – Reforço de linhas com cavilhas e cintas metálicas (Arriaga, F., 2002)

- Linha da asna reforçada por meio de um empalme colado com pernos e com braçadeiras metálicas (a), linha reforçada com empalme longitudinal e pernos oblíquos colados (b)

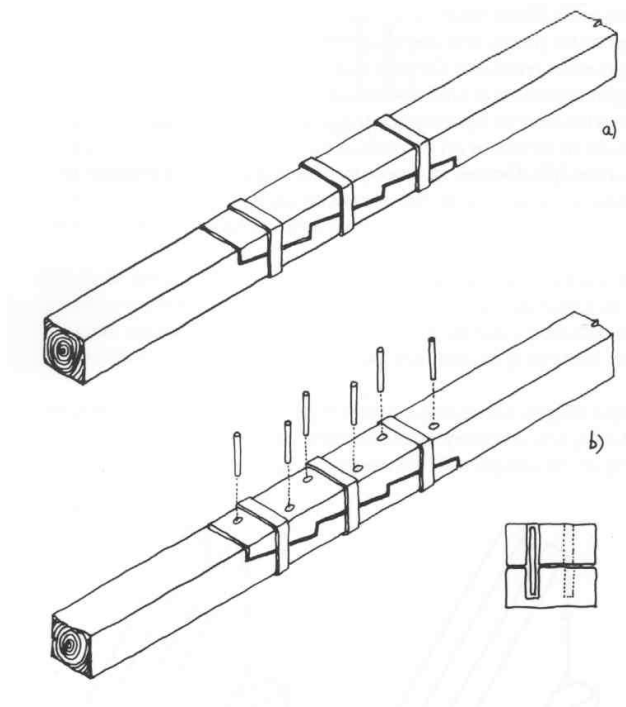


Figura 97 – Reparação linha asna com cavilhas inox ou aço (Arriaga, F., 2002)

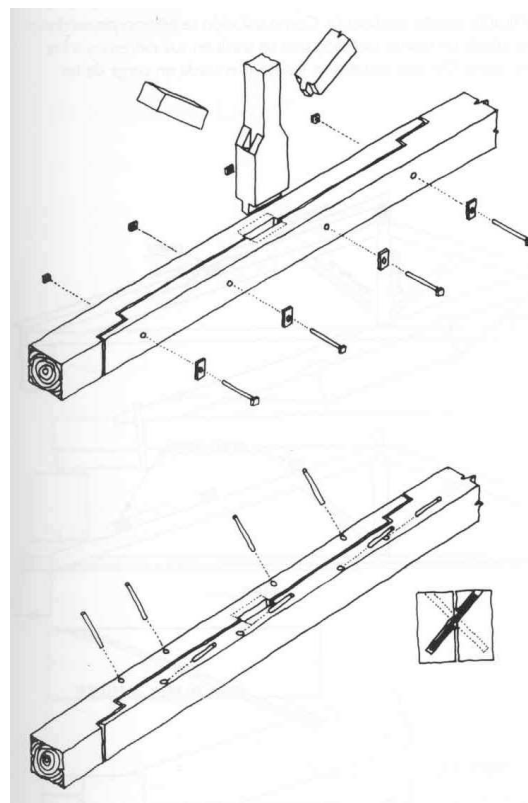


Figura 98 – Reparação linha asna com cavilhas aço inox e resina de epóxico (Arriaga, F., 2002)

O emprego de cavilhas de madeira garante a estabilidade da união, desde que devidamente calculadas.

Assim, a conexão apenas com cavilhas de madeira é fiável com os seguintes cuidados:

- Empregar madeira com grande resistência mecânica;
- Calcular atentamente o número e dimensões das cavilhas;
- Realizar as cavilhas trabalhando por corte, evitando o torneamento;
- Seleccionar cuidadosamente a madeira em que se realiza a prótese, evitando peças que apresentem defeitos;
- Particular atenção ao posicionamento das cavilhas de modo a não serem vizinhas de fissuras.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira é feito, mantendo a madeira sã e substituindo as partes deterioradas das peças por madeira nova, introduzindo peças auxiliares de reforço como pregos, parafusos, cintas ou cavilhas.

Principais aplicações:

Reparação ou reforço de elementos de estruturas de madeira nas suas partes danificadas por ataques biológicos, fendilhação ou rotura por esforços desadequados. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a pernas e linhas.

Materiais utilizados:

Pregos, cintas e parafusos de aço inoxidável ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão, cavilhas de madeira nova tratada de alta resistência mecânica, novas peças de madeira nova tratada e devidamente seca.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Manutenção dos materiais originais. Reduzida intrusividade.

Inconvenientes: Deve-se garantir o total saneamento da madeira afectada e ligação eficaz da nova.

5.3.1.3. REFORÇO DE ELEMENTOS DE MADEIRA ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE RESINAS DE EPÓXIDO E VARÕES EMBEBIDOS

Este tipo de solução consiste em realizar uns entalhes/rasgos na madeira que permitam a inserção de elementos metálicos ou de fibra de vidro que ficam embebidos em resinas de epóxido.

Neste tipo de reparações, é fundamental que o comprimento de ancoragem permita que as duas partes trabalhem solidariamente. A resina de epóxido combina-se com agregados finos formando um conglomerado/betão. Estes são mais económicos que a resina pura, e as características mecânicas da formulação são suficientes para a união, para além de diminuir a dilatação térmica.

A técnica de aumento da inércia de vigas de madeira baseia-se no reforço dos elementos de madeira por aumento da altura útil, de preferência, numa das faces horizontais (Figura ...). A solução de reforço com argamassa de epóxido consiste na ligação à viga original com recurso a varões de reforço, nomeadamente de aço ou de poliéster reforçados com fibra de vidro, colocados no interior de furos e guarnecidos com argamassa de epóxido [Arriaga, F., 2002].

O exemplo mais conhecido é o corte oblíquo, para melhorar os esforços de corte, em que previamente se remove a madeira original deteriorada. Complementarmente podem ser realizados entalhes na viga original para otimizar a solidarização. As intervenções realizadas com argamassas de epóxido têm a vantagem de não originarem problemas de retracção nem de aderência.

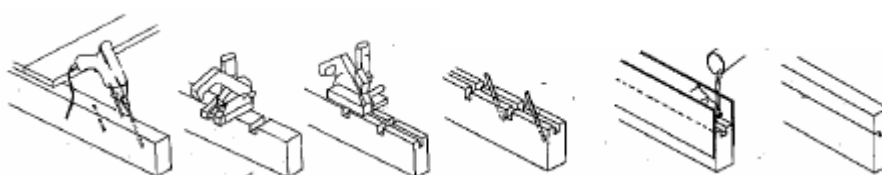


Figura 99 – Aumento da inércia de vigas de madeira com recurso a argamassa de epóxido.

(ARRIAGA, F., 2002)

Para executar estes trabalhos deve escorar-se as vigas, a fim de evitar que oscilem, escorreguem ou caiam. Libertar as vigas da alvenaria em redor, de modo a permitir a intervenção em toda a extensão da viga, inclusive na zona de apoio. Realizar os furos previamente definidos, respeitando as seguintes condições: afastamento mínimo entre armaduras, cerca de 9 cm; distância mínima entre a armadura e a superfície da viga, cerca de 6 cm; comprimento mínimo de ancoragem do varão na argamassa de epóxido, cerca de 15 cm; comprimento mínimo de ancoragem do varão na madeira, cerca de 30 cm.

Colocar as armaduras nos respectivos furos, se necessário recorrendo a espaçadores de modo a que quando se fizer o vazamento da argamassa estes não sofrem deslocções de posicionamento. As armaduras servirão como ligação mecânica entre a viga e a prótese. Colocar a cofragem, de acordo com o objectivo pretendido.

Se a reparação for realizada por motivos estéticos, instalar uma cofragem perdida do mesmo tipo de madeira da viga original. No caso de o aspecto estético ser de menor importância, deve instalar-se temporariamente uma cofragem lisa, que é removida posteriormente.

Vazar a argamassa de epóxido (de endurecimento lento sem retracção) na cofragem. Retirar a cofragem, após o endurecimento argamassa de epóxido.

Retirar os apoios e carregar a viga após o decurso de um prazo mínimo de 7 dias.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira é feito por entalhes/rasgos na madeira que permitam a inserção de varões metálicos ou de fibra de vidro que ficam embebidos em resinas de epóxico.

Principais aplicações:

Reforço e consolidação de elementos de estruturas de madeira com secção reduzida face aos esforços aplicados. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a pernas e linhas, junto aos apoios.

Materiais utilizados:

Varões de aço inoxidável ou de aço corrente, fibra de vidro ou poliéster, e pasta de resinas de epóxico.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais que alteram a distribuição de esforços e rigidez dos elementos e da estrutura de forma global. Exige mão-de-obra muito especializada e é uma técnica de elevado custo.

5.3.1.4. REFORÇO COM ARMADURAS LONGITUDINAIS COM LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO OU CHAPAS DE AÇO NA PELE DA MADEIRA

Técnica de reforço de um elemento de madeira com uma manta ou um laminado de FRP consiste em ligar o sistema de reforço à madeira, através de um adesivo, para que este complemente a madeira na resistência a determinadas solicitações. A colagem do sistema pode ser efectuada na face traccionada da viga, ou ainda na face traccionada e na face comprimida.

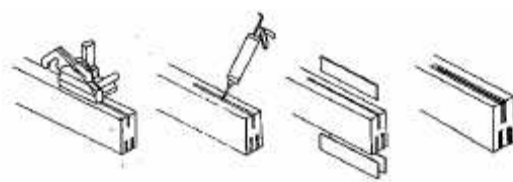


Figura 100 – Execução do reforço de vigas com compósitos de FRP (Arriaga, F., 2002)

Antes da aplicação dos compósitos de FRP, devem executar-se cortes com uma serra eléctrica e com as seguintes dimensões: 12.5 mm de largura, 60 mm de profundidade e 800 mm de comprimento. Esses cortes devem ser limpos de estilhas e poeiras, recorrendo a um aspirador industrial de bico e uma pistola de pressão de ar.

Deve-se verificar e controlar a existência de fissuras procedendo à sua reparação. Em seguida, injectar a quantidade de adesivo predeterminada em cada uma das aberturas, introduzir os laminados de CFRP e limpar o excesso de adesivo da superfície da viga.

A temperatura ideal para a realização destes trabalhos é de 15 °C. As condições ambientais são condicionantes do sucesso das intervenções. Uma temperatura demasiado baixa pode impedir a polimerização da cola, podendo ser contornada com o aquecimento local dos materiais ou do ambiente. Se forem expectáveis temperaturas inferiores a 5°C, deve proteger-se a argamassa com materiais isolantes. Uma temperatura demasiado elevada reduz de forma significativa o tempo de trabalho, pelo que é aconselhável a sua execução às primeiras horas da manhã, a preparação de volumes de cola tão pequenos quanto possível e eventualmente o arrefecimento prévio dos componentes da cola antes de proceder à mistura.

- Sistemas comerciais

Este sistema emprega, como material de reforço, um laminado fabricado com um material composto por fibras de carbono, com uma matriz de resina de epóxico (do tipo do patenteado “Carbedur” pela “SIKA”). Apresenta-se em rolos contínuos de grande comprimento e pode cortar-se em obra com grande facilidade. Pode empregar-se para o reforço de peças de madeira, normalmente actuando como armadura de tracção colocada na parte inferior da secção. Para o efeito utilizam-se ranhuras, onde se aloja o laminado de reforço e se cola com adesivo de epóxico.

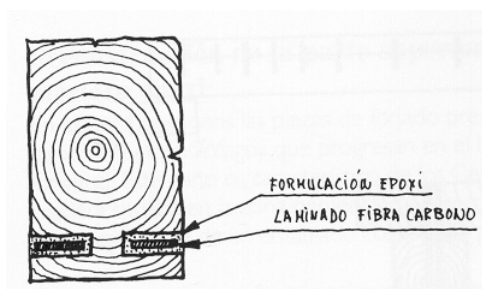


Figura 101 – Reforço de peça com laminados de fibra de carbono (Arriaga, F., 2002)

Também se pode utilizar na parte inferior da secção a reforçar e tapar o reforço com uma peça de madeira. Em primeiro, aplica-se uma capa de resina de 1 mm de espessura sobre o suporte que se vai reforçar. O laminado fibra de carbono emprega-se com uma capa de resina de 1 a 2 mm de espessura e coloca-se sobre a superfície do suporte. Com a ajuda de uma peça metálica pressiona-se o laminado até o adesivo surgir à superfície.

- *Alteração de carga ou reforço da capacidade da peça*

Reforço de zonas tensionadas e comprimidas:

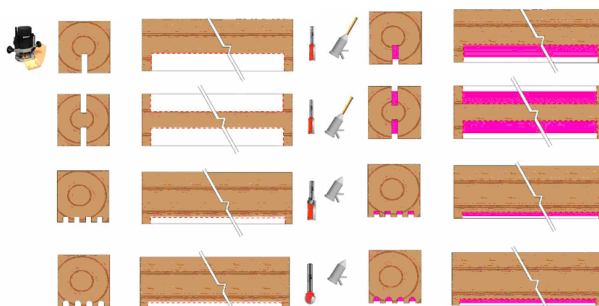


Figura 102 – Procedimento de reforço de peças com laminados de fibras de carbono
(ROTAFIX, 2007)

- Cortar ranhuras ou rasgos na peça de madeira a reforçar;
- Aspirar rasgos ou ranhuras;
- Injectar rasgos ou ranhuras com o volume calculado de resina tixotrópica;
- Inserir as chapas de aço ou laminados de fibras de carbono (C.F.R.P.) nas ranhuras ou os varões nos rasgos;
- Remover excesso de resina.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira é feito por entalhes/rasgos na madeira que permitam a inserção de laminados de chapas de aço ou de fibra de vidro (FRP) que ficam embebidos em resinas de epóxico.

Principais aplicações:

Reforço e consolidação de elementos de estruturas de madeira com secção reduzida face aos esforços aplicados. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a pernas, madres e linhas.

Materiais utilizados:

Laminados de fibras de carbono ou chapas de aço, pastas de resinas de epóxico.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais que alteram a distribuição de esforços e rigidez dos elementos e da estrutura de forma global. Exige mão-de-obra muito especializada e é uma técnica de elevado custo.

5.3.1.5. REFORÇO COM PERFIS E CHAPAS METÁLICAS

Os elementos metálicos são normalmente utilizados para reparação e reforço de peças à flexão, com soluções de diferente eficácia. A menor eficácia destas soluções deve-se fundamentalmente à

sua utilização pontual, ao facto de ser uma solução esteticamente discutível, bem como à sua limitação de estabilidade ao fogo.

A utilização de perfis e chapas metálicas para a reparação de roturas de vigas é um dos recursos mais utilizados que apareceu para a consolidação pontual de obras antigas. Consistem em manter a continuidade da viga mediante garfos ou chapas metálicas ligados à madeira por elementos mecânicos.

Uma técnica de reforçar a capacidade resistente a um elemento de madeira danificado é utilizando chapas metálicas acrescentadas aos lados do elemento de madeira. Empregam-se nas zonas em que a madeira esteja deteriorada, tais como apoios em muros ou zonas de rotura da madeira.

Necessitam normalmente uma ampla superfície de pregagem ou aparafusamento pelo que as chapas têm muitas vezes grandes dimensões. Por esta razão é uma solução dificilmente utilizável quando a estrutura tenha uma vertente estética importante.

O inconveniente que apresenta esta solução verifica-se quando os elementos entram em carga, existindo uma certa deformação nas ligações, o que conduz a uma eficácia relativamente pobre.

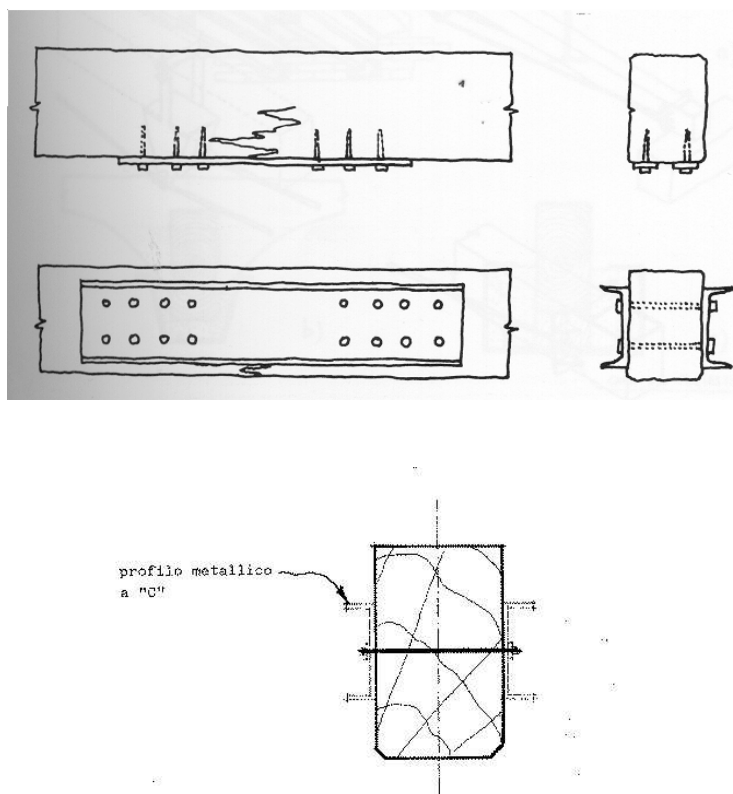


Figura 103 – Reforço de peças com perfis metálicos nas laterais (Barbizan, 2000)

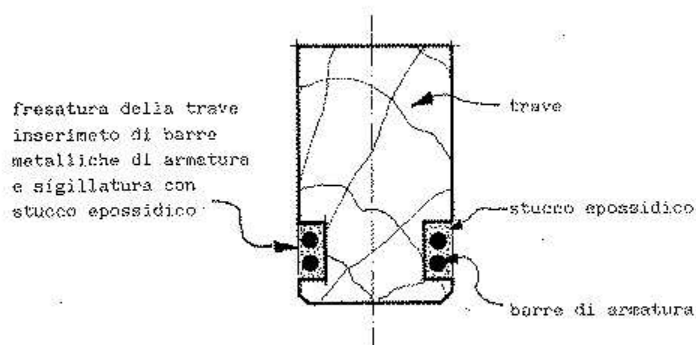


Figura 104 – Forma alternativa de reforço com varões embebidos (Lamanna, L., 1996)

Esta técnica consiste em colocar elementos de reforço, chapas ou perfis metálicos, nas faces laterais das vigas originais (Figura 103). A ligação entre ambos é estabelecida com recurso a elementos de fixação, nomeadamente parafusos com porca.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira é feito por fixação de peças de aço, de forma a melhorar a resistência e rigidez da estrutura.

Principais aplicações:

Reforço e consolidação de elementos de estruturas de madeira com secção reduzida face aos esforços aplicados. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a pernas, madres e linhas.

Materiais utilizados:

Chapas e perfis laminados de aço inoxidável ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e legibilidade da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais.

5.3.1.6. REFORÇO COM TIRANTES METÁLICOS

Outra solução é a colocação de tirantes metálicos que permitem a redução das deformações da peça em causa, e melhoram o estado de tensões na madeira.

A colocação de tirantes metálicos na parte inferior das peças (no caso das coberturas, por exemplo em particular em relação às pernas), permite aumentar a inércia da peça, ficando o tirante

traccionado e a viga comprimida, aumentando a sua capacidade de carga. A grande dificuldade na utilização deste sistema é a colocação dos tirantes nas extremidades da viga.

A técnica de reparação e reforço de elementos de madeira submetidos a flexão pela colocação de tirantes em aço amarrados na face inferior das peças, tem a vantagem de ser relativamente simples de executar, não necessitando de desmontar a estrutura e telhado, e de ser facilmente reversível, caso seja de futuro desnecessária.

Existem diversos estudos e experiências de reforço de asnas de madeira com sistema de tirantes de aço ligados às faces das estruturas, especialmente em Itália (Marradi 1989 e Messina 1989). Apresentam-se, de seguida, dois casos em que se utiliza o reforço através de cabos de aço ou simplesmente atirantado aos apoios e outros em "W". Nestes tirantes introduzem-se tensões que produzem forças que melhoram o estado de tensão da madeira e reduzem as deformações. Com este procedimento reduzem-se as deformações da estrutura de uma forma considerável, assim como se aumenta a sua capacidade de carga.

No caso da reparação se tornar necessária, unicamente porque a estrutura apresenta deformações permanentes, pode ser vantajosa a aplicação de um pré-esforço exterior, em conjunto com tirantes. A fim de se aplicar o pré-esforço torna-se necessário escorar a estrutura, colocar os reforços metálicos, cuidando-se em particular dos topos. Finalmente, deve-se retirar o escoramento e proteger a estrutura especialmente contra o fogo. Se for possível deve aumentar-se a inércia da secção das peças, através do aumento da altura.

- Técnicas de aplicação de pré-esforço

A técnica de aplicação de pré-esforço consiste na aplicação de um sistema de pré-esforço e da sua colocação em tensão de modo a contrariar todas as cargas aplicadas na estrutura e eventualmente criar uma contra flecha anulando a flecha inicial.

Para realizar este tipo de trabalhos, é necessário, após escorar a estrutura, recorrer a uma estrutura metálica pré-fabricada em substituição das zonas e/ou elementos de madeira suprimidos. Geralmente é necessário substituir os topos das vigas e, eventualmente, adicionar acessórios metálicos ao vão. Posteriormente aplica-se o sistema de pré-esforço que é colocado em tensão.

Há necessidade de efectuar depois a protecção das peças metálicas contra a acção do fogo.

Esta técnica é aplicada em intervenções de reabilitação de elementos de madeira, quando se verifica uma deformabilidade excessiva das vigas.

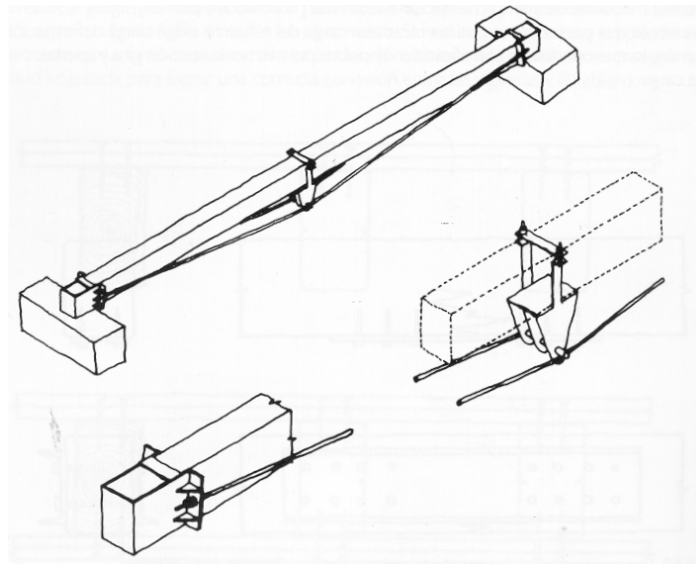


Figura 105 – Reforço de peças com aplicação de tirantes pré-esforçados (Arriaga, 2002)

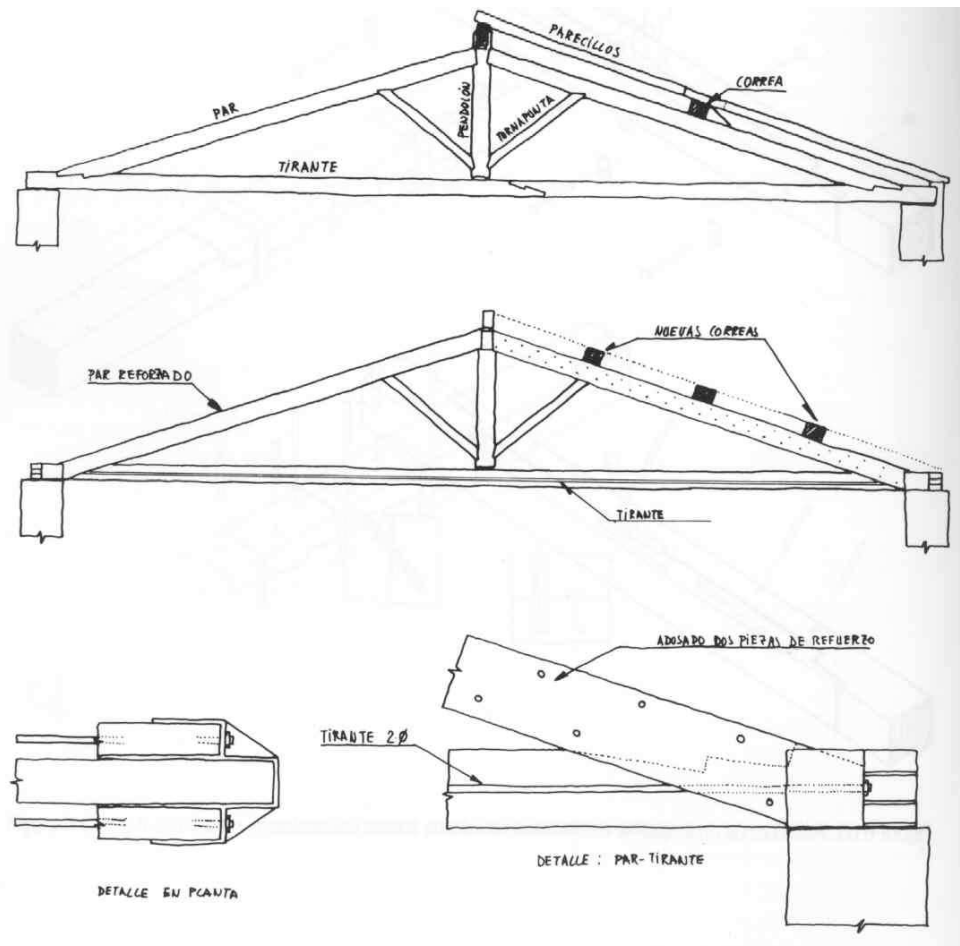


Figura 106 – Novas peças de reforço em madeira e introdução de tirantes de aço (Arriaga, 2002)

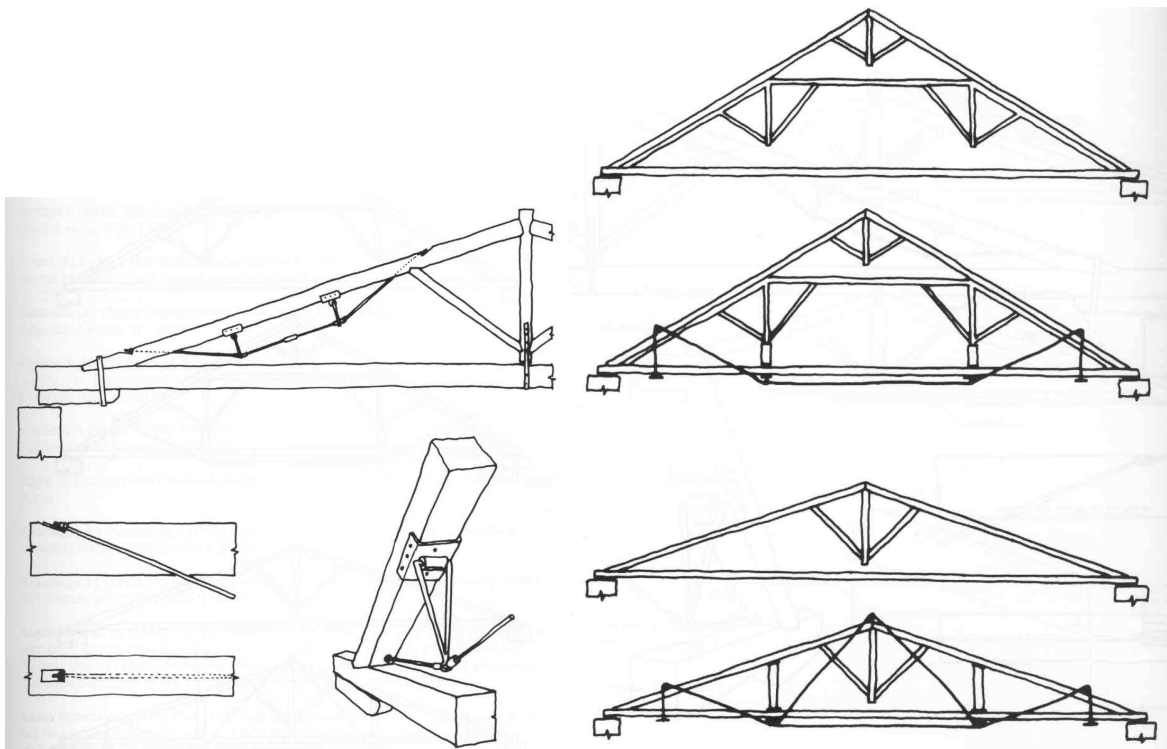


Figura 107 – Reforço de asnas com tirantes de aço (Arriaga, 2002)

A utilização de tirantes metálicos permite o aumento da inércia das peças, ficando o tirante traccionado e a viga comprimida. Têm o inconveniente da amarração aos extremos da peça, por vezes ser complicada.

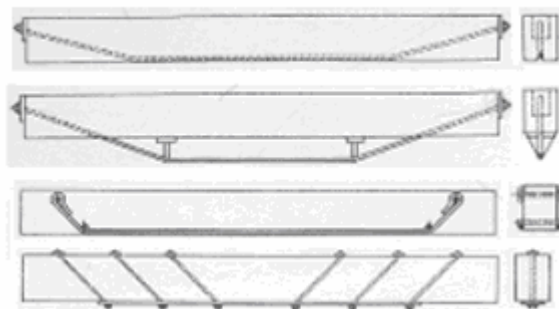


Figura 108 – Reforço das vigas deformadas com auxílio de tirantes metálicos com esticadores de aço (Arriaga, 2002)

Nos casos em que as pernas da asna se encontram com secção reduzida face aos esforços aplicados, o reforço pode ser efectuado pela colocação de tirantes metálicos que permitem a redução das deformações da peça em causa, e melhoram o estado de tensões na madeira.

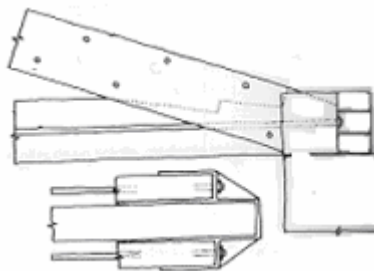


Figura 109 – Linha da asna reforçada com tirantes metálicos a impedir a deformação da perna (Arriaga, 2002)

Para reforço de estruturas de cobertura do tipo cabana, pode-se utilizar o método “tradicional” que consiste na aplicação de um tirante na zona superior das paredes de suporte.

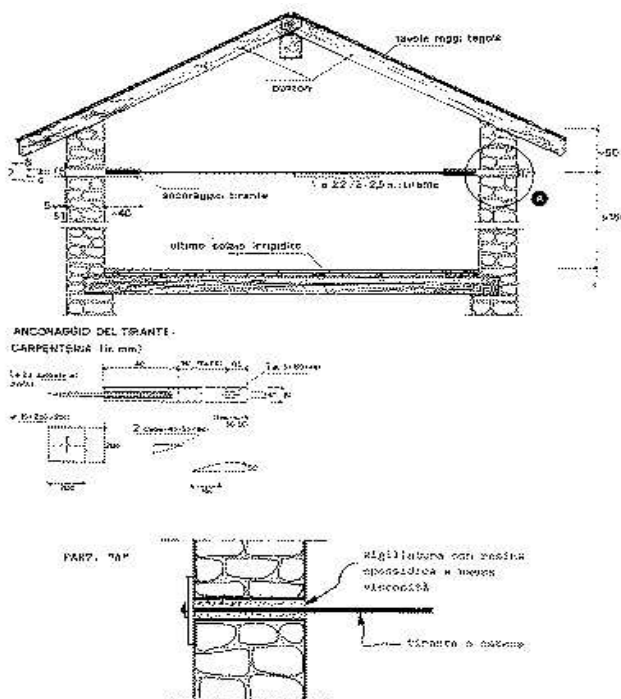


Figura 110 – Reforço de coberturas simples de duas águas com introdução de tirantes nos topos das empenas (Lamanna, L., 1996)

Reforço da estrutura da cobertura eliminando impulsos, através da colocação de tirantes ligando as pendentes da asna à madre.

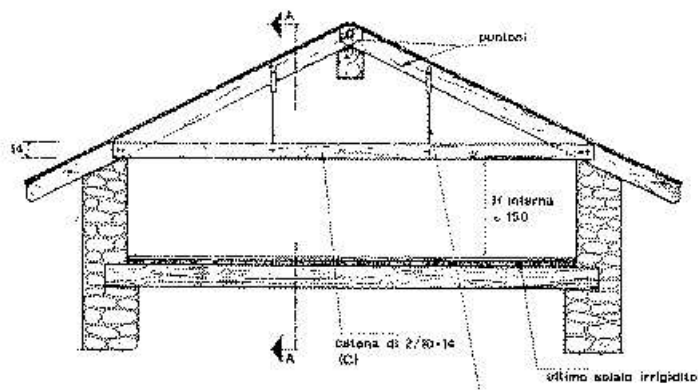


Figura 111 – Reforço de coberturas simples de duas águas com introdução de linhas em madeira (Lamanna, L., 1996)

Descrição resumida:

O reforço é feito pela adição de tirantes constituídos por varões de aço, ancorados nas extremidades dos elementos a reforçar.

Principais aplicações:

Reforço e consolidação de elementos de estruturas de madeira com secção reduzida face aos esforços aplicados. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a pernas e madres.

Materiais utilizados:

Varões e chapas de ancoragem de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e legibilidade da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais. Aplicação necessita de operadores especializados.

5.3.1.7. SUBSTITUIÇÃO DA ESTRUTURA DE MADEIRA POR PERFIS METÁLICOS

Uma solução de reforço de estruturas de madeira utilizando perfis metálicos, é substituindo peças degradadas de madeira por perfis metálicos. Em algumas intervenções, os elementos de madeira danificados poderão ser totalmente substituídos por perfis metálicos, em aço devidamente protegido contra a corrosão.

Descrição resumida:

O reforço é feito pela substituição de peças degradadas de madeira por perfis metálicos.

Principais aplicações:

Reforço e consolidação de elementos de estruturas de madeira com secção danificada por acção de agentes biológicos ou outros. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a pernas e linhas.

Materiais utilizados:

Perfis de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Legibilidade e economia da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais. Alteração da rigidez das estruturas originais. Alteração significativa da estética da estrutura.

5.3.1.8. EXECUÇÃO DE NOVOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS ADICIONAIS DE MADEIRA

Redução dos esforços actuantes em determinados elementos da estrutura da cobertura, por adição de novos elementos como a redução do vão de asnas ou de estruturas simples de pernas e firante, por introdução a meio vão de nova asna ou estrutura pernas-tirante em madeira.

Descrição resumida:

O reforço é feito por adição de novos elementos ou estruturas de madeira nova, mantendo a existente.

Principais aplicações:

Reforço de estruturas de madeira de coberturas com secção insuficiente por alteração das exigências estruturais ou por diminuição da resistência da estrutura existente, por exemplo pela acção de um incêndio.

Materiais utilizados:

Madeira nova tratada e devidamente seca, preferencialmente da espécie original.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Manutenção dos materiais originais.

Inconvenientes: Alteração do funcionamento das estruturas originais e difícil legibilidade no futuro da intervenção.

5.3.1.9. REPARAÇÃO POR SUBSTITUIÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Intervenção de carácter pontual, relativo a um determinado elemento, ou de toda uma asna ou estrutura completa, dependendo do tipo de estrutura e das deformações registadas.

A substituição pode ser feita por novas peças de madeira maciça, preferencialmente de espécie e características idênticas (o mais possível) à existente, por peças em madeira lamelada-colada, ou

ainda por peças novas de betão de epóxico e varões de fibras (ver pontos próprios destas soluções).

Descrição resumida:

O reforço é feito pela substituição de peças degradadas de madeira por peças em nova madeira ou em madeira lamelada-colada.

Principais aplicações:

Reparação de estruturas de madeira com elementos muito danificados por acção de agentes biológicos ou outros. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a todos os elementos e a asnas inteiras.

Materiais utilizados:

Nova madeira maciça, preferencialmente da espécie original, tratada e devidamente seca, ou madeira lamelada-colada.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Reduzida alteração do funcionamento e estética estrutural e simplicidade da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais. Diferentes deformações e rigidez dos elementos estruturais introduzidos face aos existentes.

5.3.2. DEFORMAÇÕES EXCESSIVAS

Devidas ao efeito da fluência (principalmente em peças colocadas ainda verdes), ou a secção insuficiente, e consequentes roturas a longo prazo.

As diferentes parcelas de deformação, reversível ou irreversível, devem ser eliminadas ou limitadas, mediante a adopção de algumas das seguintes medidas preventivas:

- Secagem inicial adequada das madeiras,
- Aplicação das madeiras com grau de humidade controlado e compatível com as condições de serviço previstas,
- Colocação de isolamento térmico na cobertura,
- Realização do dimensionamento, tendo em conta os estados limites de utilização (deformação).

Recorde-se que a deformação da estrutura principal da cobertura pode ter consequências ao nível do desempenho da mesma, afectando o seu aspecto e, eventualmente, a sua estanquidade à chuva.

Os apoios da estrutura devem garantir, por um lado, que os movimentos previstos em projecto não se encontram impedidos, de modo a que não se gerem impulsos desfavoráveis sobre as paredes ou

vigas do edifício e, por outro, que as asnas não se podem deslocar do apoio, criando condições de instabilidade (deslocamentos laterais, deslocamentos longitudinais incompatíveis com a dimensão do apoio e deslocamentos verticais). É corrente a interposição de peças de madeira, frechais, ou berços metálicos nos apoios de modo a garantir as condições atrás indicadas.

5.3.2.1. COLOCAÇÃO DE NOVAS ESTRUTURAS DE SUPORTE

Redução dos esforços actuantes em determinados elementos da estrutura da cobertura, por adição de novos elementos como a redução do vão de asnas ou de estruturas simples de pernas e firante, por introdução a meio vão de nova asna ou estrutura pernas-tirante em madeira.

Uma solução de execução relativamente simples, é a colocação de novas asnas que dividam o vão inicial em vários vãos mais pequenos.

Quando o vão a vencer pelas asnas é muito grande, e não sendo viável o reforço das asnas sem introduzir novos apoios intermédios, uma hipótese existente é a de recorrer a novos pilares e modificar a estrutura de cobertura nessa zona, o que nem sempre é recomendável ou até possível. O cálculo destas soluções deve ter em conta a deformação das peças de reforço e o assentamento dos apoios intermédios, que poderão ser diferenciados, introduzindo esforços não previstos na estrutura existente.

Uma solução tradicional para reduzir o vão de uma viga, mas que também poderá ser utilizada em estruturas de cobertura, nomeadamente na alteração do esquema estrutural de asnas, consiste na introdução de escoras. O encontro entre a escora e a viga, poderá ser análogo ao realizado com as linhas de asnas, desde que existam estruturas intermédias que transfiram esforços de compressão para esses nós a criar, este pode ser feito mediante samblagem ou com a ajuda de uma ponte de equilíbrio. Um grande inconveniente desta solução é que os muros de apoio devem resistir ao impulso horizontal.

Descrição resumida:

O reforço é feito pela introdução de novas estruturas (asnas) nos vãos iniciais ou elementos de suporte adicionais na cobertura, mantendo-se a estrutura original desde que saneada.

Principais aplicações:

Reforço de estruturas de madeira com secção insuficiente ou com deformações excessivas para a utilização pretendida. Por alteração de cargas actuantes ou por a estrutura estar danificada por acção de agentes biológicos ou outros.

Materiais utilizados:

Elementos a adicionar em nova madeira tratada e devidamente seca, de preferência da mesma espécie da original.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Legibilidade e economia da intervenção.

Inconvenientes: Alteração da estética, rigidez e funcionamento das estruturas originais.

5.3.2.2. APLICAÇÃO DE TIRANTES METÁLICOS

As soluções aqui abrangidas foram já descritas anteriormente no ponto 5.3.1.6.

5.3.2.3 REPARAÇÃO POR REFORÇO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

Esta intervenção é precedida da anulação da deformação através do escoramento até à conclusão do reforço dos elementos. As soluções aqui abrangidas foram já descritas anteriormente no ponto 5.3.1.

5.3.2.4 REPARAÇÃO POR SUBSTITUIÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS

As soluções aqui abrangidas foram já descritas anteriormente no ponto 5.3.1.

5.3.3. FALHAS NAS UNIÕES

Ou rotura dos ligadores, devido a um mau dimensionamento ou um desenho ou execução incorrecta destas, que também podem dar origem a deformações. Rotura por esmagamento por compressão sobre os elementos metálicos de fixação, ou por esforço de corte nos empalmes e ensambles.

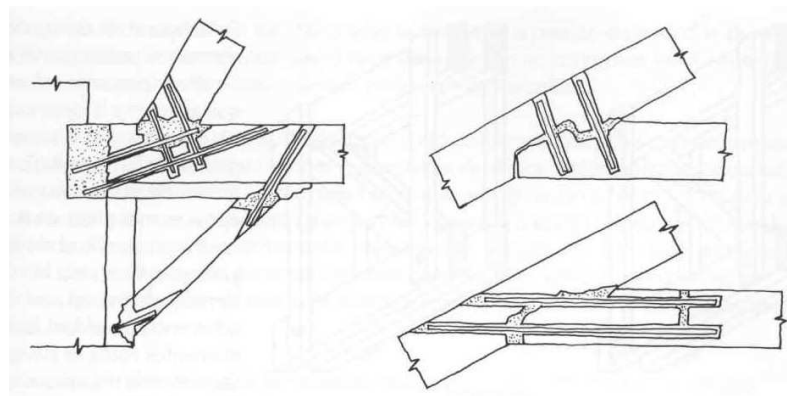


Figura 112 – Reconstituição de nós com resinas de epóxido armadas

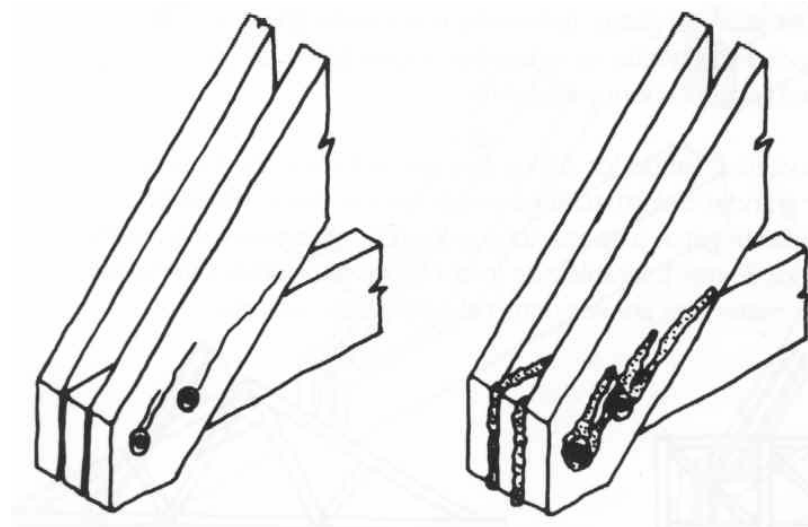


Figura 113 – Reparação nó com resinas de epóxido

5.3.3.1. REPARAÇÃO/REFORÇO DOS NÓS DE LIGAÇÃO POR TÉCNICAS TRADICIONAIS

Neste tipo de reforço, dentro das técnicas mais tradicionais podem empregar-se grampos, pregos e cavilhas no reforço dos nós das estruturas ou na substituição dos elementos de ligação já existentes, quando se encontram deterioradas, frequentemente pela corrosão. A sua aplicação deve ser feita respeitando as boas práticas de concepção estrutural relativas à distância de aplicação dos ligadores ao topo das peças, à distância entre ligadores e à redução da secção útil que acarretam. A reparação das ligações em estruturas de madeira de coberturas passa, regra geral, pelo aperto de cintas e tirantes metálicos e pela substituição ou adição de parafusos e pregos.

- Empalmes

O reforço de uma dada peça, através desta técnica, é feito acrescentando novos elementos, de um ou de ambos os lados da peça, sendo a solidarização feita com o emprego de pregos e parafusos. A solução é aplicável principalmente em peças em que houve roturas ou gravemente fissuradas, em zonas situadas fora dos nós. Os empalmes devem ter a altura das peças, e a soma das duas não deve ser inferior à largura total das peças empalmadas.

A execução dos empalmes deve ser feita de modo a evitar excentricidades na distribuição das cargas, ou seja, os empalmes devem ser colocados na mesma secção. Um comprimento mínimo de sobreposição deve ser garantido na ligação dos novos elementos às zonas não deterioradas dos elementos existentes.

Esta solução incorre no risco das novas peças associadas por empalme poderem vir a ser contaminadas pelas existentes, se estas ainda se encontrarem com ataques biológicos activos, pelo que esta situação deve ser tida em conta, sendo primordial garantir previamente a sanidade da madeira existente a manter.

- Parafusos

Nesta técnica, quando os parafusos são colocados no topo ou longitudinalmente, pode realizar-se o aperto das faces da fenda, uma contra a outra, por meio de um parafuso de rosca, introduzido num furo feito antecipadamente na direcção perpendicular à da fenda (F).

Note-se que é sempre necessário verificar que os furos necessários não reduzem significativamente a secção útil da peça. Neste sentido, a área da secção removida pelo furo não deve exceder a secção transversal ocupada pelo maior nó da peça.

Recomenda-se que os parafusos tenham diâmetros pequenos, de meia polegada ou três oitavos, colocados de cinco a oito centímetros a contar do topo da peça, e que sejam apertados até entrarem em tensão.

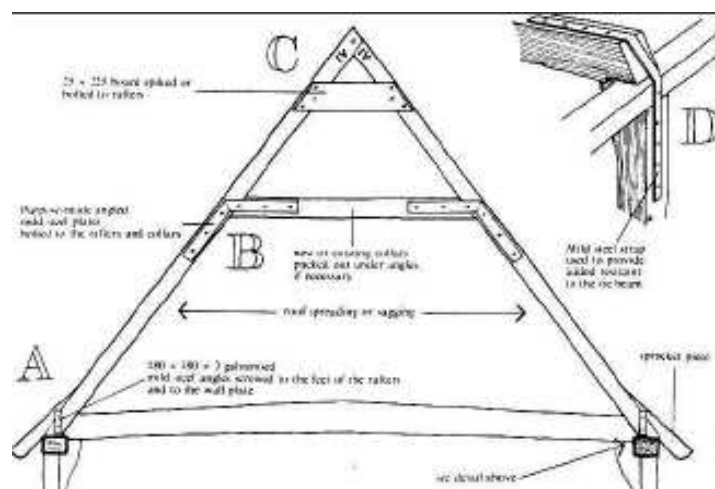


Figura 114 – Chapas metálicas de ligação entre peças

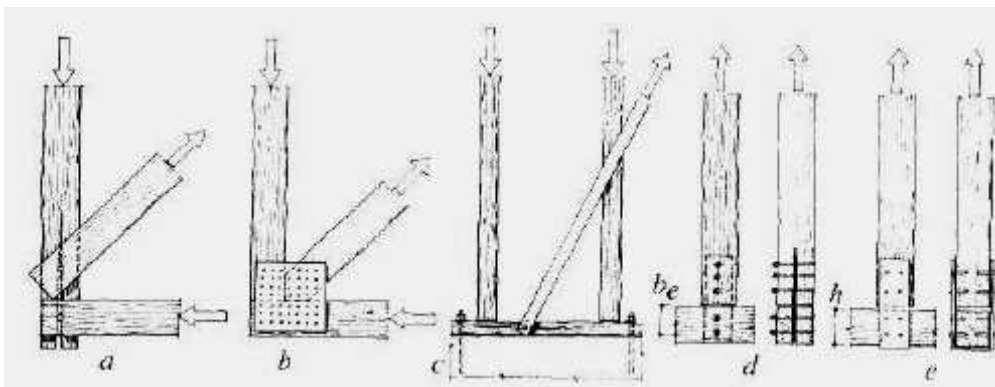


Figura 115 – Diferentes tipos de ligadores metálicos

- Grampos

Esta técnica é idêntica à dos parafusos com a diferença que, neste caso, não há penetração na peça a reforçar. Mediante a utilização de dois parafusos de cada lado da peça, posicionados um de cada lado da peça e passando através de uma chapa, obtém-se a força de aperto necessária.

- Cintagem

Nesta técnica utilizam-se tiras metálicas fechadas e apertadas mecanicamente, a envolver toda a extensão do troço fendilhado. É recomendável um espaçamento das tiras entre 15 a 25 cm quando em zonas centrais, e mais apertado nos topos dos elementos fendidos. A eficácia desta técnica é algo duvidosa, incorrendo em riscos por exemplo da retracção poder tornar o aperto ineficaz.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira é feito pelo reforço das fixações através de peças de aço, de forma a melhorar a resistência e rigidez da estrutura. A reparação das ligações em estruturas de madeira de coberturas pelo aperto de cintas e tirantes metálicos e pela substituição ou adição de parafusos e pregos, eventualmente através de empalmes.

Principais aplicações:

Reforço e consolidação dos nós das estruturas, na presença de elementos fendilhados na zona das ligações, ou na substituição dos elementos de ligação já existentes, quando se encontram deteriorados, frequentemente pela corrosão. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável aos nós pernas-linhas, linha-pendural, pendural-escora.

Materiais utilizados:

Parafusos, pregos, cintas e cavilhas de aço inoxidável ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e legibilidade da intervenção. Técnica tradicional e económica.

Inconvenientes: Em casos muito graves o reforço das ligações poderá ser considerado inestético.

5.3.3.2. CONSOLIDAÇÃO DOS NÓS NAS ESTRUTURAS DE MADEIRA POR REFORÇO COM PEÇAS DE MADEIRA COLADAS

A consolidação dos nós é uma das aplicações características do reforço com barras coladas em estruturas de madeira em coberturas. Consiste na ligação de peças com barras de reforço e a reconstrução da madeira perdida com argamassa de epóxico.

A técnica de reforço da ligação entre peças/juntas com placas de madeira consiste na execução de um corte de forma triangular cujo vértice se localiza no canto de ligação entre as duas peças, nesta zona de corte será posteriormente colocada uma outra peça de madeira, que será solidarizada a ambas as peças com recurso a injeção de resina.

Deverá ser efectuado o corte a 45° das peças que se pretendem ligar e uma abertura, com forma triangular, no canto de ligação entre as duas peças. São executados furos em cada uma das peças de ligação, garantindo que estes se encontram simétricos. Coloca-se a peça de ligação de madeira na abertura e os furos são injectados com resina, até que esta atinja a totalidade da superfície da peça de ligação.

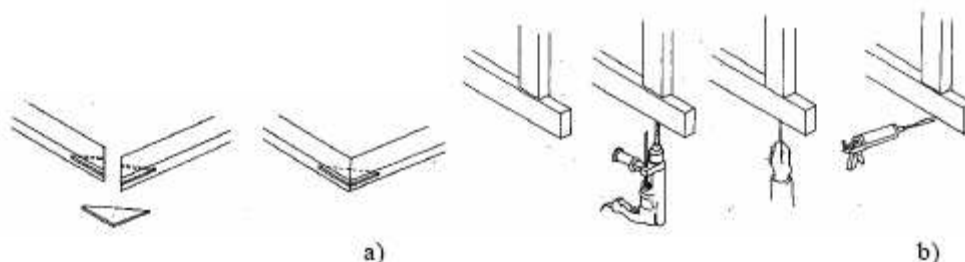


Figura 116 – Reforço de ligações com elementos de madeira, execução do reforço de ligações de topo (ROTAFIX, 2007)

No caso de peças partidas, nomeadamente devido a roturas junto a nós, a técnica de reparação com resina de epóxico é mais eficaz na união de peças quando na junta de colagem a resina trabalha por aderência tangencial. Na maioria dos casos a degradação ou a falha produz-se próximo dos meios de ligação, onde se ligam várias peças.

Nos elementos partidos poderão acrescentar-se secções de reforço para posteriormente proceder à injeção do de epóxico nas juntas.

Normalmente, os tirantes das asnas com comprimentos superiores a 8, 10 metros fabricam-se mediante empalmes de peças com uniões. A capacidade de transmissão de certos empalmes é reduzida. Frequentemente são encontradas falhas em relação aos esforços cortantes nos denteados de transmissão e nos elementos metálicos de reforço.

Uma solução que aumenta a eficiência da ligação, mas que ainda é pouco utilizada, é a colocação de resina de epóxico na ligação madeira/madeira e no elemento de ligação embebido em resina de epóxico. O elemento de fixação mecânico funciona ao corte, conseguindo-se aumentar a sua capacidade resistente através da colagem (UNE ENV 1993-2)

Descrição resumida:

Consiste no reforço dos nós por ligação de peças com barras de reforço de madeira embebidas e a reconstrução da madeira perdida com resinas de epóxico.

Principais aplicações:

Consolidação de nós danificados devido a má execução original, esforços excessivos, ou deterioração dos ligadores. Em asnas é preferencialmente aplicável a nós de ligação pernas-pendural, e pernas-linha, linha-pendural. Reforço do empalme dos tirantes, nos casos de escorregamento nas ligações (a estrutura pode sofrer deformações elásticas em consequência dos deslizamentos que se produzem nas ligações).

Materiais utilizados:

Placas de madeira nova coladas com resinas de epóxico.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Manutenção dos materiais originais. Solução relativamente simples de executar e que aumenta a eficiência das ligações.

Inconvenientes: Técnica com reduzida validação experimental e que exige operários especializados. Alteração da rigidez das ligações originais.

5.3.3.3. CONSOLIDAÇÃO DE LIGAÇÕES COM RESINAS DE EPÓXIDO E CHAPAS METÁLICAS

Procedimento-tipo:

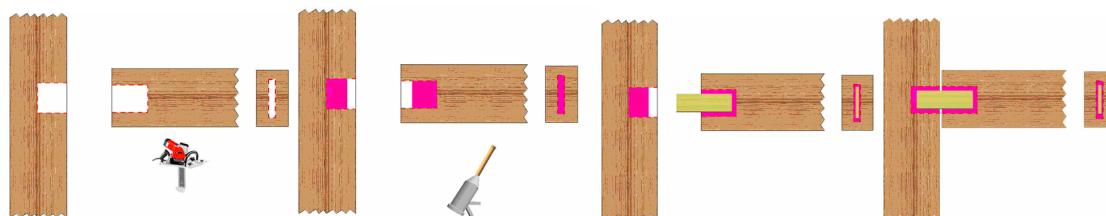


Figura 117 – Esquema de execução de reforço de ligação com resinas e chapas (Rotafix, 2007)

- Cortar negativo com serra eléctrica;
- Aspirar madeira cortada;
- Injetar o volume calculado de resina tixotrópica de epóxico;
- Fixar a chapa metálica de um lado;

- Fixar a chapa metálica do outro lado e escorar a ligação;
- Deixar curar a resina.

- *Ligações por chapas interiores coladas*

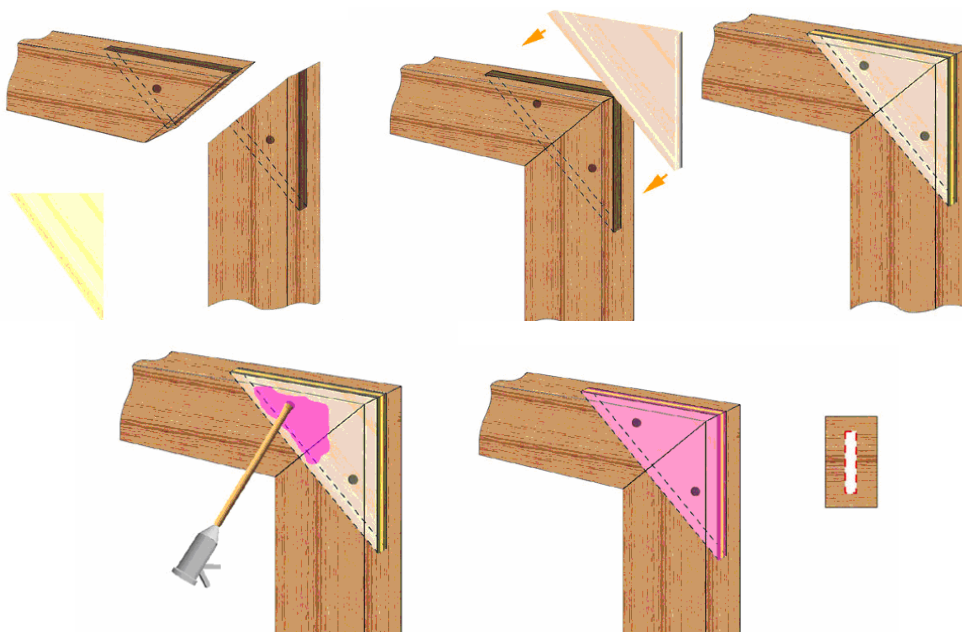


Figura 118 – Esquema de execução de reforço de ligação de canto com resinas e chapas
(Rotafix, 2007)

Procedimento-tipo:

- Abrir uma ranhura com o tamanho da chapa metálica a inserir na ligação;
- Inserir a chapa metálica na ligação;
- Acertar o posicionamento da chapa metálica com os furos abertos para injeção;
- Injetar resina de epóxi tixotrópica pelos furos;
- Verificar que o espaço entre a chapa e as peças de madeira foi totalmente preenchido pela resina e deixar curar.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira é feito por introdução de chapas de aço, no interior das peças de madeira, nas ligações.

Principais aplicações:

Consolidação de nós danificados devido a má execução original, esforços excessivos, ou deterioração dos ligadores. Em asnas é preferencialmente aplicável a nós de ligação pernas-pendural, e pernas-linha.

Materiais utilizados:

Chapas de aço inoxidável ou de aço galvanizado e resinas de epóxico.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Manutenção dos materiais originais.

Inconvenientes: Técnica com reduzida validação experimental e que exige operários especializados.

Introdução de materiais diferentes dos originais.

5.3.3.4. CONSOLIDAÇÃO DE LIGAÇÕES COM RESINAS DE EPÓXIDO E VARÕES DE AÇO

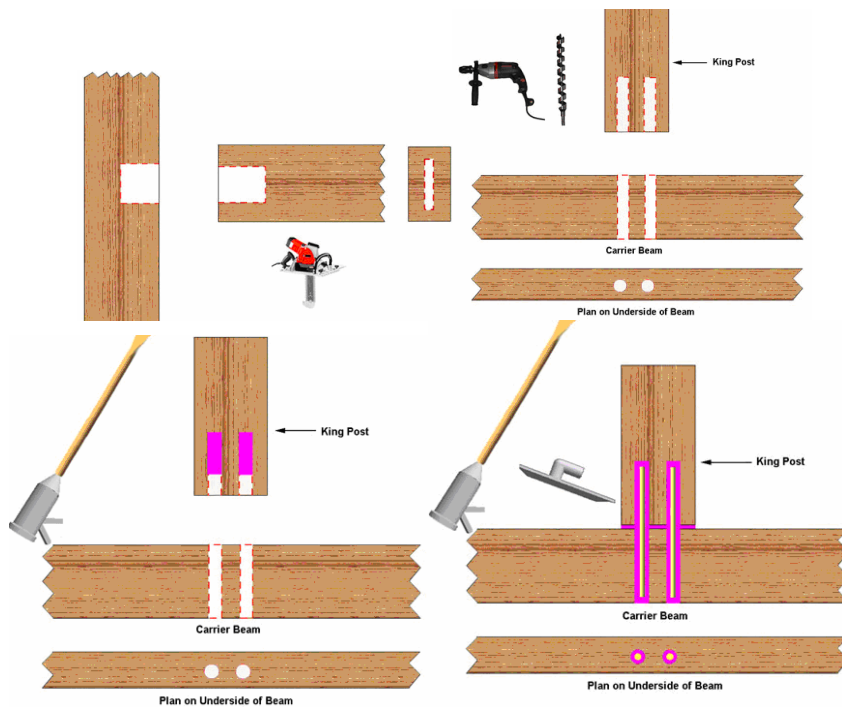


Figura 119 – Esquema de execução de reforço de ligação em T com resinas e chapas (ROTAFIX, 2007)

Procedimento-tipo:

- Furar as peças a ligar;
- Injectar os furos com o volume calculado de resina de epóxico tixotrópica;
- Inserir e centrar os varões de aço;
- Selar os furos nas faces visíveis de acordo com o aspecto pretendido.

Descrição resumida:

O reforço dos nós é feito por fixação de varões de aço envolvidos em resinas de epóxico.

Principais aplicações:

Consolidação de nós danificados devido a má execução original, esforços excessivos, ou deterioração dos ligadores. Em asnas é preferencialmente aplicável a nós de ligação pernas-pendural, e pernas-linha, linha-pendural.

Materiais utilizados:

Varões de aço inoxidável ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão, resinas de epóxico

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e legibilidade da intervenção.

Inconvenientes: Alteração da rigidez das ligações originais.

5.3.3.5. CONSOLIDAÇÃO DE LIGAÇÕES POR INJEÇÃO COM RESINAS DE EPÓXIDO

O reforço de ligações muito danificadas e com extensa fendilhação da madeira pode envolver o empalme e a injeção de toda a zona da ligação com resinas de epóxico. Nestes casos, é essencial que estas intervenções sejam precedidas por uma análise estrutural, de forma a avaliar os efeitos da redistribuição de esforços associados à rigidificação dos nós estruturais.

É muito frequente a degradação biológica localizada em torno de um nó estrutural em consequência de infiltrações e de retenção de humidade nos interstícios criados pela junção das várias barras que concorrem no nó. Apresenta-se de seguida o esquema de consolidação pela aplicação de resinas de epóxico, num nó simples que correspondente à junção de uma perna com a linha de uma asna de cobertura.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira junto aos nós é feito por injeção de toda a zona da ligação com resinas de epóxico.

Principais aplicações:

O reforço de ligações muito danificadas e com extensa fendilhação da madeira. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a nós de asnas entre pernas, pendural, escoras e linhas.

Materiais utilizados:

Resinas de epóxico.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade.

Inconvenientes: Alteração da estética original dos elementos à vista. Alteração da rigidez das ligações originais.

5.3.3.6. LIGAÇÕES DE MADEIRA COM REFORÇO POR FRP

A técnica de reforço de ligações de topo entre elementos de madeira consiste na perfuração e colagem à madeira de cavilhas de FRP pultrudidas, em ambos os topos a ligar, que actuam pelo desenvolvimento de força axial segundo o eixo longitudinal da peça.

Ligações coladas bem dimensionadas e executadas podem ser extremamente eficientes, com vantagens em termos de facilidade de realização, desempenho, estética e custo.

Embora as colas estruturais permitam a realização de ligações simples entre elementos de madeira com elevada eficácia, como é o caso da ligação entre lamelas de elementos lamelados colados e as ligações do tipo *finger-joint* (de entalhes múltiplos), o recurso a cavilhas é normalmente usado para obter ligações estruturais coladas. Estas cavilhas, tradicionalmente metálicas (aço) ou de madeira rija, podem ser substituídas, com algumas vantagens, por cavilhas pultrudidas de materiais compósitos.

Uma das técnicas de realização de ligações de madeira topo a topo envolve a perfuração e colagem à madeira de cavilhas de FRP pultrudidas, em ambos os topos a ligar, actuando pelo desenvolvimento de força axial segundo o eixo longitudinal da peça. É referida para este fim a utilização de colas de epóxico, de poliuretano, de poliéster, ou ainda acrílicas (Mettem et al, 1999). A ligação de topo é eventualmente complementada com a aplicação de cavilhas secundárias do mesmo tipo, neste caso introduzidas transversalmente para melhorar o comportamento da madeira na direcção perpendicular às fibras.

Devem ser efectuados dois furos (de baixo para cima) na zona de ligação, garantindo que atravessam toda a secção da viga e que a profundidade é suficiente para atingir o topo do outro elemento.

Posteriormente é injectada a quantidade de resina necessária para colocar os varões pultrudidos, que são centralizados no respectivo furo, após o que se procede ao preenchimento da totalidade do furo com resina.

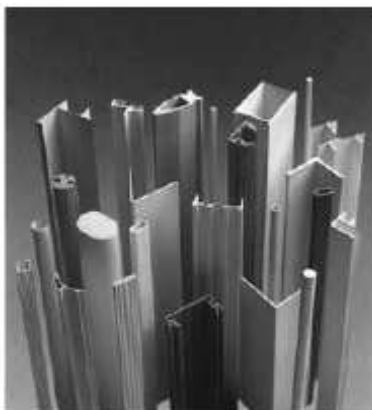


Figura 120 – Perfis pultrudidos de FRP

Esta técnica tem vindo a ser desenvolvida com vista à ligação de série incorporada em sistemas construtivos novos, embora possa em princípio ser estendida à ligação entre madeira velha e madeira nova numa situação de substituição parcial de elementos de madeira com degradação biológica, por exemplo, particularmente em situações em que se pretende reduzir a visibilidade dos ligadores.

-Reforço local de zonas de ligação mecânica

As ligações mecânicas são normalmente o ponto mais sensível e crítico das estruturas de madeira. Na maioria dos casos, a transmissão e distribuição de esforços é feita através de chapas aplicadas à face ou embebidas nos elementos de madeira, presas a estes através de ligadores do tipo cavilha (cavilhas, pregos ou parafusos de porca).

O desenvolvimento de esforços de corte e de tracção transversal às fibras na madeira sob a acção dos ligadores pode conduzir à rotura frágil da ligação, antes que consiga desenvolver-se plasticidade nos ligadores metálicos e a capacidade de carga conseqüentemente prevista. Os FRP são frequentemente usados na zona da ligação, com o objectivo de aumentar a sua resistência, através da melhoria do comportamento em tracção perpendicular às fibras da madeira abrangida pela ligação. Deste modo, evita-se a ocorrência da rotura na madeira, passando o desempenho da ligação a ser determinado pela capacidade de carga da madeira, bem como pela resistência e qualidade dos ligadores. A ductilidade naturalmente é também aumentada, por vezes de forma notável.

A técnica de reforço mais correntemente estudada passa pela utilização de um tecido ou tela de fibra de vidro que é enrolado em torno da zona abrangida pela ligação mecânica.

Previamente à aplicação do material de reforço, é conveniente aplicar à madeira um primário destinado a melhorar a aderência do sistema. Duas ou mais camadas de tecido de fibra de vidro são normalmente enroladas à mão em torno da madeira, pressionando-o sobre uma cola de epóxico de dois componentes, previamente espalhada sobre a superfície. O emprego de resinas de epóxico evita a necessidade de aplicar pressão elevada para a colagem.

Estudos nesta área (Haller e Wehsener, 1999) descrevem um conjunto de ensaios de ligações reforçadas deste modo com tecido de fibra de vidro (do tipo E, com 200g/m²). Os ensaios realizados mostraram que este reforço é capaz de aumentar a resistência da ligação em cerca de 50% em flexão, 50% em tracção, e 35% no ensaio de corte. Destaca-se ainda que a orientação do tecido relativamente às fibras da madeira é igualmente importante, sendo que a disposição +45°/-45° é mais eficaz no reforço relativamente à transmissão de esforços de corte e tracção paralela às fibras, enquanto a disposição 0°/90° é mais eficaz no reforço de ligações sujeitas à flexão.

Outros autores (Larsen, 1994) afirmam que, para ligações com cavilhas ou parafusos de porca sujeitas a esforços perpendiculares às fibras da madeira, o reforço permite mobilizar a total capacidade de carga da ligação, mesmo para espaçamentos entre ligadores e distâncias destes aos bordos e topos da madeira muito reduzidos. Os resultados das experiências e ensaios recentes sugerem que as ligações apresentam uma relação entre a resistência e o tempo de actuação das cargas semelhante à determinada para a madeira sem reforço. Este aspecto é determinante no dimensionamento das ligações.

Descrição resumida:

A técnica de reforço de ligações de topo entre elementos de madeira consiste na perfuração e colagem à madeira de cavilhas de FRP pultrudidas, em ambos os topos a ligar, que actuam pelo desenvolvimento de força axial segundo o eixo longitudinal da peça.

Principais aplicações:

Esta técnica tem vindo a ser desenvolvida com vista à ligação de série incorporada em sistemas construtivos novos, embora possa, em princípio, ser estendida à ligação entre madeira velha e madeira nova numa situação de substituição parcial de elementos de madeira com degradação biológica, por exemplo, particularmente em situações em que se pretende reduzir a visibilidade dos ligadores.

Materiais utilizados:

Cavilhas de FRP pultrudidas. Resina de epóxico injectada nos furos onde são colocados os varões.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Reduzida visibilidade dos ligadores. Aumento do desempenho mecânico da ligação relativamente aos materiais tradicionais.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais. Técnica experimental ainda não devidamente validada em casos reais e por isso de elevada especialização.

5.3.4. PROBLEMAS NOS APOIOS

Rotações, insuficiente entrega dos elementos estruturais em muros ou sobre outros. Perda da secção resistente provocada pela acção de agentes biológicos (podridão).

As zonas dos apoios das asnas, constituem lugares de risco de podridão, sobretudo se encontram em zonas com humidade. Como consequência, perde-se secção útil, o que implica falta de superfície para o apoio. No entanto, o resto da peça encontra-se em perfeitas condições, sendo necessário actuar para recuperar a estabilidade que se encontra comprometida. Uma das opções é

a substituição completa da peça por outra nova, o que em muitas ocasiões é a solução mais económica. Mas podem empregar-se diversas soluções de reabilitação, que a seguir se descrevem.

5.3.4.1. INTRODUÇÃO DE NOVO APOIO SOBRE LINHA ADJACENTE AO MURO

Uma solução frequentemente utilizada em estruturas antigas, que tenham sofrido danos de podridão nas cabeças das vigas. Consiste em dispor uma nova linha de apoio adjacente ao muro, geralmente em madeira apoiada nuns cachorros de pedras encastrados no muro. Estes apoios podem ser de outro tipo de material, por exemplo em cantoneiras de ferro. O principal inconveniente é a carga que é transmitida ao muro descentrada em relação ao eixo. Os apoios sobre os cachorros encastrados no muro provocam uma flexão que favorece a tendência para o desmoronamento.

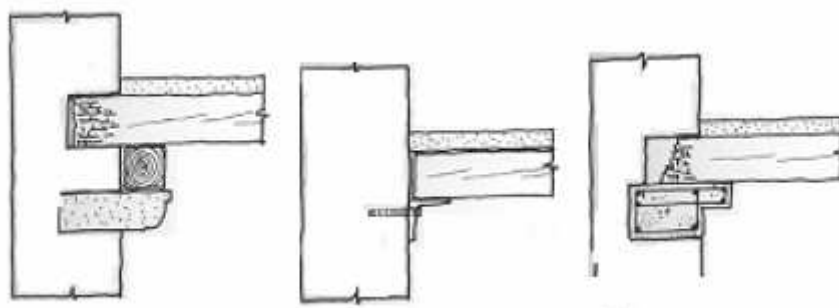


Figura 121 – Entrega das estruturas de madeira de coberturas em paredes com novos apoios (Arriaga, 2002)

Descrição resumida:

O reforço dos apoios de asnas e de estruturas de cobertura é feito pela aplicação de um novo apoio adjacente ao muro, com recurso a perfis metálicos (cantoneiras), cachorros de pedra, de betão ou de madeira.

Principais aplicações:

Em casos de topos de peças danificadas, tradicionalmente por danos biológicos, junto as entregas em paredes de alvenaria. No caso das asnas, é aplicável aos apoios junto à ligação pernas-linhas.

Materiais utilizados:

Perfis metálicos (cantoneiras) de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão, novos cachorros de pedra, de betão ou de madeira nova sã e tratada.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Legibilidade simplicidade e eficácia da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais (no caso do aço e betão) e alteração da estética da estrutura.

5.3.4.2. REFORÇO DOS APOIOS COM PERFIS METÁLICOS

A utilização de perfis metálicos, como reforço das zonas de apoio das vigas ou apoios de asnas, é um recurso frequente em obras de reparações antigas, e representa um carácter pouco elaborado ou de emergência. Uma das soluções frequentemente utilizadas, é orientar uma estrutura de apoio, paralela ao elemento de suporte, de acordo com a extensão das degradações que se verificam nos apoios das vigas existentes (figura 122).

Encontra-se com frequência, reparações pontuais das cabeças das peças colocando perfis em ferro para aumentar a peça e garantir o apoio. Estas peças de ferro são ligadas à madeira através de parafusos. A sua forma de trabalho é complexa e de difícil justificação pelo cálculo, podendo-se considerar como simples remendos. Na mesma situação pode utilizar-se a solução clássica de criar um apoio na pedra para dar apoio às vigas.

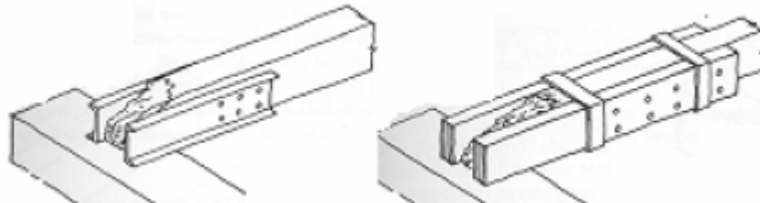


Figura 122 – Reforço com perfis metálicos ou peças de madeira unidas por braçadeiras metálicas (Arriaga, 2002)

Uma versão com maior consistência, é a utilização de perfis metálicos geralmente perfis do tipo UPN, que se ligam à madeira sã com comprimentos na ordem dos 50 a 80 cm e são ligados através de pernos metálicos à madeira (figura 123).

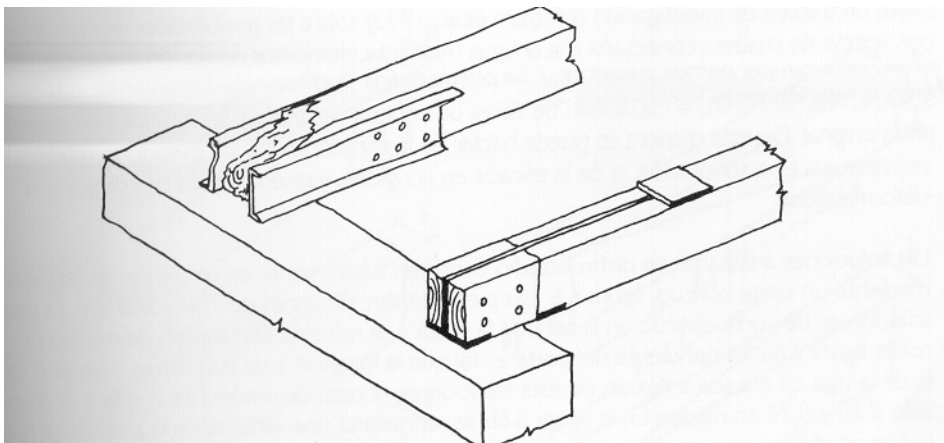


Figura 123 – Reforço com chapas metálicas embutidas na madeira (Arriaga, 2002)

A experiência prática desta solução dá origem a um custo superior à substituição da zona afectada. Por outro lado, como a ligação é feita com elementos mecânicos de fixação (pernos, parafusos, etc.) requerem uma deformação aquando da sua entrada em carga. A solução pode ser excessivamente deformável comparada com a solução estrutural original. Na figura 123 descreve-se a solução de aumento de comprimento da peça mediante um encaixe no interior da secção de um perfil em ferro cuja eficácia é maior que a anterior.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de apoio das estruturas de madeira é feito pela fixação de perfis e peças de aço, nas zonas danificadas até ao apoio sobre os muros.

Principais aplicações:

Em casos de topos de peças danificadas, tradicionalmente por danos biológicos, junto as entregas em paredes de alvenaria. No caso das asnas, é aplicável aos apoios junto à ligação pernas-linhas.

Materiais utilizados:

Chapas e perfis laminados de aço inoxidável ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e legibilidade da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais. Possibilidade de condensações nas chapas de ligação à madeira.

5.3.4.3. SOLUÇÕES COM RECURSO A NOVA MADEIRA A ACRESCENTAR À ANTIGA

A consolidação e reforço, usando peças de madeira unidas com meios mecânicos, têm um comportamento semelhante aos reforços metálicos. A solução mais imediata é de utilizar peças de madeira novas e de ligá-las mediante pernos, cravos, parafusos ou cintas metálicas, num tramo suficiente de madeira boa (figura 124). Normalmente, a nova secção será equivalente à área de secção degradada da peça a consolidar.

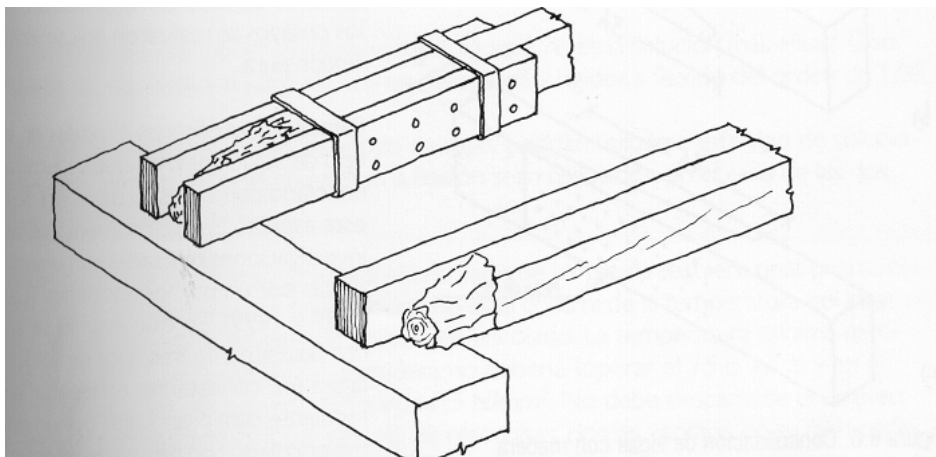


Figura 124 – Acréscimo de secção com nova madeira (Arriaga, 2002)

Existe um trabalho de investigação (Mettem 1993) sobre as possibilidades de reparação, com o recurso a madeira ligada à antiga, mantendo esta, com elementos de fixação mecânica (samblagens, cavilhas, parafusos, cintas, etc.). Pode definir-se a eficácia de uma união deste tipo, como a relação entre a capacidade de carga da peça reparada, e a capacidade de carga da peça original. Desta maneira, pode falar-se da eficácia à flexão quando se refere à resistência a esta solicitação, ou da eficácia à rigidez quando se trata de comparar com a deformabilidade.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de apoio das estruturas de madeira é feito pela fixação de novas peças de madeira, nas zonas danificadas até ao apoio sobre os muros.

Principais aplicações:

Em casos de topos de peças danificadas, tradicionalmente por danos biológicos, junto as entregas em paredes de alvenaria. No caso das asnas, é aplicável aos apoios junto à ligação pernas-linhas.

Materiais utilizados:

Madeira nova, tratada e se possível de espécie idêntica à original, e elementos de fixação mecânica metálicos (cavilhas, parafusos, cintas) em aço inox ou aço galvanizado.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e manutenção do mesmo tipo de material na estrutura.

Inconvenientes: Dificuldades em garantir o perfeito funcionamento da ligação peça antiga – peça nova e na garantia do estado mecânico e de saneamento da madeira danificada original.

5.3.4.4. PRÓTESES DE ARGAMASSA DE EPÓXIDO E/OU VARÕES DE REFORÇO EM APOIOS

Os apoios das madres pode ser reforçado com próteses de argamassa de epóxido e/ou varões de reforço (descrito anteriormente).

A ligação entre a perna e a linha de uma asna, e todas as ligações podem ser reforçadas, também com argamassa de epóxido, placas de aço e varões de reforço (figura 125).

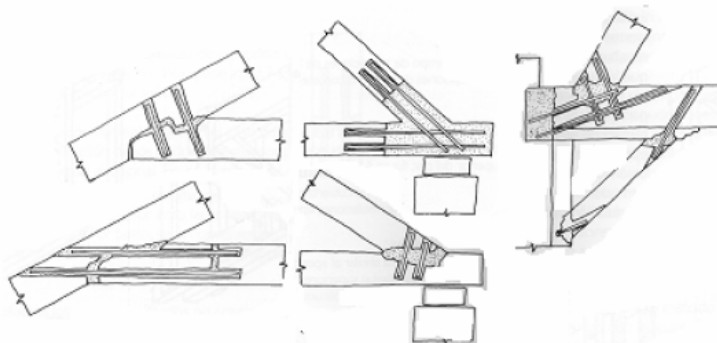


Figura 125 – Exemplos de próteses e reforço de ligações e apoios

As estruturas de madeira das coberturas são um grande campo de aplicação onde se empregam composições com resina de epóxido e reforços em aço.

A reconstrução dos apoios com resinas de epóxido e barras de fibra de vidro ou varões de aço com aderência melhorada tem as seguintes desvantagens e fragilidades:

- a duvidosa durabilidade das resinas de epóxido devido à perda de características a altas temperaturas;
- a rigidificação dos nós com perda de capacidade de se deformar por acção higrotérmica ou de arranjo estrutural com pequenas rotações.

Analisando uma cobertura em que as ligações são realizadas por parafusos com porca e anilha, que devido à retracção se apresentam frouxas e onde se verifica a rotura por corte em algumas barras, verifica-se que a rotura é materializada pela abertura de fendas que nascem no nó e se encaminham para o topo mais próximo. Seguidamente, expõe-se o procedimento para uma possível reabilitação dos elementos degradados.

- escoramento com levantamento da estrutura de modo a anular ou pelo menos atenuar a exagerada flecha existente;
- limpeza a fundo das zonas a consolidar por meio de escoras de aço ou jactos de agulheta de ar comprimido;
- reparação da zona degradada se for necessário, com o posicionamento feito com pregos de possíveis fracções destacáveis ou facilmente destacáveis do elemento a recuperar;

- selagem das juntas e fendas por meio de gel de resina de epóxico aplicado à espátula, deixando várias aberturas pontuais ao longo do seu desenvolvimento;
- pintura de toda a zona com resina de epóxico de baixa viscosidade, de forma a obturar possíveis fendas de pequena abertura;
- preenchimento dos vazios com resina de epóxico, por meio da aplicação de cabeças de injeção, nas aberturas deixadas na superfície de selagem começando pela cabeça de cota inferior. A cabeça de injeção é alimentada por duas bombas doseadoras, uma para a resina de base e outra para o endurecedor, com uma pressão de cerca de 10 kg/cm², injecta-se a mistura na cabeça da injeção para que o material comece a aflorar na abertura adjacente, garantindo-se assim a completa e perfeita distribuição da cola, por todo o vazio.

Concluída a polimerização da resina, que se dá 24 h depois da sua aplicação à temperatura de 20 graus centígrados, promove-se o reaperto de todos os parafusos de porca das ligações, seguindo-se o alívio dos dispositivos de levantamento e a retirada do escoramento da estrutura, entrando esta em carga.

Aplicação de armadura inserida na parte sã da madeira (amputando as zonas nas quais existam problemas), sendo então restituída a forma das traves originais através do uso de betão de epóxico como material de enchimento. Esta técnica permite reconstruir os nós das estruturas, sem necessitar de uma substituição geral, aproveitando a estrutura existente.

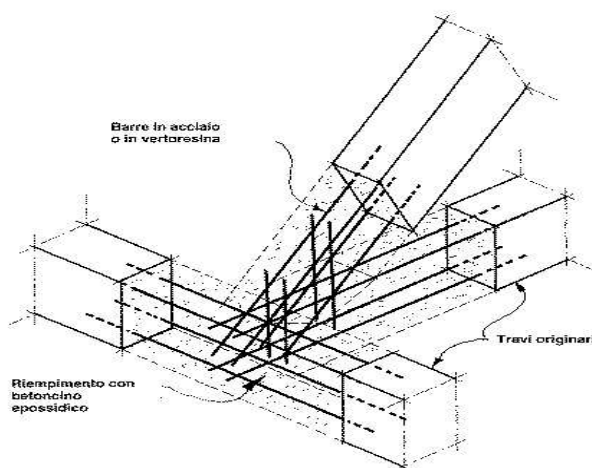


Figura 126 – Prótese de apoio de asna/frechal em resina reforçada com varões de fibra de vidro

Nas zonas de apoio degradadas, poderá executar-se a substituição da madeira através da colocação de armaduras na direcção, tanto do apoio como da asna em questão, preenchendo todo o espaço em falta com uma mistura de betão de epóxico.

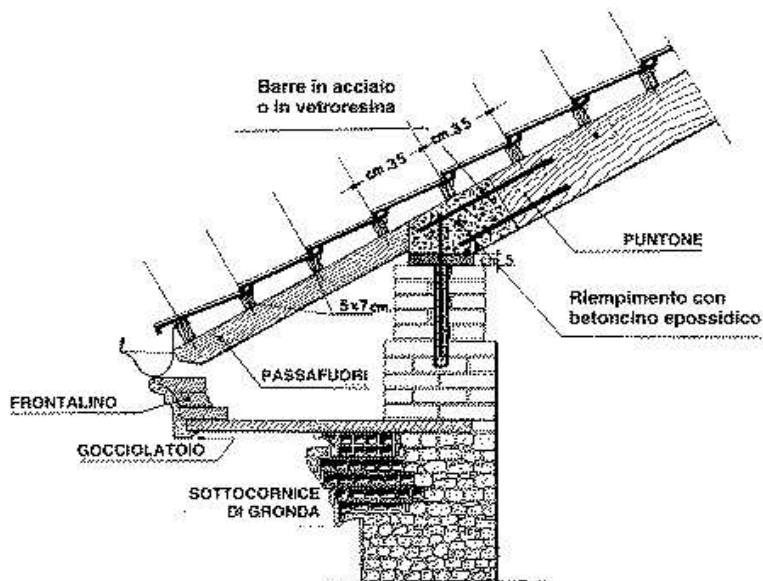


Figura 127 – Reforço de apoio de perna em muro com prótese em resina de epóxico e varões de aço

- Reparação de apoios danificados:

As partes de Madeira afectadas são substituídas por “Grout” de epóxico, ligada com conectores, de aço ou fibras de vidro envolvidas em de epóxico. O enchimento é feito contra um molde, após escoramento, e que pode ser removível, após a cura da resina, ou em madeira para ficar à vista.

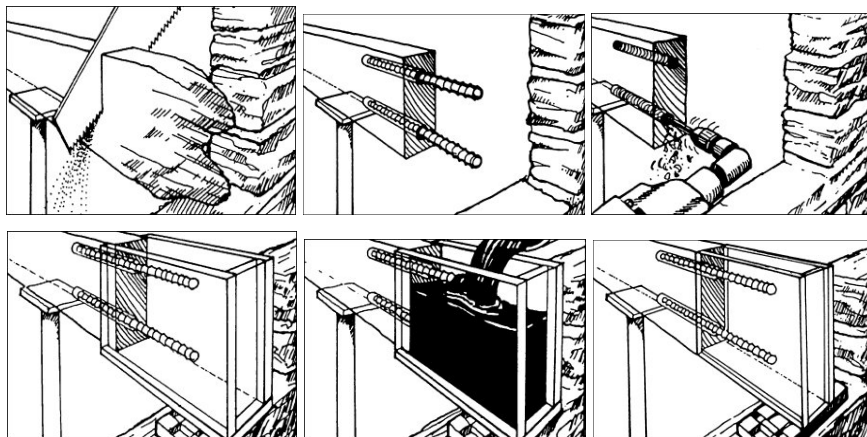


Figura 128 – Esquema de substituição de entrega danificada por prótese de epóxico
(ROTAFIX, 2007)



Figura 129 – Peças com furos para introdução de varões embebidos em resinas



Figura 130 – Esquema de diversas técnicas de substituição de entrega danificada por próteses de resina de epóxico (ROTAFIX, 2007)

- Asnas de apoio simples

A reparação de apoios degradados em asnas é um problema semelhante ao apoio de uma viga, com a vantagem de ser mais fácil de executar a reparação, pelo facto de não existirem andares superiores.

Uma das formas de reparar o apoio degradado consiste na consolidação com recurso a barras de ferro envolvidas com resinas de epóxico, através de furos oblíquos desde a face superior até ao apoio.

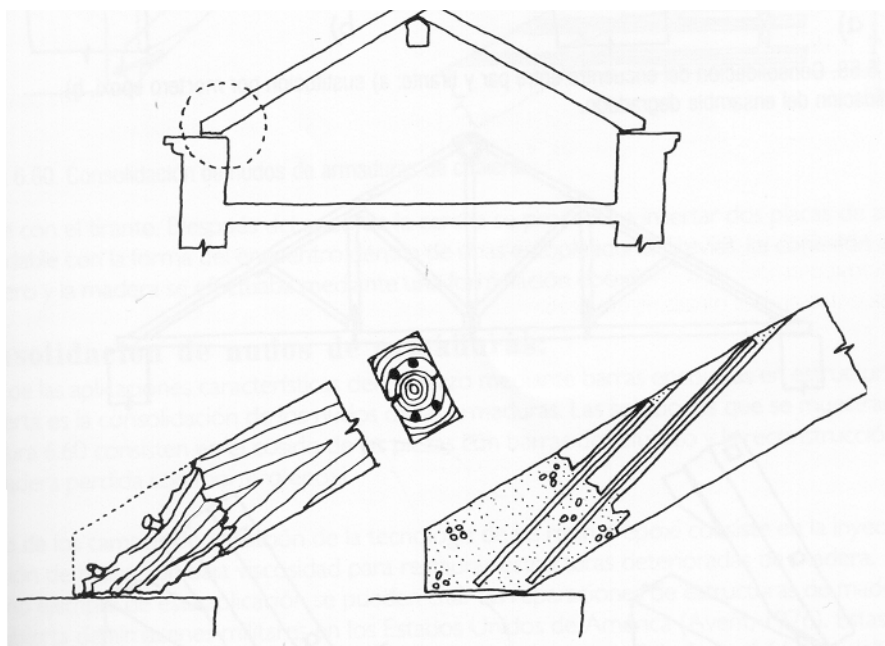


Figura 131 – Prótese de reforço de apoios de pernas de cobertura

- Asna tradicional

A solução de consolidação mediante a técnica de composição de epóxico é semelhante à situação de recuperação dos topos das vigas dos pavimentos e sua entrega nos apoios.

Uma solução possível é a reconstrução com argamassa de epóxico das zonas degradadas até ser possível ligar à zona boa, através de barras (figura 132). Muitas vezes, a zona de degradação limita-se à zona de ligação, que resulta muitas vezes pela retenção de águas de infiltração pela cobertura. Neste caso, reforça-se a união com barras de aço coladas e a substituição da zona degradada com argamassa de epóxico.

O apoio das vigas de pavimento e das coberturas é normalmente efectuado por encastramento parcial nas paredes/muros. Nestas zonas de apoio, é frequentemente verificado teores de

humidade elevados, provocados por infiltrações de águas e/ou pela deficiente ventilação. A combinação destas duas acções provoca a degradação da madeira, levando-a ao colapso total. Assim sendo, a recuperação destas zonas pode ser efectuada com recurso a argamassa de epóxido.

Reparação dos apoios de vigas de madeira

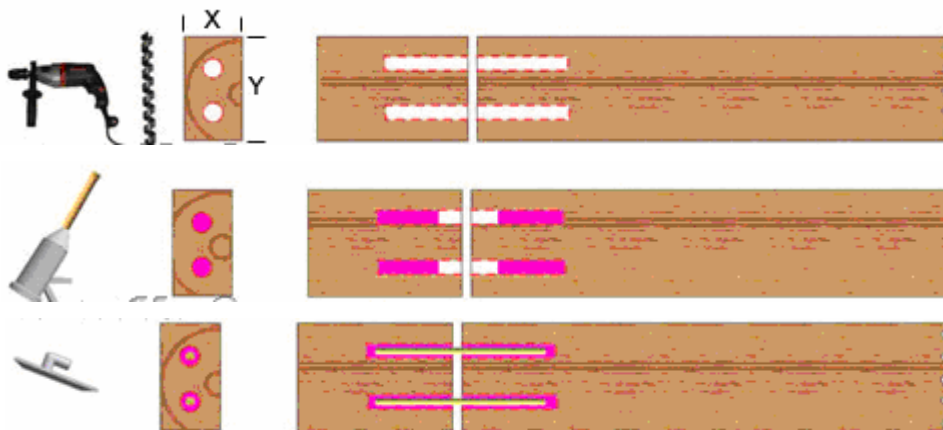


Figura 132 – Esquema de execução de reforço por introdução de varões (ROTAFIX, 2007)

Procedimento tipo:

- Marcar e furar com diâmetro e profundidade calculada;
- Injectar o volume calculado de resina de epóxido tixotrópica;
- Rodar e pressionar os varões contra a resina nos furos, verificar o total preenchimento dos furos;
- Deixar curar a resina; Remover suportes.

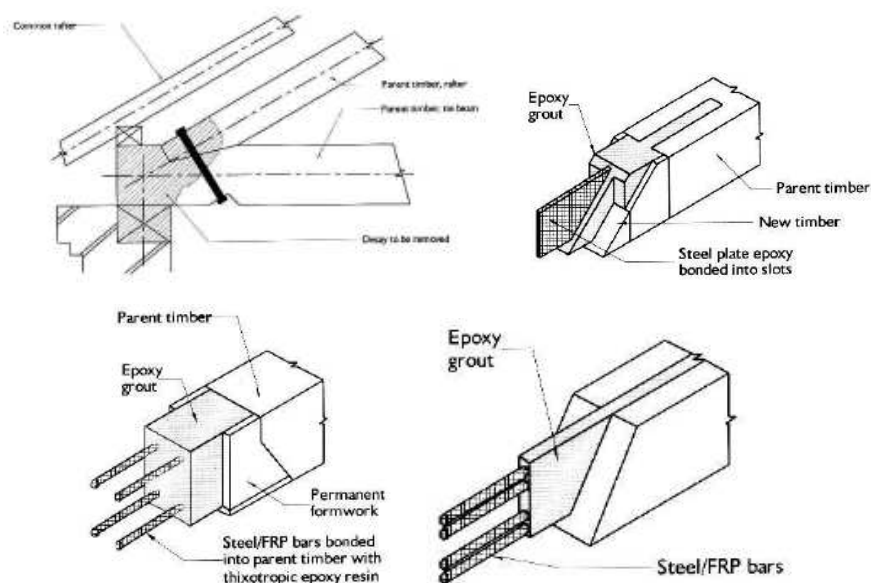


Figura 133 – Esquema de secção de peças reforçadas com varões (ROTAFIX, 2007)



Figura 134 – Reforço de vigas de madeira com fibras de carbono (Rodrigues, R., 2004)

As próteses podem também ser feitas com enchimento de peças com conglomerados à base de resinas de epóxico, armadas com varões de aço ou barras de fibra de vidro. Esta é uma técnica recente, actualmente muito usada. Todavia em muitos casos a utilização de próteses de madeira é preferível pois o enchimento das peças com resinas aumenta a rigidez dos nós, modificando a distribuição da rigidez na estrutura e os vínculos e conexões entre os elementos. Esta situação poderá ser acautelada através de uma complexa análise estrutural anterior à intervenção, que não será necessária se mantivermos o funcionamento da estrutura através de próteses de madeira.

Nos casos em que as pernas da asna se encontram com secção reduzida face aos esforços aplicados, o reforço pode também ser efectuado pela ligação de peças de madeira dispostas lateralmente à original, colada com argamassa de epóxico.

Descrição resumida:

O reforço dos apoios das estruturas de cobertura, nomeadamente de asnas, pode ser executado com próteses de argamassa de epóxico e varões de reforço.

Principais aplicações:

Reforço e consolidação dos elementos nos apoios de estruturas de madeira de coberturas, danificados, tradicionalmente por acção biológica em presença de elevada humidade. É aplicável a ligações entre pernas e linhas junto às entregas nos muros.

Materiais utilizados:

Resinas de epóxico, varões de aço ou de fibras de vidro envolvidas em de epóxico.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Solução mecanicamente eficaz.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais. Técnica bastante especializada e com pouca experiência de aplicação.

5.3.4.5. SUBSTITUIÇÃO DE PARTES DE ELEMENTOS RECORRENDO A PRÓTESES

As técnicas de reparação com próteses são particularmente indicadas para situações em que os danos são localizados. Isso sucede nos pontos onde existe maior teor de humidade na madeira que são usualmente os apoios em paredes.

O tipo de prótese depende da natureza do dano e da solicitação (compressão, tracção, torção, flexão, corte) que existe sobre o elemento. Os casos mais difíceis são aqueles em que existe tracção ou flexão, e os mais fáceis, aqueles em que existe apenas compressão.

Frequentemente, a sobreposição de peças, tendo em vista garantir a capacidade resistente necessária, é tão vasta, que é mais prático e económico fazer a substituição das peças danificadas.

A fim de que não exista “rejeição” da prótese, no sentido estético mas também de comportamento, em especial do ponto de vista higrométrico-deformabilidade, deve-se escolher uma madeira para a prótese de espécie e teor de humidade idênticos aos da peça original. Uma prótese em madeira com um teor de humidade superior ao do ambiente onde irá ser aplicada provocará inevitavelmente o destaque, com deformação, rotação e fissuração.

Assim, seria ideal que a madeira utilizada na prótese fosse reciclada do existente em obra, outra hipótese será recorrer a sobreposição de tábuas que pela sua espessura reduzida são fáceis de secar e amadurecer em obra.

A união da prótese com a madeira da peça original será feita por intermédio de chapas e parafusos de aço inox ou devidamente protegido contra a corrosão (*ROTAFIX*).



Figura 135 – Prótese de nova madeira na ligação perna-linha (*ROTAFIX*, 2007)

Com ligação entre prótese de madeira nova e peças antigas através de conectores (varões) em aço envolvidos em resina.

- Substituição do apoio de uma asna deteriorado por uma peça idêntica do mesmo material

Para a aplicação desta técnica, efectua-se a remoção da zona danificada fazendo a sua substituição por uma peça idêntica do mesmo material. A ligação entre a zona de apoio existente e o novo elemento será feita através de elementos metálicos auxiliares, fixados mecanicamente com pregos ou parafusos e/ou fixadas quimicamente com recurso a resina de epóxico.

Para tal, deve-se escorar a estrutura, cortar os elementos deteriorados e repor o elemento recorrendo a uma peça de madeira que deverá ter dimensão idêntica à do elemento retirado, estar seca, ser de castanho ou casquinha, preferencialmente madeira velha proveniente de demolições de edifícios antigos. Também se poderá utilizar o pinho marítimo, estabilizado do ponto de vista do teor em água (cerca de 12%), assegurando-se o seu tratamento em autoclave, com produtos preservadores anti-fungo e anti-caruncho, com penetração profunda dos produtos seleccionados, habitualmente sais de cobre e outros. Na ligação entre a viga e o novo elemento são colocadas chapas metálicas (por pregagem ou aparafusamento) aplicadas em cada uma das faces da viga, com um comprimento que assegure uma sobreposição de pelo menos 0.20 m em relação ao eixo da secção a ligar, altura e espessura compatíveis com a resistência que se pretende assegurar.

As chapas de aço deverão ser convenientemente tratadas contra a corrosão.

A ligação à parede efectuada com varões ou barras de ferro, pregadas à linha da asna e chumbadas na alvenaria.

Uma aplicação, que constitui desde há algumas décadas prática corrente em acções de reforço / consolidação de estruturas de madeira, envolve a substituição de troços degradados de elementos estruturais (por exemplo na zona das entregas em paredes exteriores) por argamassas de resina de epóxico, ou por novos troços inteiramente de madeira.

A ligação entre a madeira nova ou a argamassa e a madeira existente é estabelecida por meio de varões, que podem ser de aço inox ou de FRP (fibras de vidro / poliéster) colados à madeira geralmente por meio de uma resina de epóxico ou de poliéster.

As reparações podem ser feitas sem perturbar as restantes partes do edifício, envolvendo o mínimo de substituição de materiais. Frequentemente, o troço refeito é formado por uma zona central de argamassa de resina de epóxico envolvida por madeira, a qual constitui assim uma cofragem perdida, com as vantagens da redução de peso e de custo e de ser mantida a aparência do elemento original de madeira.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira é feito pela substituição da madeira original deteriorada pela aplicação de uma prótese de nova madeira.

Principais aplicações:

As técnicas de reparação com próteses são particularmente indicadas para situações em que os danos são localizados. Isso sucede nos pontos onde existe maior teor de humidade na madeira que são usualmente os apoios em paredes.

Materiais utilizados:

Madeira nova tratada, chapas e parafusos de aço inox ou devidamente protegido contra a corrosão, ou de varões de FRP.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Manutenção do tipo de material da estrutura.

Inconvenientes: Uma prótese em madeira com um teor de humidade superior ao do ambiente onde irá ser aplicada provocará inevitavelmente o destaque, com deformação, rotação e fissuração.

5.3.4.6. CONSOLIDAÇÃO DOS NÓS NAS ESTRUTURAS DE MADEIRA COM REFORÇO COM BARRAS COLADAS

A utilização de placas como elementos de reforço é menos frequente, no entanto é uma alternativa. Consiste essencialmente na construção de peças de aço inoxidável que são colocadas em negativos feitos na asna, os quais são preenchidos com argamassa de epóxido ou simplesmente com de epóxido.

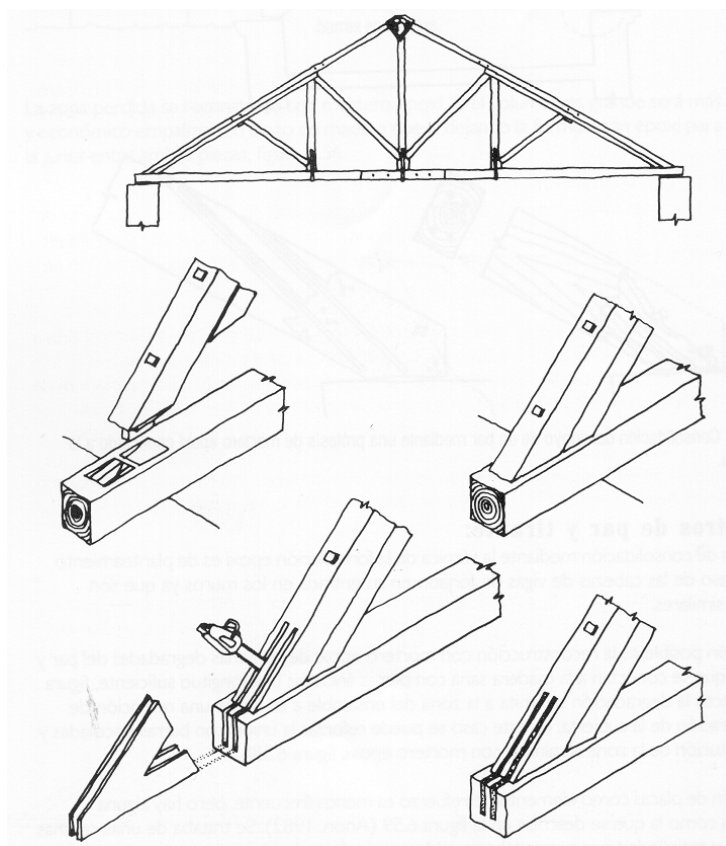


Figura 136 – Reforço de nós nas estruturas de madeira com barras coladas (Arriaga, 2002)

Descrição resumida:

O reforço dos nós das estruturas é feito pela introdução de peças metálicas que são colocadas em negativos feitos na asna, os quais são preenchidos com argamassa de epóxico ou simplesmente com de epóxico.

Principais aplicações:

Reforço e consolidação de nós de estruturas de madeira, danificados, por fissuração ou com rigidez reduzida face aos esforços aplicados. No caso das asnas de coberturas, é preferencialmente aplicável a ligações de pernas/linhas e de pendural/pernas.

Materiais utilizados:

Chapas e perfis laminados de aço inoxidável ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão, resinas de epóxico.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Manutenção da estética da estrutura. Aproveitamento dos materiais originais e relativa simplicidade da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais e problemas de resistência ao fogo.

5.3.5. DEFICIÊNCIAS DE CONTRAVENTAMENTO

(ou inexistência, nos planos da cobertura, e eventuais afastamentos insuficientes entre asnas).

De entre os sistemas de contraventamento, existem dois dos mais usados na construção de estruturas de madeira de coberturas que são: as *Cruzes de Santo André* e as *Escoras de Boneca*. Ambos são bastante práticos e de simples execução com elementos de madeira. Como em todos os trabalhos de carpintaria civil é necessário que a madeira a utilizar esteja bem seca e esquadriada.

5.3.5.1. CRUZES DE SANTO ANDRÉ

Este contraventamento é bastante simples, consiste numa cruzeta em forma de "X" aberto. O cruzamento das peças é feito a meia-madeira e, tradicionalmente, devidamente pregado. As suas ligações aos prumos ou aos pendurais das asnas, são feitas por uma samblagem de dente pregada para eles. Correntemente os dentes das peças de cruzetas, cujo comprimento deve ser esperto, são acompanhados de respiga que entra na escarva aberta no prumo.

Podem actualmente utilizar-se nestas ligações chapas e parafusos de aço inox ou de aço galvanizado.

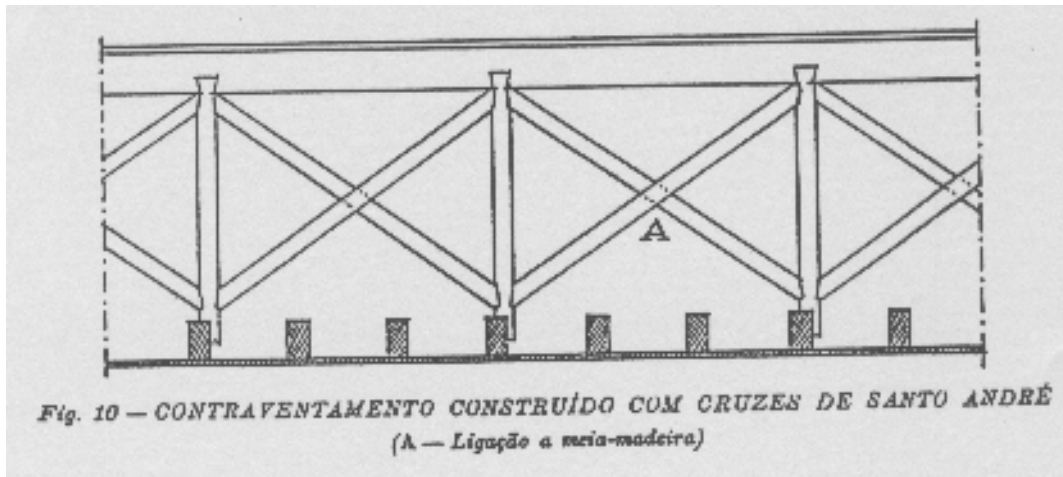


Figura 137 – Contraventamento por Cruzes de Santo André
(Costa, F)

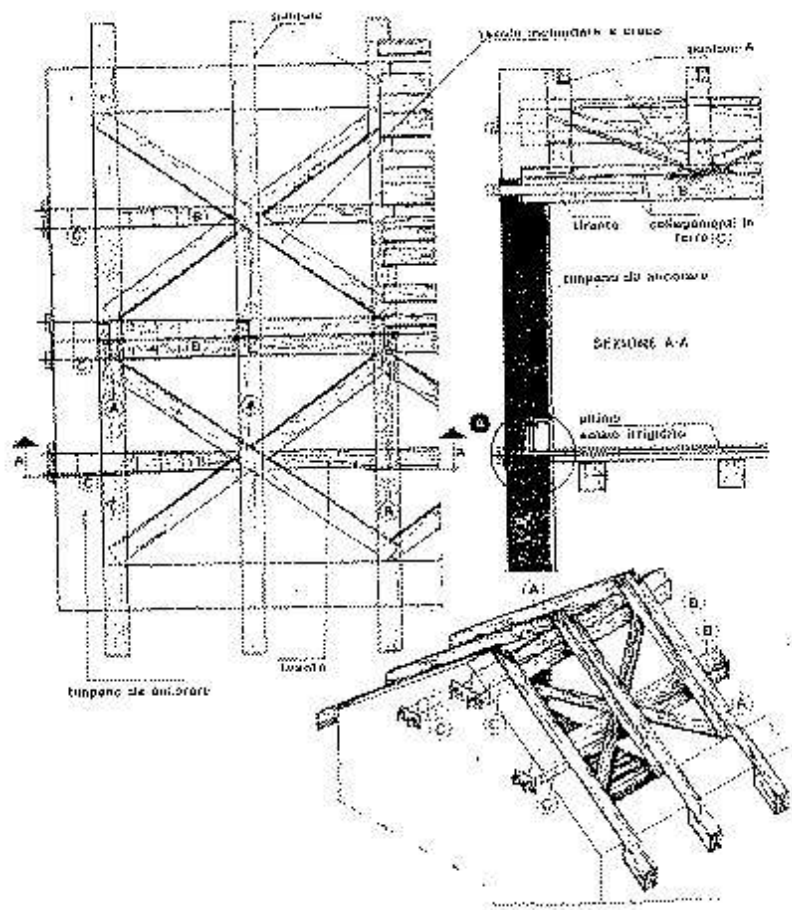


Figura 138 – Contraventamento de asnas com execução de Cruzes de Santo André

A perna da asna encontra-se contraventada, em geral, pelas madres e pela cumeeira. A linha deve ser travada por meio de cruzetas nos pendurais, tirantes de aço cruzados na vertical ou na horizontal, ou qualquer estrutura secundária que desempenhe as mesmas funções. A estabilidade

transversal, face às acções do vento, é também garantida se for adoptado um adequado contraventamento.

Descrição resumida:

O reforço do contraventamento da estrutura de madeira da cobertura consiste na introdução de cruzetas em forma de X aberto. O cruzamento das peças é feito a meia-madeira e, tradicionalmente, devidamente pregado. As suas ligações aos prumos ou aos pendurais das asnas, são feitas por uma samblagem de dente pregada para eles.

Principais aplicações:

Reforço do contraventamento de coberturas constituídas por asnas ou simples madeiramentos, com deficiente ou inexistente contraventamento destes, é preferencialmente aplicável na ligação a empenas.

Materiais utilizados:

Barrotes para as cruzetas em madeira nova, seca e tratada e de preferência de espécie idêntica à original. Chapas e parafusos, para ligação dos barrotes, de aço inoxidável ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Reduzida intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais, técnica tradicional, simplicidade e legibilidade da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de novos elementos de estado diferente da estrutura original.

5.3.5.2. ESCORAS DE BONECA

Este contraventamento destina-se não só a garantir a solidez de uma estrutura pelo aperto dos elementos entre si, como também a suportar alguma parte do peso dos elementos superiores do madeiramento. A sua execução é simples e bastante eficaz.

Trata-se de dividir o vão entre prumos em três partes iguais, as partes dos lados destinam-se a ser escoradas e a que fica no meio é o lugar da *boneca*. As samblagens tradicionalmente usadas nestas ligações são o *dente* e o *bigode*. As escoras ficam a 45°. Os prumos ficam apertados à *fileira* ou a uma longarina, por *orelha derrabada* e *talão*. As ligações são usualmente pregadas.

As bonecas são pregadas para cima, para o *pau de fileira* ou para qualquer outra viga onde liguem.

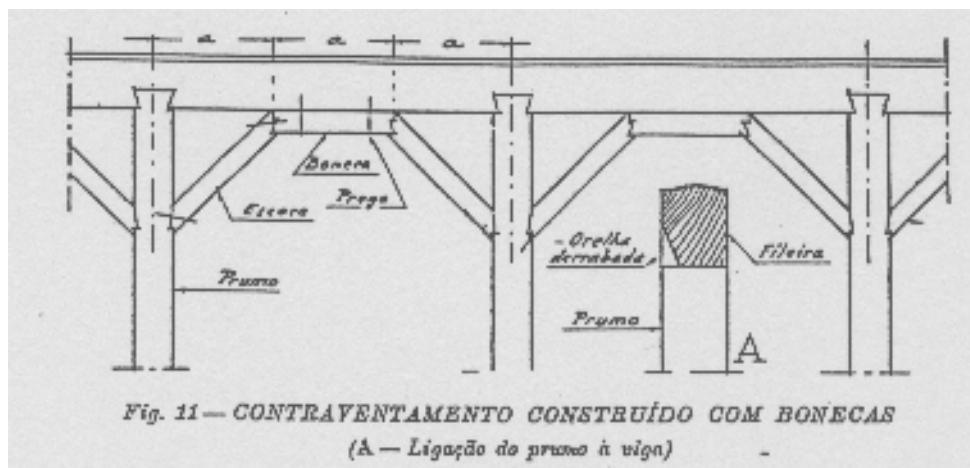


Figura 139 – Contraventamento por execução de *Escoras de boneca* (Costa, F.)

Descrição resumida:

Consiste em reforçar o contraventamento de estruturas, pelo aperto dos elementos entre si, dividindo os vãos, entre asnas, vigas ou apoios, em três partes iguais. As escoras ficam a 45°.

Principais aplicações:

No caso das coberturas, as bonecas são pregadas para cima, para a *fileira*, reforçando o contraventamento entre asnas ou simples pernas de madeiramentos.

Materiais utilizados:

Os novos elementos introduzidos são em madeira nova, tratada e devidamente seca e as ligações são usualmente pregadas.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Aproveitamento dos materiais originais. De execução simples e bastante eficaz.

Inconvenientes: Introdução de novos elementos na estrutura original, embora do mesmo tipo de material.

5.3.5.3. EXECUÇÃO DE ELEMENTOS ADICIONAIS DE AÇO

Aplicação de chapas metálicas em uniões de elementos estruturais de coberturas.

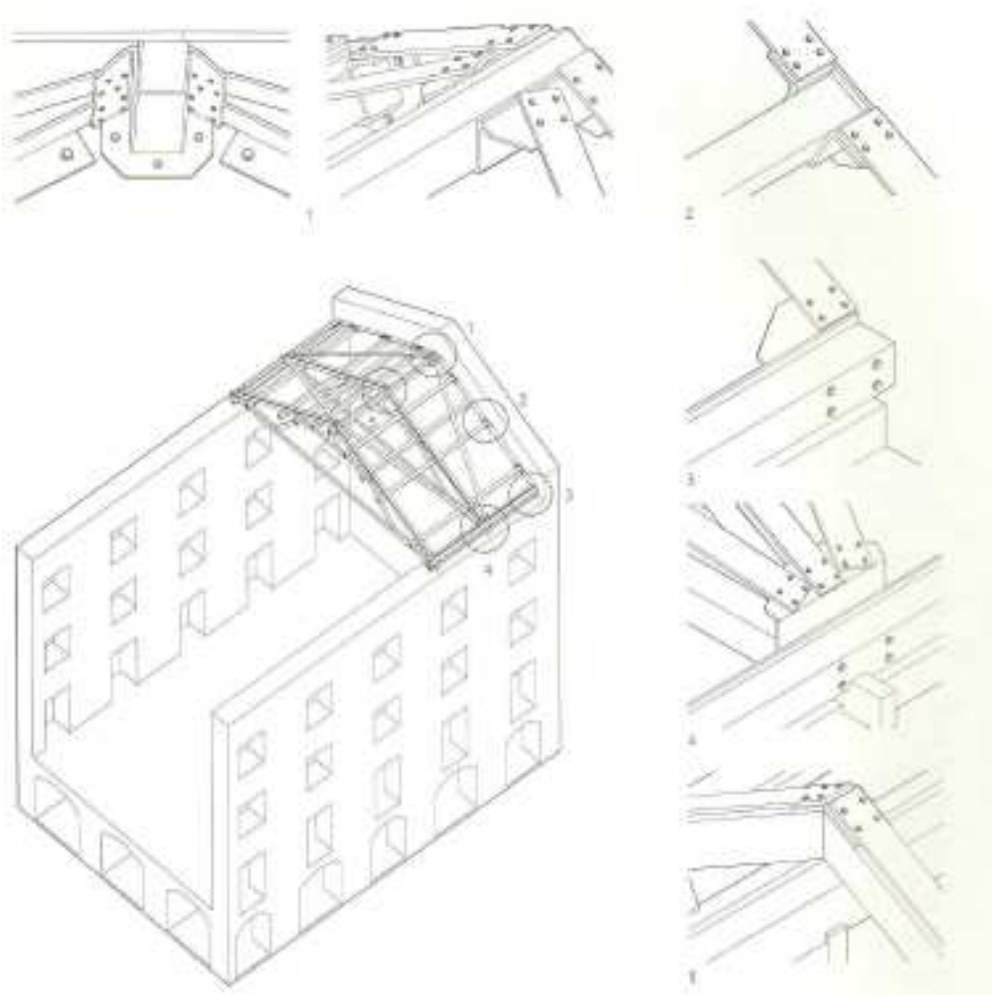


Figura 140 – Reforço de contraventamento através da ligação de diagonais entre as asnas
 (“Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos”, Córias, V., 2007)

Descrição resumida:

O reforço do contraventamento dos elementos de madeira é feito através da fixação de peças de aço nas ligações entre as asnas e as madres, frechal e fileira, aumentando assim a resistência e rigidez global da estrutura.

Principais aplicações:

No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável nas ligações entre as asnas e as madres, frechal e pau de fileira.

Materiais utilizados:

Chapas e parafusos de aço inoxidável ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Reduzida intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e legibilidade da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais.

5.3.6. EMPENAMENTO E FENDAS

(devidas a retracção da madeira após a secagem, a assimetria de cargas, aos efeitos induzidos das vigas e dos elementos de apoio).

5.3.6.1. REPARAÇÃO DE FENDAS COM PARAFUSOS

A técnica de reparação de fendas com parafusos consiste em apertar as faces da fenda, uma contra a outra, com recurso a parafusos. Aplica-se na reparação de fendas de topo ou fendas interiores longitudinais, sendo realizada com parafusos de pequeno diâmetro.

Efectua-se um furo na direcção perpendicular à fenda. Introduce-se o parafuso através do furo (com a respectiva anilha) e fecha-se a fenda por aperto do parafuso. Os parafusos só devem ser apertados até ao início do seu tensionamento, devendo ser posicionados a uma distância de 5 a 8 cm do topo da peça.

A reparação das fendas pode ser executada com a introdução de parafusos em espiral ou simples. Comprime-se a peça, depois introduzem-se esses parafusos ou varas espiraladas.

Descrição resumida:

A reparação dos elementos fendilhados consiste em apertar as faces da fenda, uma contra a outra, com recurso a parafusos.

Principais aplicações:

Aplica-se na reparação de fendas de topo ou fendas interiores longitudinais.

Materiais utilizados:

Parafusos ou varas espiraladas, de aço, de pequeno diâmetro.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Intervenção rápida, simples e eficaz.

Inconvenientes: Alteração com eventual prejuízo estético da estrutura.

5.3.6.2. REPARAÇÃO DE FENDAS POR CINTAGEM

A técnica de reparação de fendas por cintagem baseia-se na utilização de tiras metálicas para fechar as fendas, por mero aperto. A fixação de tiras é feita recorrendo a pregos electrozincados ou de aço. Esta técnica aplica-se em fendas de topo ou em fendas interiores longitudinais.

Descrição resumida:

A reparação de fendas é feita por cintagem com utilização de tiras metálicas para fechar as fendas, por mero aperto.

Principais aplicações:

Esta técnica aplica-se em fendas de topo ou em fendas interiores longitudinais.

Materiais utilizados:

Tiras metálicas, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão, e pregos electrozincados ou de aço.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e legibilidade da intervenção. De execução simples e eficaz.

Inconvenientes: Alteração com eventual prejuízo estético da estrutura.

5.3.6.3. SELAGEM E INJECCÃO DE RESINA DE EPÓXIDO EM REPARAÇÃO DE FISSURAS

Esta técnica de reparação de fendas consiste na injeccção de resinas de epóxido de baixa viscosidade, a baixa pressão, na fenda (figura 141). Após a polimerização, esta zona apresentará um comportamento idêntico ao do resto da secção. Esta técnica é aplicada na reparação de fendas de topo, ou fendas interiores longitudinais.

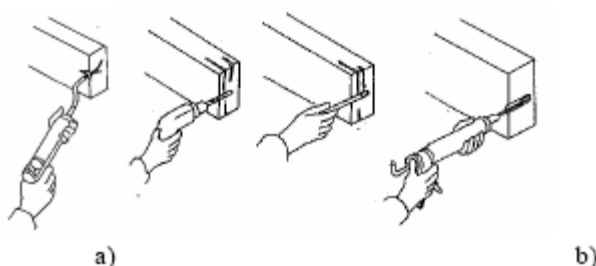


Figura 141 – Reparação de fendas com injeccção de resinas de epóxido (ROTAFIX, 2007)

A área onde será efectuada a intervenção deve ser selada por completo, à excepção das boquilhas de injeccção. Desta forma, as fendas junto aos nós e nos elementos de ligação (cavilhas) são preenchidas com a resina de epóxido de alta viscosidade, com características de massa consistente.

Depois de estar selado é recomendável aplicar uma camada de pintura de epóxico na superfície da zona reparada. Esta operação serve para tamponar essas fissuras que não aparecem à simples vista.



Figura 142 – Preenchimento de fissuras com resina de epóxico

Outros campos de actuação da tecnologia das resinas de epóxico consistem na injeção à pressão de resinas de baixa viscosidade para restaurar estruturas degradadas de madeira. Os danos mais frequentes neste tipo de estrutura derivam dos próprios meios de união entre as diversas peças que, com o tempo e se estiverem sobrecarregadas provocam fissuras nas proximidades das ligações. Em alguns casos estas fissuras estendem-se ao longo das peças.

O procedimento de reparação consiste na injeção de resinas de epóxico de baixa viscosidade na zona selada através das boquilhas de injeção. A resina introduz-se por uma das boquilhas servindo as restantes boquilhas para a saída de ar. Quando a resina começa a fluir pelas boquilhas é necessário tapá-las. Quando todas as boquilhas tenham sido tapadas é necessário manter uma pressão de injeção durante uns 10 segundos.

Recomenda-se que o valor da pressão não ultrapasse os 2,7 kPa/cm², sob pena de romperem as selagens das injeções, quando a peça se encontra submetida a uma pressão demasiado elevada.

Pode dizer-se que, no caso das estruturas que não apresentem danos de podridão, a consolidação dos nós defeituosos permite alcançar um nível de resistência aproximadamente igual ao original. No entanto, em estruturas com peças que apresentem grandes podridões, o método é menos eficaz. Isto deve-se à dificuldade em detectar todas as zonas de ataque. Por outro lado, as zonas com podridões se não se eliminam não permitem uma ligação eficaz.

O mecanismo através do qual a resina reforça os nós debilitados não consiste exclusivamente na reparação das fendas, mas também está relacionado com a quantidade de resina que se pode utilizar nas superfícies de contacto, originando a sua colagem. Desta maneira, a união transforma-se numa união rígida com tensões distribuídas na superfície de contacto. A ligação inicial era uma ligação articulada sem momentos, no entanto, esta mudança conduz a um aumento de tensão nas

zonas próximas de nós, que alguns autores dizem ser de 15 a 20%. Deverá analisar-se a influência do aumento da rigidez na reparação da estrutura.

Para conter a resina de epóxico injectada deve-se envolver/tratar/selar primeiro a madeira pelo exterior, de modo a selar as fendas e vazios.



Figura 143 – Consolidação de peças fissuradas com resinas de epóxico (*TimberRepair*[®], 2007)

As fissuras em estruturas de madeira não afectam necessariamente (dependendo da profundidade, abertura e orientação) a integridade estrutural. Podem até ser vistas como identidade estética da madeira, que distingue estas estruturas de materiais fabricados homogéneos.

A injeção de resina de epóxico nas fissuras existentes na madeira tem ainda as seguintes vantagens:

1. Aumentar a resistência ao fogo
2. Aumentar a resistência aos agentes atmosféricos
3. Melhorar o comportamento estrutural
4. Prevenir ataques de parasitas

Fissuras menores que 5mm de largura requerem injeção em vez de preenchimento.

O método de injeção usa resina de epóxico da seguinte forma:

- Limpar as fissuras e vazios com formão e aspirador.
- Colocar injectores espaçados ao longo da fissura.
- Conectar os tubos à pistola de injeção de resina de epóxico.
- Remover excesso de resina e acabar pelo exterior com argamassa de epóxico.

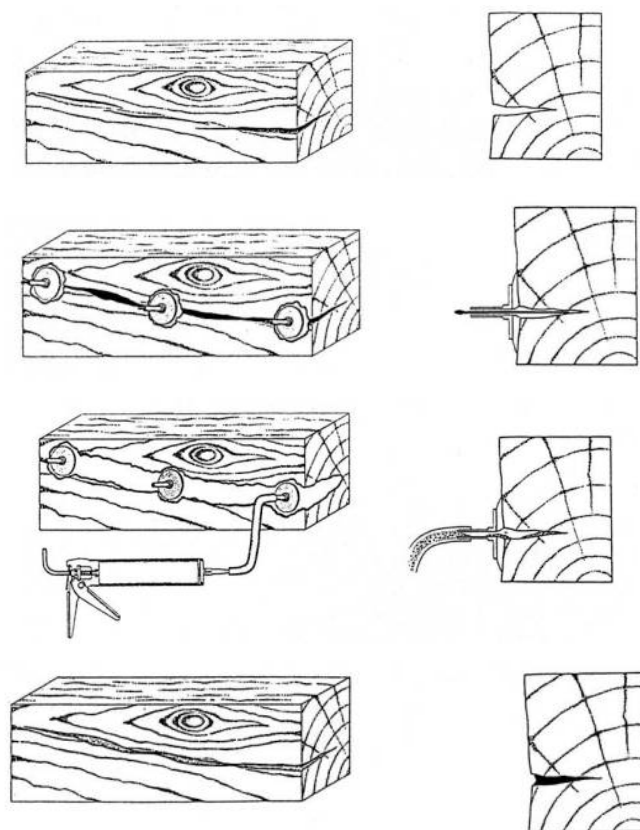


Figura 144 – Injeção de resina de epóxi em selagem de fissuras (ROTAFIX, 2007)

Descrição resumida:

Esta técnica de reparação de fendas consiste na injeção de resinas de epóxi de baixa viscosidade, a baixa pressão, nas fendas.

Principais aplicações:

Esta técnica é aplicada na reparação de fendas de topo, ou fendas interiores longitudinais. Fissuras menores que 5mm de largura requerem injeção em vez de preenchimento. Aplica-se também a fissuras provocadas por esforços mecânicos nas proximidades das ligações.

Materiais utilizados:

Resina de epóxi.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Aproveitamento dos materiais originais. Aumenta a resistência ao fogo, a resistência aos agentes atmosféricos, melhora o comportamento estrutural e a resistência a ataques de parasitas.

Inconvenientes: Introdução de materiais diferentes dos originais, não tradicionais e pouco testados a longo prazo. Dúvidas sobre o comportamento das resinas a temperaturas elevadas e a longo prazo. Alteração da rigidez das ligações e consequentemente da distribuição dos esforços na estrutura.

5.3.6.4. REPARAÇÃO DE FENDAS COM ADESIVO DE EPÓXIDO E VARÕES DE REFORÇO

Neste caso, conjuntamente com o adesivo de epóxico, são inseridos varões de reforço, nomeadamente de aço inoxidável, ou de materiais compósitos reforçados com fibras de vidro ou de poliéster (figura 145).

Antes da aplicação dos produtos, as fendas e fissuras devem ser previamente limpas com jacto de ar ou aspirador para remoção de poeira solta ou friável.

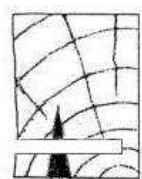
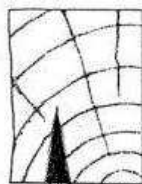
A furação deve ser efectuada seccionando a fenda, numa zona sã da madeira, transversalmente à fenda. Quando da aplicação do produto, deve avaliar-se o teor em água da madeira, dado que este tem de ser compatível com a colagem. Aconselha-se que este valor se situe abaixo dos 16%, ou outros valores indicados pelo fabricante. No entanto, não deverá ultrapassar um limite mínimo em relação às condições ambientais do local, para que não ocorram variações dimensionais significativas após a intervenção.

Os varões de material compósito, antes da sua colocação, devem ser submetidos a um tratamento abrasivo com lixa fina, seguido de limpeza com a acetona.

Para fissuras maiores do que 5mm de largura, o vazio pode ser preenchido com argamassa de base de epóxico, mas se a fissura penetrar mais do que 30% na secção da peça, será necessário colocar conectores através da secção de forma a ligar as partes desligadas.

Procedimento tipo:

- Limpar as fissuras e vazios com formão e aspirador. Preencher com argamassa de epóxico;
- Furar entre as partes separadas pela fissura. Deverão ser calculados o número, diâmetro, comprimento e espaçamento dos conectores, que podem ser de fibra de vidro, fibra de carbono, aço ou aço inox, envolvidos em resina de epóxico;
- Injectar resina de epóxico nos furos de ligação.



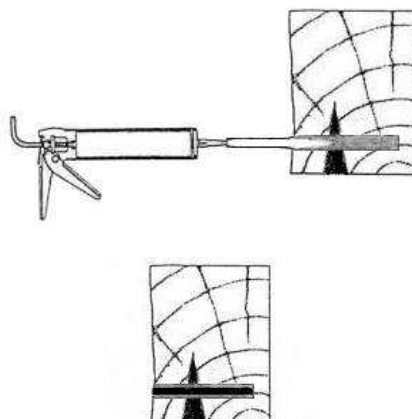


Figura 145 – Reparação de fendas com adesivo de epóxico e varões de reforço (ROTAFIX, 2007)

- Inserir conectores nos furos preenchidos com resina de epóxico, com espaçamento de 100-150mm, selar furos com argamassa de epóxico.
- Remover excesso de resina e acabar pelo exterior com argamassa de epóxico.

Descrição resumida:

A reparação de fendas é feita pela introdução, conjuntamente com o adesivo de epóxico, de varões de reforço, a “coser” a fenda.

Principais aplicações:

Para fissuras maiores do que 5mm de largura, com penetração em mais de 30% na secção da peça, será necessário colocar conectores através da secção de forma a ligar as partes desligadas.

Materiais utilizados:

Resinas de epóxico, varões de reforço de aço inoxidável, ou de materiais compósitos reforçados com fibras de vidro ou de poliéster.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: As mesmas do ponto anterior, com a diferença de uma maior garantia de solidarização mecânica em fissuras profundas.

Inconvenientes: As mesmas do ponto anterior, sendo ainda maior a especialização dos intervenientes, o custo e experimentalismo da técnica.

5.3.6.5. REFORÇO COM BARRAS INCLINADAS

Nas secções de grande esquadria é inevitável o aparecimento de grandes fendas que tendem em dividir a secção original em duas peças acopladas. Estas fendas produzem-se como consequência da secagem da madeira que provoca contracções maiores na direcção tangencial do que na radial, de tal forma que as fissuras são radiais e só afectam o plano médio da secção (figura 146). Estas

fendas também aparecem nas partes superiores e inferior. As consequências desta fendilhação estão pouco estudadas, no entanto é de esperar que a rigidez da viga seja diminuída de certa forma.

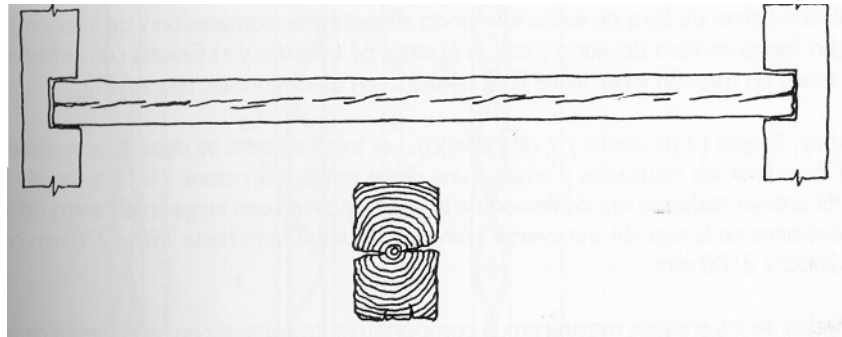


Figura 146 – Peça de madeira fissurada (Arriaga, 2002)

O Sistema Beta foi aplicado para reforçar peças mediante um “cosido” de fendas com barras inclinadas (com ângulos compreendidos entre 20 e 30° - figura 147). Para a sua colocação realizaram-se furos desde a superfície superior, selam-se as fendas na alma das vigas com recurso à injeção de epóxico ou simplesmente vertendo o epóxico, normalmente sem cargas uma vez que são colocadas as barras de aço nos orifícios. Esta resina de epóxico penetra nas cavidades das barras e das fendas.

Desta forma consegue-se que a peça fique completamente envolvida, constituindo uma única secção.

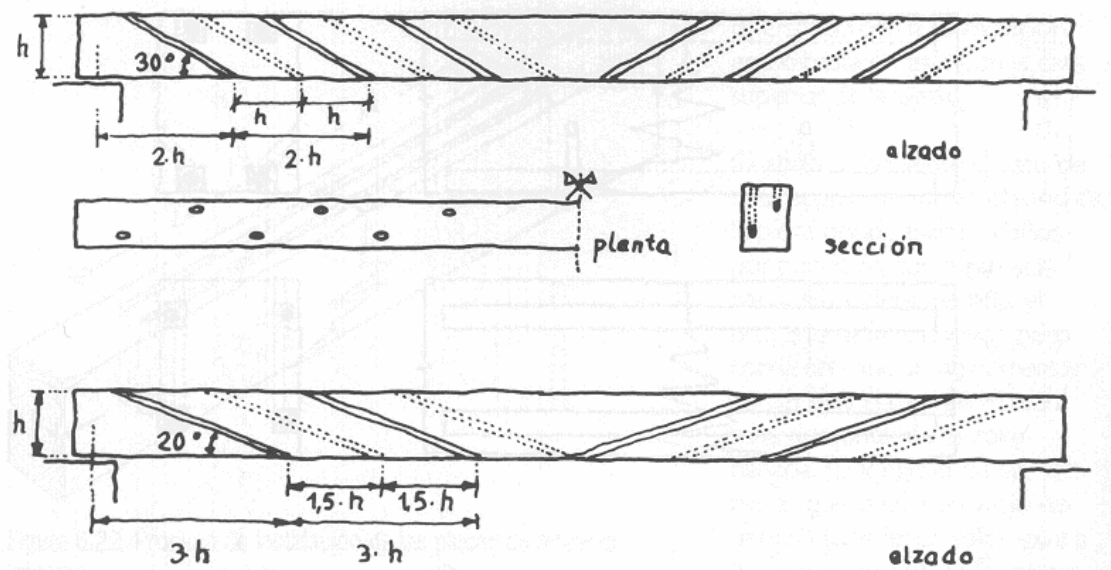


Figura 147 – Esquema de reforço de peças fissuradas com varões inclinados (Arriaga, 2002)

De alguns ensaios realizados obtém-se um efeito significativo na redução da flecha na viga. A aplicação da resina é difícil tendo em conta que a resina pode escapar-se por qualquer fenda, ou orifício, que não foi perfeitamente selado. Assim, deve-se reflectir se a diminuição da deformação e todas as suas consequências compensam em relação ao trabalho a realizar e aos seus custos.

Descrição resumida:

Reforço das peças fissuradas mediante um “cosido” de fendas com barras inclinadas.

Principais aplicações:

Para fissuras radiais e que só afectam o plano médio da secção.

Materiais utilizados:

Resinas de epóxido, varões de reforço de aço inoxidável, ou de materiais compósitos reforçados com fibras de vidro ou de poliéster.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Idênticos à técnica do ponto anterior.

Inconvenientes: Idênticos à técnica do ponto anterior. Técnica ainda sem grande experiência comercial.

5.3.7. ENCURVADURA

(dos elementos comprimidos originada pelo excesso de esbelteza das peças de madeira, ou por solicitações excessivas e não previstas).

5.3.7.1. SUBSTITUIÇÃO DE TODA A PEÇA DE MADEIRA POR UMA NOVA

A nova peça pode ser também da mesma madeira, sendo necessário contar com a necessidade de efectuar o escoramento provisório da estrutura.

Descrição resumida:

A intervenção consiste na substituição dos elementos com encurvadura por outros de nova madeira, com a secção necessária às cargas agora previstas.

Principais aplicações:

No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a pernas e madres.

Materiais utilizados:

Novos elementos de madeira tratada, seca e de preferência de espécie idêntica à original.

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Manutenção do mesmo tipo e natureza de materiais estruturais.

Inconvenientes: Necessidade de escoramento temporário da estrutura da cobertura.

5.3.7.2. REFORÇO DE ELEMENTOS COM ACRÉSCIMO DE PEÇAS DE MADEIRA

Em situações em que as secções das pernas das asnas são insuficientes, o reforço pode consistir na ligação de uma peça de madeira, de cada lado da original. A ligação pode realizar-se mediante cavilhas colocadas em triângulo. Esta situação será mais eficiente se as peças de reforço forem coladas à original com resina de epóxico.

Um caso habitual é o de reforço de uma asna em que as “pernas” têm uma secção insuficiente e existem problemas no empalme do tirante com rigidez insuficiente. Como solução, ligam-se peças de madeira nova às “pernas” e fixa-se um tirante metálico ancorado aos extremos, através de uma peça de aço. Em alguns casos empregam-se tirantes metálicos para o reforço das pernas como o exemplo da figura 106. Este reforço permite recuperar as estruturas da cobertura como aumento à sua capacidade de carga para cerca de 3 vezes a sua capacidade original.

No caso das madres, a introdução de novas madres reduzindo assim o vão entre estas é uma solução possível, que no entanto deverá ser estudada para que os pontos de apoio destas novas peças nas pernas não causem esforços de corte e esmagamento localizados nas pernas.

Descrição resumida:

O reforço dos elementos de madeira é feito pela introdução de novos elementos de madeira de reforço aos existentes, de forma a melhorar a resistência e rigidez da estrutura e diminuir assim o efeito causador da encurvadura nas peças. Este reforço pode ser feito pela fixação de nova madeira às peças originais em esforço, através de cavilhas de madeira ou elementos metálicos, ou ainda pela introdução de novos elementos estruturais de madeira de reforço aos existentes, reduzindo assim o vão e conseqüentemente as cargas que neles descarregam (caso das madres e pernas).

Principais aplicações:

Reforço e consolidação de elementos de estruturas de madeira com secção reduzida face aos esforços aplicados. No caso das coberturas, é preferencialmente aplicável a pernas, madres e linhas.

Materiais utilizados:

Novas peças de madeira tratada e seca, de preferência da mesma espécie da original, cavilhas de madeira ou ligadores por elementos metálicos de aço inoxidável (ou, correntemente, de aço galvanizado ou devidamente protegido contra a corrosão).

Principais Vantagens e Inconvenientes:

Vantagens: Moderada intrusividade. Aproveitamento dos materiais originais e legibilidade da intervenção.

Inconvenientes: Introdução de novos elementos e materiais diferentes dos originais.

5.3.7.3 CRUZES DE SANTO ANDRÉ

Descrito no ponto 5.3.5.1.

5.3.7.4. EXECUÇÃO DE ELEMENTOS ADICIONAIS DE AÇO

Descrito no ponto 5.3.5.2.

5.4. Quadro resumo de soluções

Apresentam-se no quadro abaixo de forma resumida as diversas soluções referidas no ponto 6.3 e a respectiva ligação à anomalia a que se associam. Pretende-se desta forma sintetizar as diversas opções disponíveis para os projectistas com vista à intervenção de reabilitação em estruturas de madeira existentes.

Problema	Soluções
<p><i>Secção insuficiente</i> <i>(com eventual rotura de elementos e deformações excessivas) para as solicitações e cargas actuantes ou devido ao aumento das cargas originais</i> <i>Roturas pontuais em elementos devidas a defeitos locais, (por exemplo, por existência de nós a meio vão)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reforço de elementos de madeira por aumento de secção com nova madeira - Reforço de elementos de madeira por aplicação de empalmes - Reforço de elementos de madeira através da aplicação de resinas de epóxido e varões embebidos - Reforço com armaduras longitudinais com laminados de fibras de carbono ou chapas de aço na pela de madeira - Reforço com perfis e chapas metálicas - Reforço com tirantes metálicos - Substituição da estrutura de madeira por perfis metálicos - Execução de novos elementos estruturais adicionais de madeira - Reparação por substituição de elementos estruturais
<p><i>Deformações excessivas</i> <i>(devidas ao efeito da fluência (principalmente em peças colocadas ainda verdes), ou a secção insuficiente, e consequentes roturas a longo prazo)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Colocação de novas estruturas de suporte a cobertura - Aplicação de tirantes metálicos - Reparação por reforço dos elementos estruturais - Reparação por substituição de elementos estruturais

<p>Falhas nas uniões <i>(ou rotura dos ligadores, devido a um mau dimensionamento ou um desenho ou execução incorrecta destas, que também podem dar origem a deformações. Rotura por esmagamento por compressão sobre os elementos metálicos de fixação, ou por esforço de corte nos empalmes e ensambles)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reparação/reforço dos nós de ligação por técnicas tradicionais (empalmes, parafusos, grampos, cintagem) - Consolidação dos nós estruturais por reforço com peças de madeira coladas - Consolidação de ligações com resinas de epóxico e chapas metálicas - Consolidação de ligações com resinas de epóxico e varões de aço - Consolidação de ligações por injeção com resinas de epóxico - Ligações de madeira com reforço por FRP
<p>Problemas nos apoios <i>Rotações, insuficiente entrega dos elementos estruturais em muros ou sobre outros (vigas mestras, frechais, etc.); Perda da secção resistente provocada pela acção de agentes biológicos; Apoios – podridão</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Introdução de novo apoio sobre linha adjacente ao muro - Reforço dos apoios com perfis metálicos - Soluções com recurso a nova madeira, a acrescentar à antiga - Apoios – próteses de argamassa de epóxico e/ou varões de reforço - Substituição de partes de elementos recorrendo a prótese - Consolidação dos nós nas estruturas de madeira com reforço com barras coladas
<p>Deficiências de contraventamento <i>(ou inexistência nos planos da cobertura, e eventuais afastamentos insuficientes entre asnas)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cruzes de Santo André - Escoras de boneca - Execução de elementos adicionais de aço
<p>Empenamento e fendas <i>(devidas a retracção da madeira após a secagem, a assimetria de cargas, aos efeitos induzidos das vigas e dos elementos de apoio)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Reparação de fendas com parafusos - Reparação de fendas por cintagem - Selagem e injeção de resina de epóxico em reparação de fissuras - Reparação de fendas com adesivo de epóxico e varões de reforço - Reforço com barras inclinadas
<p>Encurvadura <i>(dos elementos comprimidos originada pelo excesso de esbelteza das peças de madeira, ou por solicitações excessivas e não previstas)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Substituição de toda a peça de madeira por uma nova - Reforço de elementos com acréscimo de peças de madeira - Cruzes de Santo André - Execução de elementos adicionais de aço

Quadro 5 – Resumo de principais problemas correntes e soluções respectivas em estruturas de madeira de coberturas de edifícios antigos

5.5. Tópicos associados à avaliação técnico-económica das soluções propostas

Apresenta-se em seguida uma avaliação sumária da qualidade das soluções de reabilitação segundo diversos critérios, considerados mais significativos, e que incluem a maior ou menor operacionalidade de execução em oficina ou obra, a rapidez de execução, a necessidade de acompanhamento em obra e a durabilidade.

5.5.1. Critérios de avaliação económica

Análise das diversas soluções do ponto de vista económico, tendo em conta a sua vida útil (durabilidade) e os seus custos de execução e manutenção.

As obras de reabilitação têm características específicas, frequentemente definidas por distinção em relação às construções novas. Numa intervenção de reabilitação estão correntemente compreendidos, para além dos trabalhos de reparação de anomalias, trabalhos de reforço/beneficiação, podendo ainda incluir pequenos trabalhos do domínio da manutenção, que deveriam ser feitos periodicamente.

A composição dos custos das intervenções está obviamente ligada às técnicas e materiais utilizados, desde os mais tradicionais até aos mais sofisticados.

Existe, nestas intervenções, a necessidade de efectuar trabalhos preliminares, tais como os de demolição, desmonte ou consolidação prévia, que por serem muitas vezes parciais e com especiais cuidados, se traduzem em encargos adicionais, em comparação com obras novas.

Ainda que a reparação, beneficiação ou substituição de elementos construtivos recorram frequentemente a técnicas e materiais correntes nas obras novas, tal não significa que os custos destes trabalhos em reabilitação sejam similares aos de uma obra nova. A diferença é devida às condições de execução, que são mais difíceis em edifícios a reabilitar, o que afecta negativamente os rendimentos desses trabalhos e conseqüentemente aumenta os custos unitários.

5.5.2. Critérios de avaliação do ponto de vista da sustentabilidade

Uma hipótese base no modo de conceber uma estrutura de madeira é a de que, quem projecta e executa a estrutura, esteja consciente de que alguma parte, mais cedo ou mais tarde, sofrerá degradação, ainda que seja feita manutenção. Essas peças deveriam ser projectadas para serem facilmente substituíveis.

Quando a substituição é prevista não se pode considerar reconstrução mas antes manutenção. Considerando a inevitável degradação e manutenção de partes como é o caso das testas das peças apoiadas em paredes, podemos pensar na hipótese de usar madeira de “sacrifício” a substituir

periodicamente. A protecção dos topos de peças de madeira, como vigas e linhas de asnas, que apoiam e são envolvidas em paredes pode ser feita através de tábuas de madeira facilmente substituíveis, numa perspectiva de sustentabilidade dos elementos.

O revestimento dos topos das peças é, deste modo, entendido como removível e como protecção da estrutura. Também sob os apoios dos elementos estruturais podem ser interpostas placas de madeira onde o efeito da humidade provocará o maior dano.

A sustentabilidade das estruturas de madeira deve ser considerada como uma referência na conservação dos edifícios pois é conciliável com os aspectos de tradição, economia, e de racionalidade, se for concebida dentro desta lógica.

5.5.3. Durabilidade das intervenções de reabilitação de estruturas de madeira

A vida projectada da estrutura de madeira não é uma questão matemática, normalmente projecta-se prevendo uma intervenção decorridos aproximadamente 60 anos. No entanto, em cada intervenção é fundamental intervir de forma que os eventuais problemas sejam identificados e resolvidos integralmente.

Após cada intervenção, deve ser realizado um plano de manutenção que assegure o adequado acompanhamento da estrutura. Este plano deve prever as estruturas mais importantes ou de maior valor patrimonial, garantindo o envelhecimento do edifício de uma forma pouco dispendiosa.

5.5.4. Monitorização e facilidade de manutenção

É fundamental prever a realização de campanhas de inspecção periódicas para avaliar o estado de conservação da madeira aplicada, com função estrutural ou não estrutural, e levar a cabo prontamente as acções de manutenção necessárias.

Devem ser procurados indícios de má conservação dos elementos de madeira, frequentemente traduzidos por deformações acentuadas ou sintomas diversos associados a humedificação frequente ou continuada dos materiais da construção.

O aspecto exterior do edifício é muitas vezes eloquente, permitindo um primeiro levantamento das anomalias evidentes e das zonas potencialmente problemáticas.

Estas situações, bem como outras potencialmente "perigosas", como por exemplo a proximidade de redes de água ou esgotos, devem seguidamente ser analisadas a partir do interior do edifício, mediante a realização de prospecções e o acesso directo sistemático aos elementos de madeira, sempre que possível.

Só após a identificação dos agentes de degradação, a avaliação da degradação ocorrida e a identificação da espécie e qualidade da madeira empregue em cada caso, será possível estimar a

resistência das estruturas e estabelecer medidas correctivas adequadas de tratamento e eventual reforço.

A manutenção deve englobar diversos tipos:

- preventiva, quando actua de forma sistemática através de acção de controlo, de ajuste ou de substituição de componentes com prazo de vida conhecido;
- condicionada, se desenvolve mediante a resolução de sintomas pré-anomalia, dando resposta a situações de alteração física de materiais ou a pequenos desajustamentos que se manifestam em ciclos progressivamente mais curtos;
- correctiva, quando actua resolvendo anomalias já claramente manifestadas, podendo estas ser de carácter pontual ou urgente.

No caso das estruturas de madeira de coberturas, e das intervenções e soluções de reabilitação a efectuar nestas, a frequência e custo da sua manutenção está relacionada com os factores de degradação, ligados aos seguintes aspectos:

- tecnologia e materiais empregues na construção/reparação dos edifícios;
- formas de utilização e cuidados destas;
- ocorrência de anomalias devidas a acções naturais ou acidentais;
- manifestação de desajustamentos funcionais, eventualmente relacionados com a alteração dos níveis exigenciais ao longo do tempo.

Estas preocupações devem existir desde o início do planeamento de uma operação de reabilitação, uma vez que as diferentes opções nas fases de projecto e execução condicionam as futuras necessidades de manutenção de um determinado edifício ou construção.

Capítulo VI – Conclusão

Apresentam-se neste capítulo os principais resultados da investigação realizada, assim como a indicação de algumas sugestões de eventuais linhas de investigação possíveis de seguir a curto prazo.

Genericamente, pode considerar-se que os objectivos traçados no início da dissertação foram atingidos, nomeadamente quanto à sistematização e síntese dos principais problemas enfrentados por estruturas de madeira coberturas de edifícios antigos, seguida por uma proposta de catálogo das principais soluções aplicáveis à resolução dos problemas diagnosticados.

6.1 Principais resultados obtidos

Pretendeu-se neste trabalho, de carácter monográfico, fazer uma sistematização do conhecimento no que se refere às técnicas e tecnologias de reabilitação em estruturas de madeira, em particular, no que se refere às estruturas de coberturas. Esta sistematização traduziu-se numa síntese dos principais problemas enfrentados por esse tipo de estruturas seguida por uma proposta de catálogo das principais soluções aplicáveis à resolução dos problemas diagnosticados.

Deste trabalho resultou ainda, no final, uma proposta de avaliação técnico-económica simplificada das diversas soluções de reabilitação apresentadas.

A elaboração de uma proposta de catálogo de soluções para problemas tipo, estudadas com uma metodologia sistematizada, quanto aos seus limites e condições de aplicação, finalidade e vantagens e desvantagens das alternativas, permitiu concluir sobre a dificuldade de catalogar de forma simples e eficaz, quer os problemas, quer as soluções, neste tipo de estruturas.

Apesar de se ter orientado este trabalho para um enfoque nas estruturas de madeira de coberturas de edifícios antigos, mais detalhadamente ao sistema estrutural de asnas simples ou tradicionais, a enorme diversidade e particularidades das concepções e execução destas estruturas, existentes num parque edificado tão extenso e diversificado, dificultou bastante a intenção de uma maior profundidade do estudo e da análise estrutural.

No caso dos edifícios antigos e históricos, uma complexidade adicional provem desde logo da utilização de estruturas em madeira, que exibem um comportamento bastante variável ao longo do tempo, para além destas estruturas sofrerem habitualmente mudanças significativas durante a sua vida útil, devido à alteração de função, cargas, geometria e mesmo de técnicas e materiais construtivos.

O conhecimento das propriedades mecânicas dos elementos estruturais é difícil, nomeadamente por ser praticamente impossível retirar amostras de grandes dimensões deste tipo de estruturas para serem testadas. Também os ensaios mecânicos dos vários tipos de técnicas e materiais de reforços estruturais em peças e estruturas de madeira são complexos, existindo ainda pouca informação nesta área.

Contudo, também da complexidade e dificuldades desse trabalho resulta a confirmação das suas potencialidades e interesse. Dado que se constatou que a informação técnica existente na bibliografia, neste domínio e principalmente no nosso país, é ainda relativamente reduzida e dispersa nas abordagens.

Tendo em conta que, actualmente, a área da reabilitação de edifícios antigos está a ganhar um maior interesse no sector da construção e imobiliário e se prevê ainda um maior crescimento nos próximos anos, podemos concluir que o desenvolvimento de um catálogo deste tipo e a sistematização de conhecimento na área da reabilitação de edifícios antigos, existentes em tão grande número no nosso país, se reveste de grande interesse e utilidade prática para os técnicos da área.

Pode-se referir também que, em estruturas de edifícios antigos, a verificação de segurança não se adapta facilmente aos códigos actuais, que estão orientados conceptualmente para a construção nova. É evidente que as exigências de projecto para os elementos de uma estrutura antiga têm de ser redefinidas devido à incerteza inerente às propriedades mecânicas e ao comportamento estrutural, e aos ensaios não destrutivos. A responsabilidade das intervenções parciais em estruturas antigas, também em face desta dificuldade, exige um bom conhecimento das técnicas de reabilitação.

Pelo que referimos anteriormente, o resultado final do trabalho, o catálogo de soluções para problemas tipo, é em termos técnicos abrangente, simplificado e relevante para os técnicos da área podendo considerar-se, por isso mesmo, um trabalho inovador.

Esta abordagem e sistematização, para além de poder ser interessante para futuras análises mais detalhadas em determinados domínios aqui abrangidos, tem a virtude de ser uma proposta que pode ser útil aos projectistas para uma consulta simples e expedita sobre o tema abordado.

Assim a mais-valia desta dissertação relaciona-se com a possibilidade da sua utilização como manual de apoio a todos aqueles que têm a seu cargo a reabilitação de uma cobertura com estrutura em madeira, encontrando neste documento informação relativa aos procedimentos técnicos de intervenção ao nível da classificação dos problemas, selecção de técnicas e concepção da execução.

O catálogo concebido é de fácil utilização, através de uma simples e rápida leitura. Poderá ser completado com outros trabalhos de investigação complementares com vista a aprofundar e completar esta proposta.

6.2 Recomendações e desenvolvimentos futuros

A sistematização das soluções analisadas neste trabalho poderá servir como uma primeira abordagem para estudos mais aprofundadas ao nível das coberturas bem como para servir de base para o desenvolvimento de soluções análogas para outros sistemas estruturais com destaque para pavimentos ou as paredes estruturais em madeira.

Sendo evidente a subjectividade inerente a uma simples catalogação de soluções para problemas relativamente complexos e com grande especificidade dado estarmos perante situações de reabilitação, ainda assim, pode também concluir-se que a valorização técnico-económica efectuada para o caso das coberturas constitui também um guião importante para a avaliação rápida e comparativa de soluções para problemas estruturais em coberturas de madeira que também poderá, analogamente, ser extrapolada para outros sistemas estruturais.

O trabalho realizado, e as dificuldades sentidas permitem ainda sugerir alguns outros caminhos de investigação que resumidamente se podem caracterizar pelos seguintes:

- Ensaio de asnas em tamanho real com tipos de madeiras mais usadas em Portugal, (carvalho, castanho, pinho, eucalipto), e também com madeira lamelada colada, de forma a permitir uma melhor caracterização das propriedades mecânicas e do comportamento estrutural do conjunto (deformabilidade, rigidez);
- Avaliação comparativa com valorização em termos técnico-económicos das diversas soluções de reabilitação;
- Avaliação do efeito da orientação e do número dos varões de reforço (de aço e compósitos), para as ligações perna-linha;
- Avaliação dos vários tipos de ligadores metálicos, analisando os efeitos das alterações da rigidez que conferem aos nós de estruturas existentes, bem como reforço da ligação e continuidade. (suprindo uma ainda quase total inexistência de informação e material no mercado nacional – há estudos em curso sobre esta matéria, nomeadamente o de Jorge Branco para dissertação de doutoramento em curso na Universidade do Minho);

- Estudo e ensaios de ligações madeira-madeira, compreendendo a influência da geometria e ângulo das ligações;
- Avaliação da influência de defeitos localizados na vizinhança de ligações e de zonas reforçadas;
- Modelação de ensaios experimentais e execução de modelos numéricos de análise estrutural global (e local) com recurso a programas automáticos de análise;
- Estudo de ensaios e modelação do comportamento de coberturas tradicionais e da sua contribuição e ligação com a estrutura global dos edifícios, face às acções de sismos e outras horizontais;
- Avaliação do reforço com mantas de fibras de carbono, com introdução de FRP e GFRP (por exemplo em reforços internos de próteses de madeira maciça e de madeira lamelada-colada);
- Estudo estatístico de caracterização do tipo, espécies, principais problemas e estado de conservação das estruturas de madeira e de coberturas dos edifícios históricos, e dos edifícios antigos, no nosso país.

Bibliografia:

- [01] ABASOLO, D. – *Patología y técnicas de intervención* - Tomo 3. UPM, Editorial Munilla-Lería, Madrid, 1998
- [02] AMORIM FARIA, J. – Documentação das Aulas de “Reabilitação de Estruturas de Madeira”. DEC, FEUP, 2006
- [03] AMORIM FARIA, J. – Reabilitação de Coberturas em Madeira em Edifícios Históricos, In Seminário A intervenção no Património: Práticas de Conservação e Reabilitação. FEUP, Porto, 2002, 24 p.
- [04] APPLETON, J. – Reabilitação de Edifícios Antigos – Patologias e Tecnologias de Intervenção. Edições Orion, Amadora, 2003, ISBN 972-8620-03-9, 454 p.
- [05] ARRIAGA, F.; PEZAZA, F.; ESTEBAN, M.; BOBADILLA, I.; GARCIA, F. – *Intervención en estructuras de madera*. AITIM, Madrid, 2002, ISBN 84-87381-24-3, 476 p.
- [06] ARRIAGA, F. – *Uniones con barras metálicas encoladas en sistemas estructurales de celosías (Proyecto Carpenton)*, *Boletín de Información Técnica* Nº 226, AITIM
- [07] BARBISAN, V.; LANNER, F. – *Capriate e tetti in legno – Progetto e Recupero*. Franco Angeli, Milano, 2000, ISBN 88-464-2274-0, 146 p.
- [08] BARBISAN, V.; LANNER, F. – *I solai in legno: soluzione tradizionali, elementi innovativi*. Franco Angeli, Milano, 1997
- [09] BOTELHO, J. – Metodologias de inspeção e diagnóstico de estruturas de madeira em edifícios antigos. U.Porto, 2006
- [10] BRANCO, J.; CRUZ P.; PAULO, J.S.; PIAZZA, M. – Asnas de madeira: a importância da rigidez das ligações. U. Minho, 2006
- [11] BRANCO, J.; CRUZ P.; VARUM, H.; PIAZZA, M. – WCTE2006 - *Behaviour of Traditional Portuguese Timber Roof Structures*. WCTE, 2006

- [12] BRANCO J.; CRUZ P.; VARUM H.; PIAZZA, M. – *Portuguese traditional timber trusses: static and dynamic behaviour*. Report E-19/05. DECivil, U. Minho, 2005
- [13] CECCOTI, A.; RUFFINO, M.; BONAMINI, G.; UZIELLI, L. – *Restauro conservativo di capriate lignee*. Edizione Clut, Torino, 1998, ISBN 88-7992-136-3, 173 p.
- [14] CÓIAS, V. – Reabilitação estrutural de edifícios antigos, Argumentum/GECORPA, Lisboa, 2007
- [15] COLE, E. – A Gramática da Arquitectura. Livros e Livros, 2003, ISBN 972-791-102-1, 351 p.
- [16] COSTA, F. – Enciclopédia prática da construção civil. Portugália Editora, Lisboa.
- [17] COUTINHO, J. – Madeiras. Materiais de Construção. FEUP, 1999
- [18] CRUZ, H. – Dissertação para grau de Doutor, *Nailed timber joints subjected to alternating load cycles*, LNEC, 1995.
- [19] CRUZ, H.; CUSTÓDIO, J.; NASCIMENTO, J.; EMPIS, M. – Comunicação a CIMAD04 - Execução e controlo de qualidade da reparação de estruturas de madeira com colas de epóxido e FRPS, 2004
- [20] CRUZ, H.; PALMA, P. – Comunicação a QIC2006 – Ligações em estruturas de madeira. Para além dos pregos quadrados, 2006
- [21] CRUZ, J.D. – Dissertação para grau de Mestre – Deterioração, reparação e reforço de estruturas de madeira. I.S.T, 1993
- [22] CRUZ, H. – Reforço local de elementos estruturais de madeira por meio de compósitos – REPAR. LNEC, Lisboa, 2000
- [23] CTCV, IC – Manual de aplicação de telhas cerâmicas. Associação Portuguesa dos Industriais da Cerâmica de Construção, Coimbra, 1998, 160 p.
- [24] CUSTÓDIO, J.; CRUZ, H.; BROUGHTON, J. – Comunicação a QIC2006 – Tratamentos de superfície de madeira para melhoramento da adesão, 2006

- [25] DUARTE, A. – Reabilitação de elementos estruturais de madeira com argamassa epoxídica armada – Dissertação de Mestrado. DEC FCTUC, Coimbra, 2004
- [26] DESCAMPS, T., LAMBION J., LAPLUME D. – *Timber Structures: Rotational stiffness of carpentry joints*, WCTE, 2006
- [27] EUROCÓDIGO 5 – Projectos de estruturas de madeira. Parte 1.1, NP ENV 1995-1-1:1998
- [28] FEIO, A. – “Engenharia e Vida”, N.ºs 37, 38 e 39 – Madeiras, Reabilitação Estrutural, Análise de Técnicas de Reforço em estruturas de madeira, 2007
- [29] FEIO, A. – Dissertação para grau de Doutor – Inspecção e Diagnóstico de Estruturas Históricas de Madeira: Correlações com Métodos Não Destrutivos e Comportamento Estrutural. U.Minho, 2006;
- [30] GARBIN E., VALLUZZI M., MODENA C. – *Characterization of a dovetail joint for timber roofs*, WCTE, 2006
- [31] GECORPA – Estruturas de madeira – Reabilitação e inovação, Lisboa, 2000, 202 p.
- [32] GRAÇA, J. – Informação compilada e elaborada para dissertação em elaboração para obtenção do grau de Mestre. MRPE, FEUP, 2005
- [33] LAMANNA, L. – *Strutture in Legno. Le resine per il recupero e il consolidamento*. Gangemi Editore, 1996.
- [34] LANDA, M. – *Nuevas técnicas de reparación de estructuras de madera, Elementos flexionados. Aporte de madera-unió n encolada*, 2007
- [35] LOURENÇO, B.; FEIO, A. – Exemplos de Reabilitação Estrutural em Construções Antigas
- [36] LNEC E31 – Terminologia de madeiras. LNEC, Lisboa, 1955
- [37] MASCARENHAS, P. – Sistemas de Construção VI. Livros Horizonte, Lisboa, 2006
- [38] MACHADO, J.; PONTÍFICE, P. – Comunicação a QIC2006 - Produtos de madeira na construção contributo da normalização e da certificação para a sua qualidade, 2006

- [39] OLIVEIRA, R. – Dissertação para grau de Mestre – Análise de práticas de Conservação e reabilitação em edifícios de valor patrimonial. U.Porto, 2004
- [40] PAIVA, J.; AGUIAR J.; PINHO, A. – Guia técnico de reabilitação habitacional, INH-LNEC, 2006
- [41] PARVEZ, A.; ANSELL, M.; SMEDLEY, D. – *Repair of fractured spruce beams with bonded-in reinforcements*, WCTE, 2006
- [42] RATO, V. M. – Dissertação para grau de Mestre – Conservação do património histórico edificado - princípios de intervenção. I.S.T, 2002;
- [43] REIS, M.; BRANCO, F.; MASCARENHAS, J. – Técnicas de reabilitação em estruturas de madeira, PATORREB2006, FEUP, 2006
- [44] RODRIGUES, R. – Construções antigas de madeira – Experiência de obra e reforço estrutural. Dissertação de Mestrado. U.M., Guimarães, 2004
- [45] ROTAFIX – Documentação técnica diversa, 2007
- [46] TAMPONE, G. – *Il Restauro Delle Strutture di Legno*. Hoepli, Milano, 2000,ISBN 88-203-2273-0,401p.
- [47] TAMPONE, G; MANNUCCI, S.; MACCHIONI, N., *Strutture di Legno*, De Lettera editore, Milão, 2002.