



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DAS COBERTURAS DE MADEIRA DOS EDIFÍCIOS DO CENTRO HISTÓRICO DE LEIRIA

Sandra Cristina Alves Almeida

Leiria, *Março* de 2018



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DAS COBERTURAS DE MADEIRA DOS EDIFÍCIOS DO CENTRO HISTÓRICO DE LEIRIA

Sandra Cristina Alves Almeida

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor Florindo Gaspar, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor João Veludo, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, *Março* de 2018

AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação não teria sido possível sem a ajuda de diversas pessoas a quem pretendo, desde já, endereçar o meu sincero agradecimento.

Um especial agradecimento ao meu orientador Florindo Gaspar e coorientador João Veludo, pela disponibilidade na orientação e conselhos dados ao longo do desenvolvimento da dissertação, pois a concretização deste trabalho seria difícil sem as vossas considerações.

A todos os colegas de mestrado e da licenciatura. E também a todos os funcionários da escola.

A todos os meus amigos, em especial à Mónica, ao Dario e ao Tiago pela amizade e apoio que me ajudou a ultrapassar da melhor forma esta fase.

A toda a minha família. Em especial aos meus pais e irmão que me apoiaram incondicionalmente e me proporcionaram esta oportunidade de estudar.

À minha avó pelo carinho e ao meu avô que certamente estará orgulhoso com todo o meu percurso.

A todos o meu sincero,

Obrigado!

RESUMO

A cobertura é desde sempre um dos elementos mais importantes de um edifício. Ela constitui um autêntico escudo, pois defende o interior do edificado das ações diretas dos agentes atmosféricos. Sendo por isso que uma boa execução da estrutura da cobertura reflete na longevidade do edifício.

A preservação de edifícios antigos, assume grande importância, hoje em dia. Todos os materiais, componentes e elementos construtivos envelhecem ao longo dos anos, ocorrendo falhas na segurança e funcionalidade dos edifícios. As ações para adaptar estes edifícios às necessidades atuais obrigam em geral a intervenções mais ou menos profundas que, devem ser realizadas de forma cuidada.

O estudo das asnas de madeira não se resume apenas à aquisição do conhecimento necessário para intervir sobre as asnas existentes, mas também na aquisição de saber, para o dimensionamento de novas estruturas deste tipo.

O presente trabalho visa o estudo de coberturas de madeira existentes no Centro Histórico de Leiria, de um ponto de vista da segurança. Os exemplos apresentados baseiam-se em diferentes tipos de asnas, que foram analisadas recorrendo a modelos numéricos, de modo a modelar as ações atuantes na estrutura. Para a resistência estrutural da madeira teve-se em conta o Eurocódigo 5. Este trabalho conclui-se com a avaliação da segurança estrutural.

Palavras-chave: Estruturas de madeira, Coberturas, Edifícios antigos, Centro Histórico de Leiria, Eurocódigo 5

ABSTRACT

Coverage has always been one of the most important elements of a building. It constitutes an authentic shield, since it defends the interior of the building of the direct actions of the atmospheric agents. This is why a good execution of the roof structure reflects in the longevity of the building.

The preservation of ancient buildings is of great importance nowadays. All materials, components and building elements have aged over the years, failing the safety and functionality of buildings. The actions to adapt these buildings to the current needs generally require more or less deep interventions that must be carried out in a careful way.

The study of wooden donkeys is not only about acquiring the knowledge necessary to intervene on existing donkeys, but also on acquiring knowledge for the dimensioning of new structures of this type.

The present work aims at the study of wood coverings existing in the Historical Center of Leiria from a safety point of view. The examples presented are based on different types of snails, which were analyzed using numerical models, in order to model the actions acting on the structure. For the structural strength of the wood, Eurocode 5 was taken into account. This work concludes with the structural safety assessment.

Keywords: Timber Structures, Timber roofs, traditional buildings, Leiria History Center, Eurocode 5

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO.....	V
ABSTRAT.....	VI
ÍNDICE GERAL.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIII
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos da dissertação.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2 COBERTURAS DE MADEIRA.....	5
2.1 Evolução histórica.....	5
2.2 As coberturas em Portugal.....	7
2.3 Elementos estruturais da cobertura.....	8
2.3.1 Estrutura principal.....	9
2.3.2 Estrutura secundária.....	12
2.3.3 Revestimento.....	13
2.4 Ligações.....	14
2.4.1 Ligações tradicionais.....	15
2.4.2 Ligações mecânicas.....	16
3 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE COBERTURAS DE MADEIRA.....	21
3.1 Introdução.....	21
3.2 Comportamento estrutural das asnas simples.....	22
3.3 Pormenores construtivos.....	24
3.3.1 Posicionamento das madres.....	24
3.3.2 Ligação mãe – perna.....	25
3.3.3 Ligação pendural – linha.....	25
3.3.4 Ligação asna – parede.....	26
3.3.5 Ligação perna – linha.....	27
3.3.6 Contraventamento.....	28
4 CASOS DE ESTUDO.....	29
4.1 Introdução.....	29

4.2	Trabalhos anteriores realizados no Centro Histórico	34
4.3	Descrição dos edifícios estudados	37
4.3.1	Edifício I	39
4.3.2	Edifício II	41
4.3.3	Edifício III	44
4.3.4	Edifício IV	46
4.3.5	Edifício V	48
4.4	Metodologia das coberturas analisadas	51
4.4.1	Materiais	53
4.4.2	Quantificação das ações	54
4.4.3	Classe de Serviço	58
4.4.4	Classe de duração das ações	58
4.4.5	Dimensionamento pelo método dos coeficientes parciais	58
4.4.6	Combinações de ações	59
4.4.7	Modelos de cálculo	61
4.4.8	Verificação da segurança	64
4.4.8.1	Estado Limite Último	64
4.4.8.2	Estado Limites de Utilização	68
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	70
6	CONCLUSOES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	81
	Referências	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de madeira primitiva (Lourenço e Branco, 2012)	5
Figura 2 – Exemplificação do tipo de asna de madeira do Mosteiro de Santa Catarina (Branco, 2008)	6
Figura 3 – Exemplo de asna de Palladio	6
Figura 4 – Diferentes tipos de asnas segundo a região geográfica (Barbas, 2015; Branco, 2008): a) Asna tipo da região do sul da Europa; b) Asna tipo da região do centro e norte da Europa	7
Figura 5 – Esquema de uma cobertura tradicional	9
Figura 6 – Ilustração de uma asna tradicional (Israel, 2017)	10
Figura 7 - Tipos de asnas (Costa, 1995): a) Pequena asna; b) Asna simples; c) Asna de tesoura; d) Asna de mansarda; e) Asna de lanternim, f) Asna de alpendre; g) Asna de nível; h) Asna composta; i) Asna fabril simples; j) Asna fabril composta; k) Asna fabril de escoras	11
Figura 8 - Esquema com os elementos de travamento da cobertura	12
Figura 9 – Esquema com os elementos da estrutura secundária	13
Figura 10 - Ligações tradicionais de entalhe: a) Dente simples anterior; b) Dente simples posterior; c) Dente duplo	16
Figura 11 - Ligações tradicionais com respiga e mecha (Branco, et al., 2008): a) Encaixe entre perna e linha com respiga e mecha; b) Encaixe entre pendural, escora e linha com respiga e mecha; c) Encaixe de fileira com pendural e escora, usando talões auxiliares	16
Figura 12 – Tipos de pregos: a) Pregos quadrados; b) Pregos redondos lisos; c) Pregos anelares; d) Pregos torcidos	17
Figura 13 – Tipos de parafusos: a) Parafuso de enroscar; b) Parafuso de porca e anilha	18
Figura 14 – Tipos de cavilha	19
Figura 15 - Asna de Palladio com ligações metálicas	19
Figura 16 – Tipos de elementos de ligação metálicos (Branco, et al., 2008): a) Pé-de-galinha simples; b) Tê esquerdo e Tê direito; c) Esquadro; d) Cruzeta; e) Pé-de-galinha dobrado; f) Braçadeira	20
Figura 17 – Exemplificação de madres excêntricas relativamente ao nó escora/perna (Branco, et al., 2008)	23
Figura 18 – Exemplificação do efeito da deformação da asna com e sem fixação da linha ao pendural	24
Figura 19 – Exemplo de boa prática na colocação das madres (Branco, 2008)	25
Figura 20 - Exemplo da Ligação madre-perna (Sousa, et al., 2014)	25
Figura 21 – Exemplificação da ligação entre linha e perna (Sousa e Abrantes, 1998): a) com tira metálica; b) com pé-de-galinha dobrado	26
Figura 22 – Pormenores dos apoios da asna na parede (Costa, 1955): a) Apoio de asna para telhado com beiral; b) Apoio de asna para telhado com algeroz à vista; c) Apoio de asna para telhado com algeroz à vista sobre uma parede de tijolo; d) Apoio de asna para telhado de algeroz descarregando a um terço da espessura da parede; e) Apoio de asna para telhado de algeroz e platibanda; f) Apoio de asna para telhado de algeroz sobre parede	27
Figura 23 – Exemplificação do reforço da ligação perna – linha (Sousa e Abrantes, 1998): a) Com chapa metálica; b) Com braçadeira metálica	27
Figura 24 – Exemplos de contraventamento (Sousa e Abrantes, 1998): a) Contraventamento das pernas; b) Contraventamento das asnas	28
Figura 25 -Exemplo de contraventamento na extremidade de uma cobertura de quatro águas (Logsdon, 2002)	28
Figura 26 – Leiria medieval (Santos, 2008)	29

Figura 27 - Planta da cidade de Leiria em 1809 (Margarido, 1988)	30
Figura 28 - Planta da cidade de Leiria em 1938 (Margarido, 1988)	31
Figura 29 - Fases históricas de crescimento do centro urbano de Leiria (Margarido, 1988)	32
Figura 30 - Coberturas do centro histórico	33
Figura 31 - Planta de localização dos edifícios	38
Figura 32 – Edifício I (Israel, 2017).....	39
Figura 33 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício I	40
Figura 34 - Edifício II (Israel, 2017).....	41
Figura 35 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício II.....	42
Figura 36 - Edifício III (Israel, 2017).....	44
Figura 37 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício III.....	44
Figura 38 - Edifício IV (Israel, 2017)	46
Figura 39 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício IV	47
Figura 40 – Edifício V (Israel, 2017).....	49
Figura 41 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício V.....	50
Figura 42 - Metodologia de cálculo, adaptado (Negrão e Faria, 2009).....	52
Figura 43 – Esquema da ação do vento na cobertura.....	56
Figura 44 - Áreas de influência do edifício.....	57
Figura 45 – Modelo bidimensional das asnas dos edifícios em estudo.....	62
Figura 46 - Modelo tridimensional das coberturas dos edifícios em estudo	62
Figura 47 – Esquema para a determinação da rigidez da mola	63
Figura 48 – Comprimento de encurvadura da barra comprimida	66
Figura 49 - Componentes da deformação	69
Figura 50 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício I, para a ação permanente	70
Figura 51 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício I, para a ação permanente	71
Figura 52 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício II, para a ação permanente.....	71
Figura 53 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício II, para a ação permanente.....	71
Figura 54 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício III, para a ação permanente.....	72
Figura 55 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício III, para a ação permanente.....	72
Figura 56 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício IV, para a ação permanente	72
Figura 57 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício IV, para a ação permanente	73
Figura 58 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício V, para a ação permanente.....	73
Figura 59 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício V, para a ação permanente.....	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Regras de dimensionamento de asnas simples	22
Tabela 2 - Regras de dimensionamento de asnas mistas	22
Tabela 3 – Caraterização dos edifícios em estudo.....	38
Tabela 4 – Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício I	40
Tabela 5 - Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício II.....	42
Tabela 6 - Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício III.....	45
Tabela 7 - Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício IV	47
Tabela 8 - Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício V	50
Tabela 9 - Propriedades mecânicas do pinho bravo	53
Tabela 10 - Restantes cargas permanentes da cobertura segundo as Tabelas Técnicas (Farinha e Reis, 1993)	54
Tabela 11 - Sobrecarga da cobertura segundo o EC 1.....	55
Tabela 12 – Coeficiente de pressão exterior.....	56
Tabela 13 – Valores de pressão do vento por cada zona e para cada direção do vento	56
Tabela 14 - Classificação da duração das ações.....	58
Tabela 15 - Coeficientes ψ para edifícios – EC0 – Quadro A1.1.....	58
Tabela 16 - Coeficientes parciais de segurança ELU	59
Tabela 17 - Valor de k_{mod}	59
Tabela 18 – Rigidez da mola de cada edifício.....	63
Tabela 19 – Valores limite de deformação para vigas segundo o EC5	69
Tabela 20 - Resultados da verificação da segurança aos estados limites últimos para a asna mais desfavorável	76
Tabela 21 - Resultados da verificação da segurança para a estrutura completa.....	76
Tabela 22 - Resultados da verificação da flecha instantânea para a linha da asna mais desfavorável	77
Tabela 23 - Resultados da verificação da flecha a longo prazo para a linha da asna mais desfavorável	77
Tabela 24 - Resultados da verificação da flecha instantânea da estrutura completa.....	78
Tabela 25 - Resultados da verificação da flecha a longo prazo para a estrutura completa	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Em Portugal grande parte dos edifícios, especialmente os mais antigos são constituídos por coberturas que detêm na sua estrutura principal asnas de madeira. Deste modo é de todo o interesse aprofundar o conhecimento neste tipo de elementos.

As metodologias atuais de conservação e reabilitação de estruturas históricas solicitam análises estruturais cada vez mais detalhadas, o que torna necessário o desenvolvimento de modelos numéricos capazes de prever eficazmente o comportamento deste tipo de estruturas.

A caracterização de um modelo numérico, para a análise do comportamento estrutural deste tipo de construções é complexo, com incertezas que promovem desafios que estão essencialmente ligados com a complexidade da geometria e dos pormenores construtivos, com o desconhecimento das técnicas de construção usadas e com a ausência de conhecimento das patologias induzidas ao longo do tempo (Silva e Guedes, 2008).

Segundo Coignet (2005) existem três princípios indispensáveis e essenciais na estrutura de uma cobertura. O primeiro princípio, o princípio básico da construção de uma asna, é a triangulação. O segundo princípio, diz respeito à realização das ligações que deve ter em conta o plano da asna. O terceiro e último princípio, alusivo às cargas da cobertura que devem ser transmitidas através dos nós. Quando estes princípios não se verificam as asnas sofrem deformações, relacionadas com a qualidade da execução, com o comportamento ao longo do tempo, com as reações dos materiais utilizados e com as solicitações que recebem, pelo peso da cobertura e também pelo peso dos próprios elementos.

A presente dissertação tem como objetivo principal verificar a segurança das estruturas da cobertura de cinco edifícios do Centro Histórico de Leiria. Os edifícios em causa são de construção antiga datados entre os séculos VIII e XX. A estrutura da cobertura é composta por elementos de madeira, onde as asnas constituem o elemento principal de suporte da cobertura.

Para a análise da segurança estrutural das estruturas de cobertura existentes recorre-se à utilização de um método que permite incorporar o maior número possível de dados na análise estrutural, modelando as ações em modelos numéricos, neste caso realizam-se dois tipos de modelos, bidimensionais e tridimensionais. Com a utilização destes dois métodos, pretende-se obter uma análise mais rigorosa.

A segurança estrutural é feita através da comparação entre os valores de dimensionamento, obtidos pelos modelos, e os valores das resistências, preconizados pelo Eurocódigo 5. No final, enumeram-se as conclusões obtidas e sugerem-se algumas medidas de intervenção.

1.2 Objetivos da dissertação

Este trabalho tem como objetivo a avaliação da segurança estrutural de cinco coberturas do Centro Histórico de Leiria. Trata-se de uma investigação bastante importante, pela necessidade urgente que existe em requalificar o conjunto de edifícios que formam o centro histórico da cidade, através do melhoramento do edificado. Neste sentido todo o conhecimento será crucial para uma correta compreensão e avaliação das estruturas das coberturas. Neste seguimento, foram realizados modelos numéricos com a finalidade de verificar a segurança de cinco estruturas do centro histórico.

A avaliação da segurança destas estruturas antigas implica:

- Uma revisão bibliográfica que abranja o conhecimento sobre as asnas tradicionais de madeira;
- Uma revisão bibliográfica sobre a avaliação da segurança das coberturas de madeira;
- A caracterização das estruturas das coberturas tendo por base o levantamento geométrico e patológico;
- A modelação numérica das asnas e das coberturas completas;
- A análise dos modelos numéricos;
- A verificação da segurança fundamentada pela regulamentação em vigor.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação desenvolve-se em 6 capítulos, onde são abordados aspetos de análise e dimensionamento estrutural, simultaneamente com uma perspetiva geral da madeira, com o objetivo de enquadrar convenientemente um assunto que não é dos mais explorados.

O primeiro capítulo expõe a importância do tema abordado, os objetivos a atingir com a elaboração da dissertação e a organização da mesma.

O segundo capítulo tem como objetivo fazer a descrição das coberturas de madeira. É apresentado um resumo histórico da evolução das coberturas desde a pré-história, passando pelo renascimento até aos dias de hoje. São apresentadas algumas características que descrevem as coberturas em Portugal. De seguida é feita a exposição dos elementos estruturais que compõem a cobertura, nomeadamente a estrutura principal, a estrutura secundária e o revestimento. Por último referem-se os tipos de ligações, que podem ser tradicionais ou mecânicas.

No terceiro capítulo é feita uma introdução sobre como era realizada a avaliação da segurança estrutural antigamente e como é efetuada hoje em dia. Faz-se uma descrição fundamentada num estudo sobre o comportamento estrutural da asna mais vulgar, conhecida como asna simples. Por fim descrevem-se os pormenores construtivos, nomeadamente, o posicionamento das asnas, as ligações mais críticas e os contraventamentos.

No quarto capítulo começa-se por realizar a caracterização da zona de estudo, sendo abordado o passado do Centro Histórico de Leiria e o desenvolvimento que teve ao longo dos séculos. São enunciados alguns aspetos característicos da zona estudada, tais como o clima e os tipos de coberturas existentes. De seguida são apresentados os resumos de três trabalhos sobre as coberturas do Centro Histórico de Leiria. É feita a caracterização dos edifícios analisados e apresentada a metodologia usada no cálculo da verificação da segurança.

No quinto capítulo aborda-se a verificação da segurança dos cinco casos de estudo. Para obter os esforços e as deformações que possibilitam efetuar as necessárias verificações de segurança, recorre-se a um programa de cálculo automático. Este permite fazer dois modelos distintos, em duas e três dimensões, que possibilitam a avaliação dos esforços nos seus elementos, em função das ações, das características mecânicas dos materiais e

das características geométricas das secções. Com os resultados obtidos determinam-se possíveis propostas de reabilitação.

No sexto capítulo são expostas as conclusões finais, obtidas por meio da realização deste trabalho, e realizadas algumas recomendações para desenvolvimentos futuros.

2 COBERTURAS DE MADEIRA

2.1 Evolução histórica

Desde a antiguidade que as asnas de madeira constituem um sistema estrutural de grande importância para a evolução das construções. Na pré-história, quando o homem saiu das grutas onde habitava, a madeira foi a primeira matéria-prima a ser utilizada para a sua proteção. Devido à existência de madeira em abundância na natureza, à sua leveza, à sua resistência e à sua facilidade de trabalhar, esta tornou-se um material usado para diversos fins, desde a criação de utensílios até à construção de habitações.

A Figura 1 ilustra as primeiras estruturas em madeira, que se baseavam na utilização de ramos das árvores ou pequenos troncos, enterrados no solo e amarrados no topo, cobertos por todo o tipo de materiais orgânicos existentes, desde folhas, ervas, até mesmo a casca de árvores, cumprindo assim as exigências de abrigo e proteção contra os agentes atmosféricos.

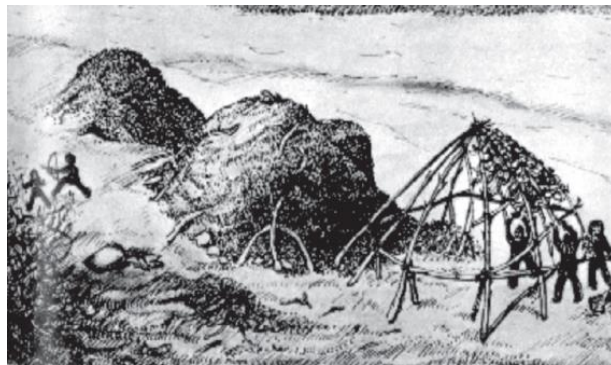


Figura 1 – Estrutura de madeira primitiva (Lourenço e Branco, 2012)

Através de manuais antigos de arquitetura sabe-se que na Grécia antiga já existiam coberturas com recurso a elementos de madeira que apresentavam um funcionamento muito similar ao das asnas, no entanto esses elementos não funcionariam como asnas em si, mas sim como vigas simplesmente apoiadas (Branco, 2008).

Não é possível descrever com exatidão a origem da primeira asna como estrutura de cobertura, uma vez que é consequência de vários desenvolvimentos de ideias e conceitos que foram melhorando ao longo do tempo. No entanto, sabe-se que a configuração da estrutura das asnas de madeira tem por base as técnicas romanas usadas na construção das coberturas das igrejas cristãs do século IV. Nesta época já era utilizado um tipo de asnas simples com recurso a um elemento vertical (Santos, 2009).

Acredita-se que o exemplo mais antigo de asnas de madeira é do tipo asnas simples, que se encontra localizado no Mosteiro de Santa Catarina no Monte Sinai, construído pelo arquiteto Ayla Stephen, no século VI. Neste edifício as asnas são constituídas por um elemento horizontal, duas pernas inclinadas para a formação das vertentes do telhado, um elemento vertical ligado ao vértice do telhado e às pernas, todos com a mesma secção transversal e por duas escoras inclinadas que ligam as pernas ao elemento vertical com secção transversal menor (Figura 2) (Gomes, 2015).

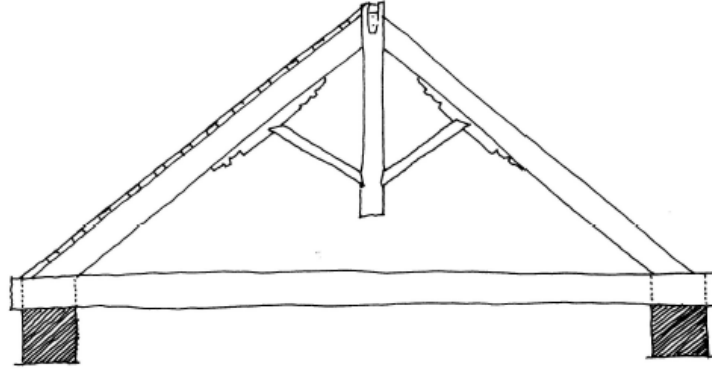


Figura 2 – Exemplificação do tipo de asna de madeira do Mosteiro de Santa Catarina (Branco, 2008)

Contudo, será apenas a partir do Renascimento, no início do século XV, que Mariano di Jacopo apresenta várias configurações de asnas, tais como: asna simples, asna sem a presença do elemento linha e asnas mistas onde eram conjugados elementos de madeira e elementos metálicos.

Um século depois, século XVI Andrea Palladio apresenta também várias configurações com a particularidade de o elemento vertical se encontrar apoiado no elemento horizontal. Este esquema de asna de Palladio, ilustrado na Figura 3, é uma das configurações mais utilizadas em Portugal para vãos de dimensões não muito grandes (nunca superior a 7 metros) (Santos, 2009).

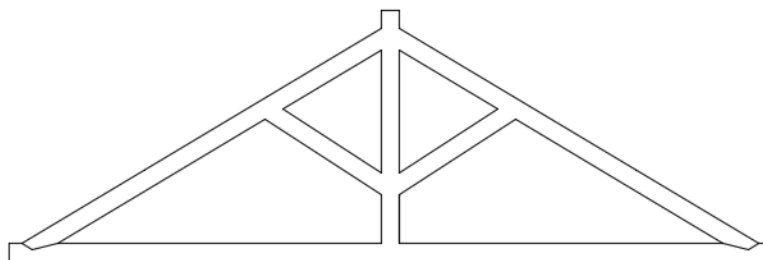


Figura 3 – Exemplo de asna de Palladio

Importa referir que a configuração das asnas varia de região para região, por exemplo, nas regiões do sul da Europa são usadas estruturas mais simples e de inclinações mais suaves, (Figura 4a). Por outro lado nas regiões do centro e norte da Europa são utilizados esquemas mais complexos e com inclinações mais abruptas, que seguem um estilo gótico, (Figura 4b) (Bastos, 2011).

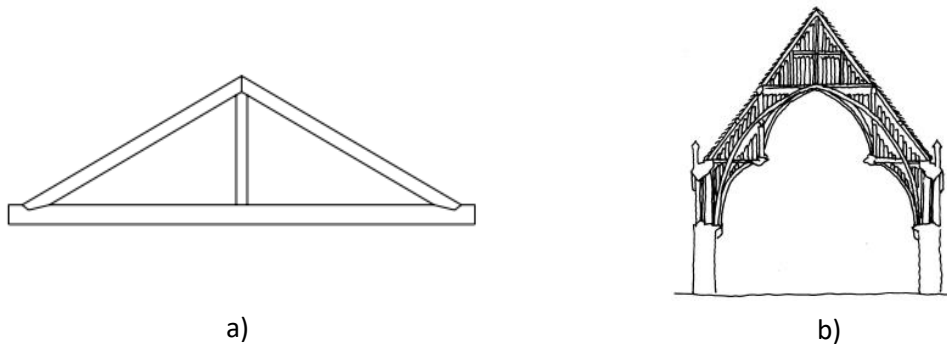


Figura 4 – Diferentes tipos de asnas segundo a região geográfica (Barbas, 2015; Branco, 2008):

a) Asna tipo da região do sul da Europa; b) Asna tipo da região do centro e norte da Europa

Outro aspeto importante, diz respeito ao facto de até ao século XIX, as asnas de madeira serem construídas como vigas simplesmente apoiadas ou com um sistema reticular. Neste tipo de configurações a linha ficava sujeita a esforços de flexão consideráveis. Após este período, as estruturas das asnas passaram a ser concebidas de modo a que os esforços axiais de compressão e de tração fossem os principais esforços atuantes. Sendo a flexão evitada com a separação do Pendural da Linha, deste modo, o sistema estrutural passou a ser estático e articulado (Gomes, 2015).

2.2 As coberturas em Portugal

A madeira como material de construção sempre foi muito utilizada em Portugal, nomeadamente na construção de pisos, paredes e coberturas. No entanto com o aparecimento do betão armado, os pisos e as paredes deixaram de ser executados com este material, mas as coberturas, pelo contrário, permaneceram a ser construídas em madeira com grande frequência.

No edificado antigo, distinguem-se vários tipos de coberturas. As coberturas inclinadas são as mais predominantes, existindo em muito menor número as coberturas planas (em terraço) e as coberturas curvas (abóbadas e cúpulas). A inclinação depende, essencialmente, da região e dos agentes atmosféricos condicionantes dos locais em que

se encontram (quantidade de precipitação, probabilidade de queda de neve, etc.) (Roseiro, 2012).

Todas as coberturas em madeira na sua estrutura principal possuem asnas. As asnas são uma espécie de vigas armadas em forma triangular, constituídas por várias peças de madeira, que suportam as coberturas dos edifícios. A geometria das asnas depende da configuração da cobertura que pode ser de uma, duas ou mais águas e de algumas condicionantes como o vão a vencer, as ações a ter em conta, a inclinação da cobertura, a arquitetura e a execução (Branco, et al., 2008).

A cobertura portuguesa típica pode ser descrita com a presença de uma ou mais asnas simples como principal elemento estrutural, de duas águas, cujas pendentes assumem valores entre 20 e 30 graus, revestidas a telha cerâmica. Estas estruturas encontram-se dispostas paralelamente umas às outras, sendo normalmente, executadas para vencer vãos que variam entre os 5 e os 8 metros.

Quanto às espécies de madeira, as mais utilizadas nas coberturas de madeira Portuguesas são o Pinho Bravo (*Pinus pinaster*), o Castanho (*Castanea sativa*) e o Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill). O Castanho é normalmente associado às obras das ordens eclesiásticas (mosteiros e igrejas). Como madeira mais durável, está presente nas construções mais antigas. O Eucalipto nos últimos anos ganhou importância especialmente por ser uma madeira barata e abundante. O Pinho nacional sempre foi amplamente usado no sector da construção (Branco e Lourenço, 2014).

2.3 Elementos estruturais da cobertura

A cobertura tradicional é composta por uma estrutura de madeira revestida a telha. Sendo a estrutura típica e mais comum que se encontra no edificado dos centros históricos, onde as coberturas apresentam várias configurações geométricas, resultantes quer da região em que se inserem, quer da forma do edifício, o que conduz a diferentes elementos estruturais, mais ou menos complexos consoante a respetiva cobertura.

As coberturas são constituídas por dois tipos de estruturas, a estrutura principal e a estrutura secundária, e por fim o revestimento (Figura 5). A estrutura principal apoia diretamente nas paredes resistentes e é responsável pela absorção de esforços, enquanto que a estrutura secundária se encontra disposta entre a estrutura principal e o revestimento (vulgarmente a telha), tem a função de criar condições técnicas para colocação adequada

da telha. Por último, o revestimento que têm como principais funções proteger as partes internas do edifício, contra os vários agentes atmosféricos e drenar as águas pluviais.

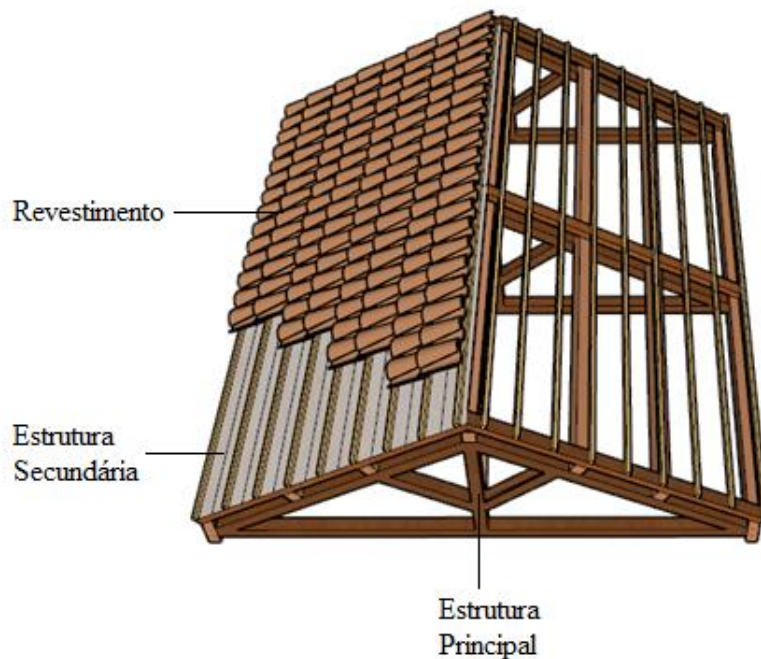


Figura 5 – Esquema de uma cobertura tradicional

2.3.1 Estrutura principal

A estrutura principal é formada pelo conjunto de elementos (asnas e travamentos) que suportam a cobertura. Como referido anteriormente, esta estrutura absorve os esforços e transmite-os para as paredes resistentes onde está apoiada.

As asnas de uma forma tradicional são constituídas por (Moreira, 2009):

- Linha - elemento horizontal com a função de travar a ligação das duas pernas.
- Perna - elemento em posição inclinada que define a inclinação da vertente do telhado. Inferiormente assenta sobre a linha e superiormente, no topo une-se ao pendural.
- Pendural - elemento vertical colocado no eixo de simetria da asna em delimitação ao vértice do telhado. Uma vez que é um elemento comum a todas as peças, a sua principal função consiste em fazer a ligação entre todos os elementos, tornando a estrutura mais estável.

- Escora - elemento inclinado, cuja função é a da ligação das pernas ao pendural, impedindo a deformação por flexão das mesmas, quando solicitadas por ações exteriores.

Na Figura 6 apresenta-se uma asna onde se podem ver todos os elementos descritos anteriormente.



Figura 6 – Ilustração de uma asna tradicional (Israel, 2017)

As asnas não são representadas apenas por uma única solução, sendo a descrição feita atrás a que vulgarmente se aplica na estrutura principal das coberturas. O modo de funcionamento estrutural de outras soluções é semelhante ao da asna simples. A variedade é grande, na Figura 7 são representados os tipos de asnas de madeira que são mais aplicados nas nossas construções.

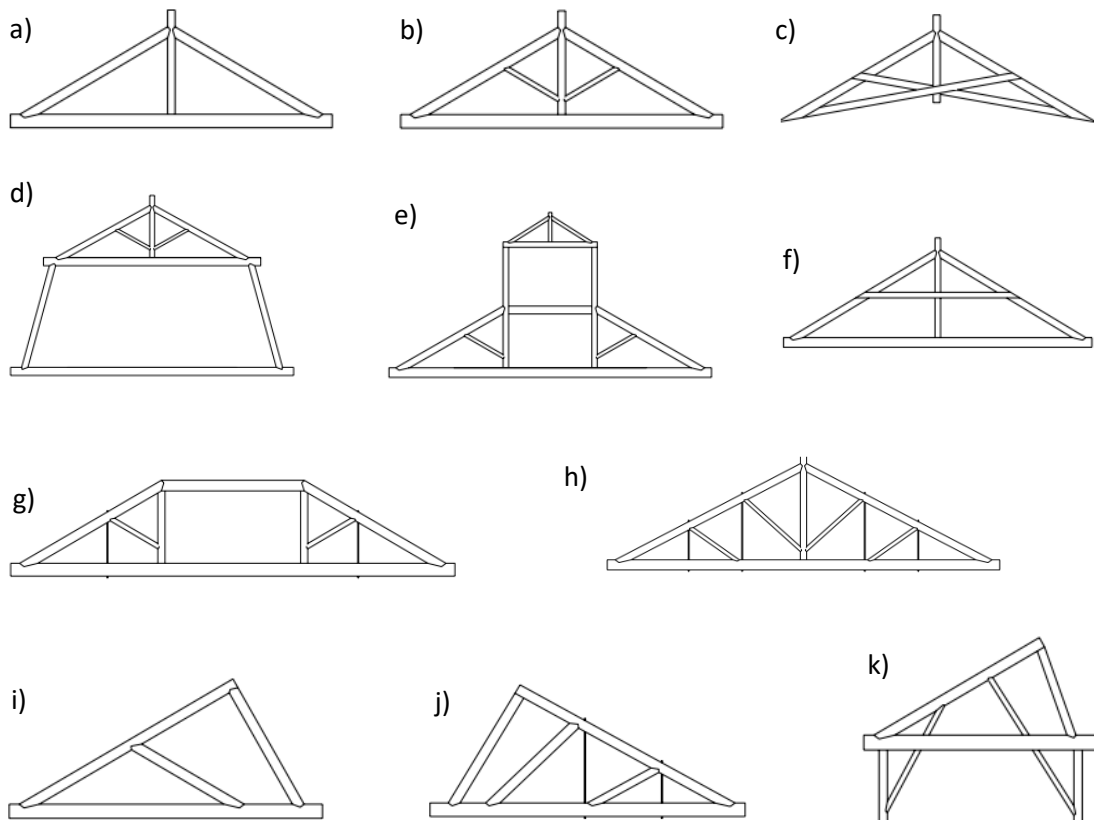


Figura 7 - Tipos de asnas (Costa, 1995): a) Pequena asna; b) Asna simples; c) Asna de tesoura; d) Asna de mansarda; e) Asna de lanterna; f) Asna de alpendre; g) Asna de nível; h) Asna composta; i) Asna fabril simples; j) Asna fabril composta; k) Asna fabril de escoras

Os travamentos são elementos que têm como função limitar os deslocamentos e as deformações que podem ocorrer devido às asnas não se encontrarem ligadas entre si. Deste modo, consideram-se elementos de travamento todos os elementos que se encontram dispostos perpendicularmente ao alinhamento das asnas, proporcionando a ligação entre as asnas (Figura 8).

Os travamentos incluem os seguintes elementos (Moreira, 2009):

- Frechal - elemento aplicado sobre as paredes resistentes, servindo de apoio às asnas, este elemento permite uma distribuição mais uniforme dos esforços da cobertura para as paredes resistentes.
- Madre - elemento paralelo ao frechal colocado sobre as pernas da asna, estabelece a ligação entre asnas para que estas funcionem em conjunto e não como elementos individuais. Constitui também um apoio à estrutura secundária.

- Fileira – elemento horizontal, colocado no topo da cobertura sobre os diversos pendurais, define o vértice do telhado e serve de apoio à estrutura secundária.
- Diagonal - elemento colocado em diagonal entre asnas de forma a reforçar a ligação.

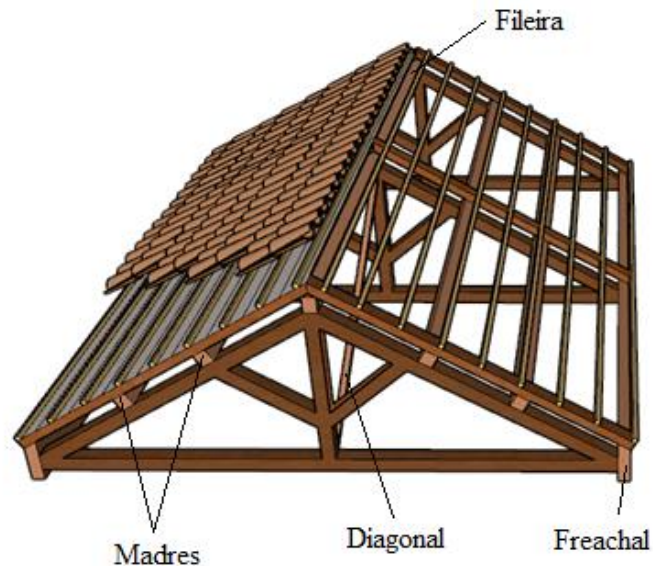


Figura 8 - Esquema com os elementos de travamento da cobertura

2.3.2 Estrutura secundária

A estrutura secundária é um complemento da estrutura principal e serve de suporte ao revestimento. Constituída por varas, guarda-pó e ripas, esta estrutura assenta sobre as madres da estrutura principal e tem como funções conferir apoio aos elementos do revestimento e transmitir as cargas às madres, que por sua vez transmitem às asnas e por fim às paredes resistentes (Figura 9).

As varas são elementos sobrepostos perpendicularmente às madres e servem de apoio ao forro. O seu espaçamento está condicionado sobretudo pela resistência e rigidez dos elementos sobrepostos que nelas se apoiam e devem resistir às cargas que lhe são aplicadas. O guarda-pó ou forro pode ser constituído por elementos rígidos ou flexíveis. Os forros flexíveis, podem ser constituídos por mantas de feltros betuminosos ou filmes plásticos. Os forros rígidos podem ser realizados a partir de madeira ou materiais derivados e são executados de modo a conferir um reforço à proteção que já é feita pelo revestimento da cobertura, servindo de suporte para as ripas, uma vez que normalmente, é colocado acima das varas. As ripas são elementos dispostos perpendicularmente às varas

e na mesma direção das madres, vencem vãos de pequeno valor, estando o seu espaçamento dependente da dimensão do revestimento que suportam (Moreira, 2009).

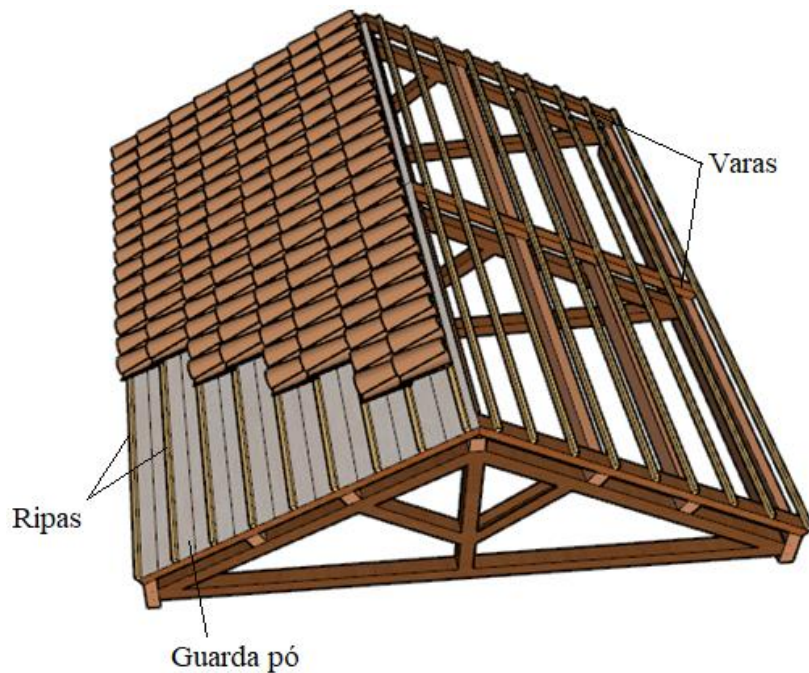


Figura 9 – Esquema com os elementos da estrutura secundária

2.3.3 Revestimento

O revestimento da cobertura deve ser leve, impermeável, incombustível, liso exteriormente e resistente face aos agentes atmosféricos. Leve para aliviar a estrutura que suporta o telhado, impermeável para a chuva não entrar para o interior, incombustível para não se inflamar devido à queda de detritos das chaminés, liso exteriormente de modo a facilitar o escoamento da água de modo a não manter a acumulação de poeiras bem como de parasitas vegetais e resistente aos agentes atmosféricos, por forma a estes não degradarem nem destruírem (Macedo, 2012).

Os telhados da edificação antiga em Portugal são maioritariamente revestidos a telha cerâmica. A telha cerâmica é um material de longa durabilidade e ecológico, tem uma qualidade de produção que é progressivamente exigente, na qual os requisitos e especificações de características estão expressos em normas europeias e respetivos ensaios funcionais para avaliação do seu desempenho.

Existem diversos tipos de telha, que apresentam diferentes características geométricas com encaixes distintos e uma variedade de acessórios para cada uma delas.

As telhas cerâmicas mais vulgares são a telha Canudo, a telha Marselha e a telha Lusa, sendo menos vulgar a telha Romana e a telha plana (Sousa e Abrantes, 1998).

2.4 Ligações

Desde o início, que nas construções em madeira houve necessidade de efetuar as ligações entre os vários elementos. O primeiro exemplo de edificação efetuado pelo Homem com este tipo de material são as cabanas. Resumidamente, como referido anteriormente, nos primórdios a forma utilizada foi de uma estrutura composta por ramos inclinados enterrados no solo e ligados na extremidade superior por elementos tais como o vime ou tiras de pele, surgindo assim, o primeiro tipo de ligação (Soares, 2014).

Por mais simples que seja uma cobertura, existe sempre a necessidade de ligar os vários elementos constituintes. Nas estruturas de madeira, as ligações são normalmente os pontos mais delicados e mais fracos por serem zonas críticas, sujeitas a esforços e tensões localizadas, exigindo certos cuidados de modo a não ser colocada em causa a estabilidade da estrutura.

Com a evolução da humanidade desenvolveram-se ferramentas que permitiram transformar a madeira de tal forma que se descobriam as direções preferenciais para esta ser trabalhada.

Ao longo dos tempos as técnicas foram sendo aperfeiçoadas e foi-se percebendo que a resistência de uma estrutura é condicionada pela resistência da ligação e que a rigidez influencia a distribuição de esforços e os eventuais deslocamentos que se venham a verificar.

Dependendo do tipo de esforços a transmitir, existem diferentes tipos de soluções que podem ser adotadas para a ligação entre os vários elementos da estrutura de madeira, estas podem subdividir-se em dois grandes grupos, as ligações tradicionais e as ligações metálicas que serão detalhadas mais à frente.

Segundo Madsen, citado por Almeida (2012) existem um conjunto de requisitos aplicáveis a todo o tipo de ligações, que deve ser garantido por forma a que se verifique efetivamente um bom desempenho estrutural que são descritos seguidamente.

As ligações devem ter uma capacidade resistente adequada às forças que têm de transmitir. Devem ser avaliados todos os esforços que se desenvolvem nos elementos a ligar, garantindo a verificação das resistências mecânicas de todos os elementos.

A deformação ou o deslizamento das ligações deve ter-se conta, porque fenómenos de fluência, folgas, atritos e erros de fabrico dos elementos que constituem as ligações condicionam o comportamento de toda a estrutura.

A inversão do sentido das forças atuantes é uma situação que limita a utilização de ligações tradicionais. Estas transmitem os esforços essencialmente por contacto, trabalhando apenas numa direção, pelo que são frágeis aquando da inversão de esforços. Daí que as ligações tradicionais de madeira, normalmente realizadas através de entalhes, são complementadas pela colocação de elementos metálicos com a função de manter o contacto entre as peças ligadas quando existe a possibilidade de inversão de forças.

O modo de rotura de uma ligação deve ter elevada ductilidade, pois as consequentes grandes deformações que antecedem a rotura constituem um aviso do estado da estrutura, sendo que por outro lado, permitem a dissipação de energia, comparativamente com materiais de comportamento frágil, cujo modo de rotura é difícil de antecipar.

A rigidez das ligações, conforme já referido, tem evidente importância na distribuição de esforços pelos elementos.

2.4.1 Ligações tradicionais

A forma mais antiga de efetuar as ligações das asnas é através das chamadas ligações tradicionais ou samblagens, onde a transmissão de esforços entre os elementos se dá pela ação do atrito e compressão na interface dos elementos em causa (Branco, et al., 2008). O contacto entre os elementos a unir é normalmente efetuado através de entalhe que pode ser realizado por diferentes tipologias. Na Figura 10 representam-se os três tipos de ligações dentadas: a) entalhe de dente simples aplicado na parte anterior da zona de contato entre os elementos, b) entalhe dente simples aplicado na parte posterior da zona de contato entre elementos e c) entalhe de dente duplo.

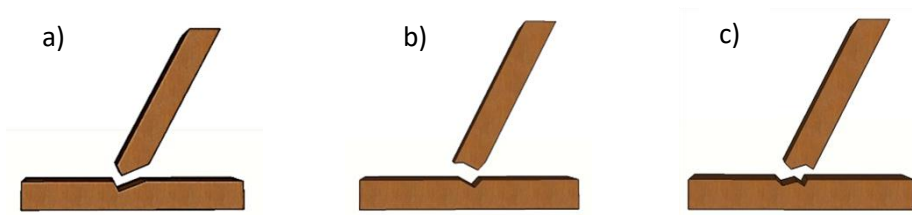


Figura 10 - Ligações tradicionais de entalhe: a) Dente simples anterior; b) Dente simples posterior; c) Dente duplo

O contacto entre os diferentes elementos pode ser complementado através da execução de uma respiga e de uma mecha, como se pode verificar na Figura 11. A respiga corresponde a uma saliência criada num dos topos do elemento que irá encaixar numa reentrância criada no outro elemento a que se quer fazer a ligação. A esta reentrância dá-se o nome de mecha. As ligações com recurso a respiga e mecha garantem uma perfeita conexão entre os elementos e previnem deslizamentos laterais (Bastos, 2011), exigindo no entanto uma mão de obra mais cuidada (Costa, 1955), por forma a que a ligação tenha um comportamento mais satisfatório possível.

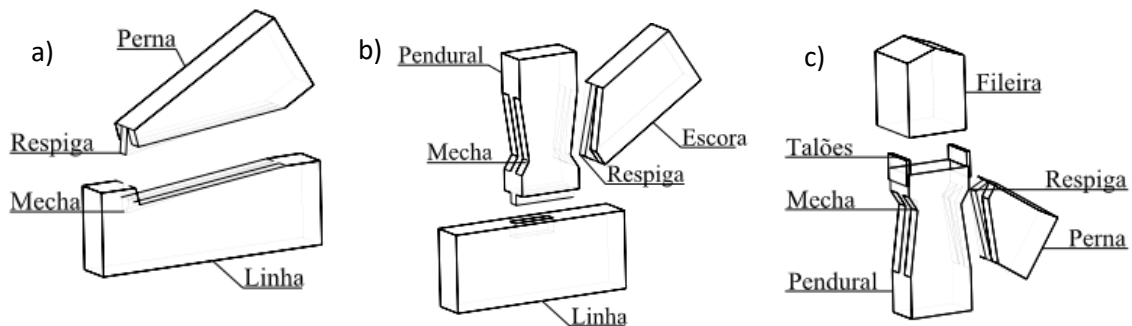


Figura 11 - Ligações tradicionais com respiga e mecha (Branco, et al., 2008): a) Encaixe entre perna e linha com respiga e mecha; b) Encaixe entre pendural, escora e linha com respiga e mecha; c) Encaixe de fileira com pendural e escora, usando talões auxiliares.

2.4.2 Ligações mecânicas

Com a descoberta do aço as ligações tradicionais por samblagens passaram a ser substituídas por ligações com recurso a elementos metálicos. Este tipo de elementos é utilizado com o objetivo de impedir deformações no plano ortogonal à estrutura, prever e responder satisfatoriamente a inversões de esforços, impedir o deslizamento lateral das peças e pode ser aplicado conjuntamente com ligações tradicionais servindo de

complemento, minimizando deste modo eventuais defeitos resultantes da execução das samblagens.

No âmbito destas ligações existe uma grande variedade de soluções, assim sendo, em função da forma como a força é transmitida os ligadores metálicos podem ser divididos em dois grupos, os ligadores do tipo cavilha e os ligadores planos.

A transmissão de forças nos ligadores do tipo cavilha, é realizada através da pressão que o ligador exerce sobre a madeira na face do furo de inserção. Este tipo de ligadores pode ser inserido na madeira de forma paralela, oblíqua ou transversalmente ao fio da madeira. Sendo o último caso o mais frequente e o mais eficiente, do ponto de vista mecânico. Estes elementos de ligação são submetidos normalmente a esforços de flexão e corte.

Nos ligadores planos a força é distribuída pela superfície de madeira que está em contacto com o ligador (Fernandes, 2014).

São exemplos de ligadores do tipo cavilha: os pregos, parafusos e as cavilhas. No caso dos ligadores planos destacam-se as chapas metálicas.

- Pregos

Os pregos são os conectores metálicos mais simples para executar a ligação entre peças de madeira. Este tipo de ligador está vocacionado para resistir ao corte embora apresente também alguma resistência ao arranque. Dependendo do diâmetro do prego, das características da espécie de madeira e da ligação pode ser necessário efetuar uma pré-furação. Os pregos, Figura 12, podem ter o formato redondo ou quadrado e podem ser lisos, torcidos ou anelares (Cunha, 2013).

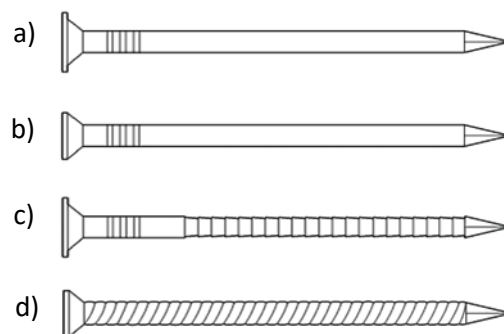


Figura 12 – Tipos de pregos: a) Pregos quadrados; b) Pregos redondos lisos; c) Pregos anelares; d) Pregos torcidos

- Parafusos

Os parafusos são um ligador metálico de secção circular, com uma cabeça de diâmetro maior que pode apresentar uma secção hexagonal, quadrada ou redonda. Normalmente, a parte lisa da espiga corresponde a 40% do seu comprimento total. Para evitar a fissuração da madeira existe a necessidade de pré-furação, antes de ser enroscado o parafuso, considerando que o diâmetro da pré-furação deve ser ligeiramente inferior ao do parafuso, de modo obter resistência ao corte e alguma resistência ao arranque.

Os parafusos mais comuns são os parafusos de enroscar e os parafusos de porca e anilha (ver Figura 13). Os parafusos correntes são ligadores metálicos com corpo roscado que termina numa ponta também roscada e os parafusos de porca têm a função de assegurar que os elementos permaneçam ligados numa eventual ação lateral. Conjuntamente com o parafuso e a porca, são também utilizadas anilhas em ambos os topos, sendo estas de especial importância para a distribuição da força perpendicular às fibras por uma área adequada, de modo a não haver esmagamento localizado (Cunha, 2013).



Figura 13 – Tipos de parafusos: a) Parafuso de enroscar; b) Parafuso de porca e anilha

- Cavilhas

Os conetores do tipo cavilha são também ligadores metálicos, caracterizados pela sua forma cilíndrica, com diâmetro constante e onde o comprimento é muito superior ao diâmetro (ver Figura 14). Estas barras de secção circular tal como os parafusos de porca são colocadas em furos ajustados havendo, portanto, uma necessidade de pré-furação. Contudo, no caso das cavilhas o diâmetro do furo tem de ser ligeiramente inferior ao da cavilha de forma a ser realizada uma introdução por cravação através de pressão e assim, garantir a sua eficácia na transmissão dos esforços (Mendes, 1994). As forças neste tipo de ligação atuam perpendicularmente ao conector sendo frequente o seu uso para resistir ao corte (Hilário, 2013).

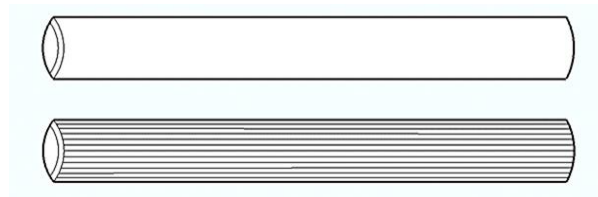


Figura 14 – Tipos de cavilha

- Ligadores metálicos

Os ligadores metálicos são elementos vulgarmente conhecidos como ferragens, sendo que os mais comuns em asnas de madeira são: i) pé de galinha para a ligação das pernas ao pendural; ii) Tê para a ligação das pernas às escoras; esquadro para a ligação entre o pendural e a perna (no caso de meia-asna); iii) pé de galinha dobrado para a ligação do pendural à linha; e a braçadeira que aperta as pernas à linha (Lopes, 2007). Na Figura 15 apresenta-se a distribuição dos ligadores metálicos mais vulgares nas ligações de uma asna de madeira e na Figura 16 apresenta-se pormenores de ligadores com a inclusão do esquadro que reforça a ligação das pernas à linha e a cruzeta que reforça a ligação da linha às escoras.

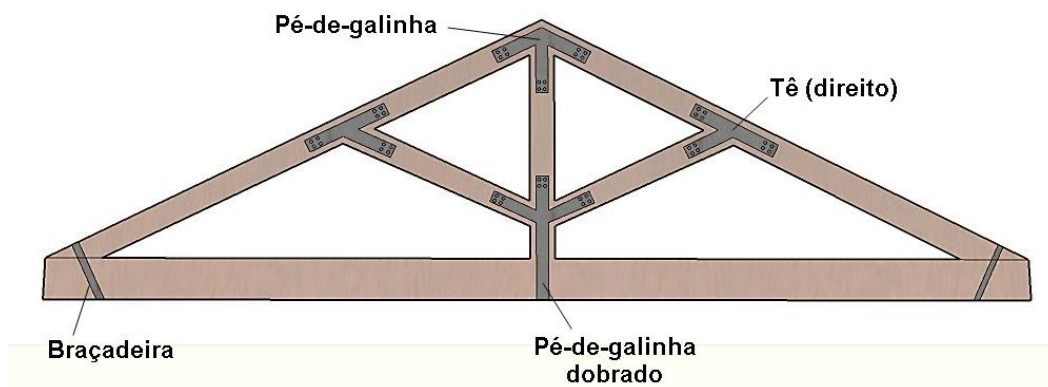


Figura 15 - Asna de Palladio com ligações metálicas

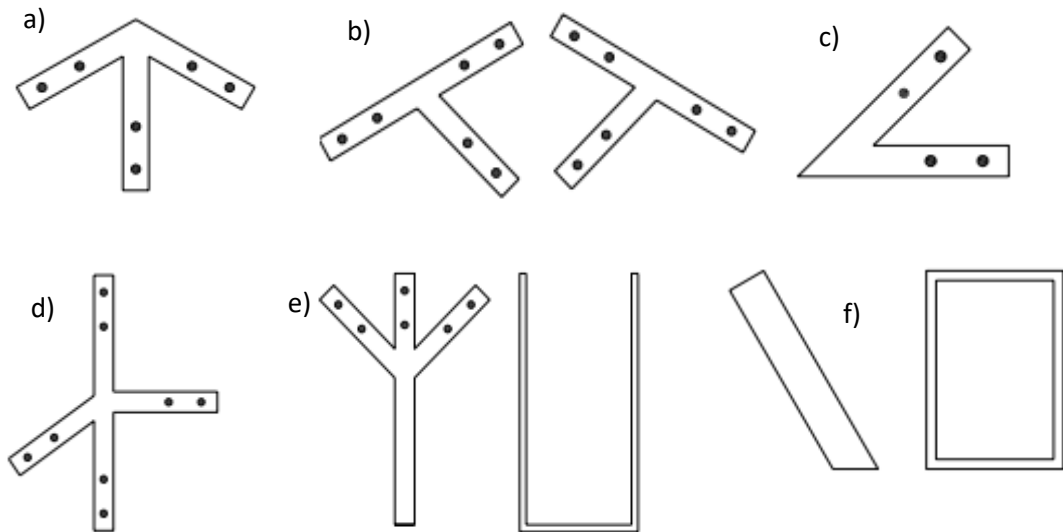


Figura 16 – Tipos de elementos de ligação metálicos (Branco, et al., 2008): a) Pé-de-galinha simples; b) Tê esquerdo e Tê direito; c) Esquadro; d) Cruzeta; e) Pé-de-galinha dobrado; f) Braçadeira

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 insere 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, insere-se pela extremidade da linha e fixa-se apenas à perna, por um parafuso de rosca de madeira ou mesmo por um prego.

Estes elementos 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 na face da madeira onde assentam (Lopes, 2007).

Todos estes tipos de ligadores metálicos, para funcionarem satisfatoriamente, deverão ser dotados de uma boa durabilidade, resistência à corrosão e têm que ser capazes de acompanhar as variações de dimensão da madeira, quer esta ocorra por retração ou dilatação (Santos, 2009).

3 AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA DE COBERTURAS DE MADEIRA

3.1 Introdução

Os manuais antigos de construção Portugueses que chegaram até aos dias de hoje são escassos, no entanto, existe uma enciclopédia bem completa que se denomina por Enciclopédia Prática da Construção Civil. Esta compilação é composta por um conjunto de cadernos editados por F. Pereira Costa (1955) Contém descrições e ilustrações pormenorizadas das metodologias construtivas dos diversos elementos constituintes dos edifícios, incluindo coberturas e pavimentos de madeira.

No século XX, as tipologias de asnas mais comuns em Portugal eram as asnas simples e as asnas compostas. As asnas simples, também designadas por vulgar ou de Palladio, eram adotadas para vãos até aos 8 m, sendo constituídas por uma linha horizontal, duas pernas, um pendural e duas escoras. As asnas compostas serviam para vencer vãos maiores, até aos 12 m, sendo formadas pela linha, duas pernas, um pendural e por quatro ou mais escoras travadas por tirantes de ferro, que ligam o encontro das escoras com as pernas à linha, na vertical. As madres destes dois tipos de asnas eram colocadas sobre as pernas, coincidindo com os pontos de encontro destas com as escoras (Brites, 2011).

Na enciclopédia citada anteriormente é feita referência ao modo como antigamente era realizado o cálculo ou projeto da maioria das asnas de madeira. Este era efetuado com recurso a regras simples e tabelas, excetuando-se alguns casos muito especiais. O dimensionamento era realizado em função do vão, tendo também em conta o afastamento entre as asnas. O dimensionamento das asnas era elaborado por mestres carpinteiros sábios e experientes.

As dimensões das diferentes peças eram fornecidas por tabelas, em função do vão a vencer. As dimensões dadas nestas tabelas de cálculo admitiam um espaçamento de 3,50 m entre asnas. O assentamento das asnas nas paredes era realizado preferencialmente de forma a que o encontro dos eixos da linha e da perna se faça a 1:3 da espessura da parede, devendo esta apoiar num elegimento de cantaria ou betão. Caso tal não fosse possível, dever-se-ia realizar um cachorro em cantaria que saísse fora do plano da parede, sendo nestes casos permitido que os eixos da perna e da linha se encontrassem à face (interior) da parede.

Na Tabela 1 e na Tabela 2 são apresentados os exemplos de tabelas de cálculo, presentes na Enciclopédia Prática da Construção Civil (Costa, 1955), para as asna simples e para as asnas mistas, respetivamente.

Tabela 1 - Regras de dimensionamento de asnas simples

Vãos	Linhas	Pernas	Escoras	Pendurais	Madres	varas
5,00	12x10	12x10	10x10	10x10	16x10	6x4
6,00	14x10	16x10	12x10	10x10	18x10	6x4
7,00	14x12	16x12	12x12	12x12	18x10	8x6
8,00	16x12	20x12	12x12	12x12	20x10	8x6

Tabela 2 - Regras de dimensionamento de asnas mistas

Vãos	Linhas	Pernas	Escoras		Pendurais	Tirantes		Madres	varas
			A	B		C	D		
9,00	14x12	16x12	12x12	12x12	12x12	12Ø	9Ø	18x10	8x6
10,00	16x14	16x14	14x14	14x14	14x14	12Ø	9Ø	18x10	8x6
11,00	16x14	16x14	14x14	14x14	14x14	15Ø	12Ø	20x10	8x6
12,00	16x14	16x14	14x14	14x14	14x14	15Ø	12Ø	20x10	8x6

Hoje em dia são utilizadas normas e regulamentos que definem não só o dimensionamento de estruturas de madeira através do Eurocódigo 5 (2007), mas também classes de resistência e qualidade da madeira a utilizar.

3.2 Comportamento estrutural das asnas simples

As asnas tradicionais portuguesas estão essencialmente sujeitas a esforços axiais, e esforços de flexão provocados pelo peso próprio e por carregamentos assimétricos (Branco, et al., 2006).

Branco, et al (2005) realizaram um estudo sobre o comportamento estrutural das asnas vulgares, ou seja, a chamada asna simples, perfeitamente triangular, também denominada asna de Palladio, constituída por linha, pernas, pendural e escoras. O objetivo deste estudo foi o de avaliar o comportamento estático e dinâmico de asnas simples de madeira. Foi feita uma análise do comportamento estrutural destas asnas sob o efeito de ações simétricas e assimétricas, de forma a estudar alguns parâmetros como a importância da ligação pendural-linha, a rigidez das ligações e a colocação das madres com ou sem excentricidade relativamente aos nós. A análise foi realizada com o auxílio do programa de elementos finitos *SAP 2000* e as ações estimadas tiveram em conta as considerações regulamentares de acordo com o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de

Edifícios e Pontes (RSA, 1983). Entre as principais conclusões do referido estudo salientam-se as seguintes:

- As pernas são os elementos mais carregados, apresentando tensões normais e de corte. A linha encontra-se tracionada exibindo flexão apenas devido ao seu próprio peso enquanto o pendural e as escoras apresentam apenas esforços axiais de tração e compressão, respetivamente.
- As estruturas planas, como as asnas, são submetidas a carregamentos concentrados nos nós, sem que haja flexão dos elementos, a distribuição dos esforços na estrutura resulta diretamente da geometria das asnas. No entanto, este comportamento pode ser alterado com facilidade se o modelo estático for alterado.
- Nas ações assimétricas, como por exemplo o vento, a neve ou o sismo, numa estrutura plana como é o caso da asna a influência da rigidez das ligações é condicionante. Quando a estrutura é submetida a cargas pontuais aplicadas diretamente nos nós, sem provocar qualquer flexão, a distribuição dos esforços é em função da sua geometria.
- A excentricidade das madres relativamente aos nós da asna provoca uma alteração na distribuição dos esforços, mais especificamente nas pernas, podendo até comprometer a segurança destes elementos (Figura 17).



Figura 17 – Exemplificação de madres excêntricas relativamente ao nó escora/perna (Branco, et al., 2008)

- A linha deve estar fixa ao 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 da asna (Figura 18).

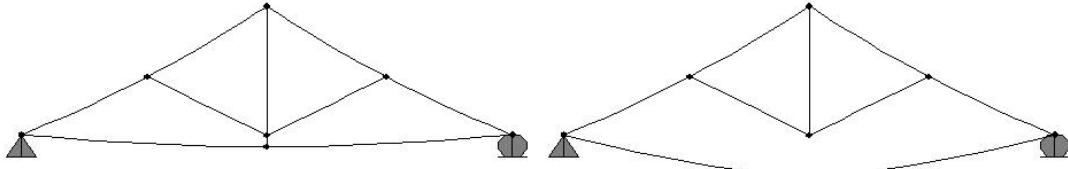


Figura 18 – Exemplificação do efeito da deformação da asna com e sem fixação da linha ao pendural

- As ligações perna-linha são as mais condicionantes, não só pelos esforços que nestes elementos se concentram, mas também por serem zonas onde a deterioração biológica é mais frequente.
- Os apoios devem ser capazes de resistir a movimentos horizontais. As forças de atrito não são suficientes para resistir a movimentos horizontais causados como exemplo, por sismos.

3.3 Pormenores construtivos

De seguida são apresentados alguns pormenores fundamentais que têm muita influência no bom comportamento de uma estrutura de cobertura composta por asnas de madeira.

3.3.1 Posicionamento das madres

As asnas de madeira são projetadas para se comportarem como uma treliça, ou seja, os elementos só devem estar submetidos a esforços axiais e, para isso, as cargas pontuais devem estar aplicadas nos nós. Quando o número de madres é superior ao número de escoras, as pernas são sujeitas a momentos fletores. Como regra prática, o número de escoras deverá ser igual ao número de madres da cobertura em causa, tal como mostra a Figura 19 (Lopes, 2007). O bom funcionamento estrutural de uma asna depende fundamentalmente da configuração e da geometria dos seus elementos.

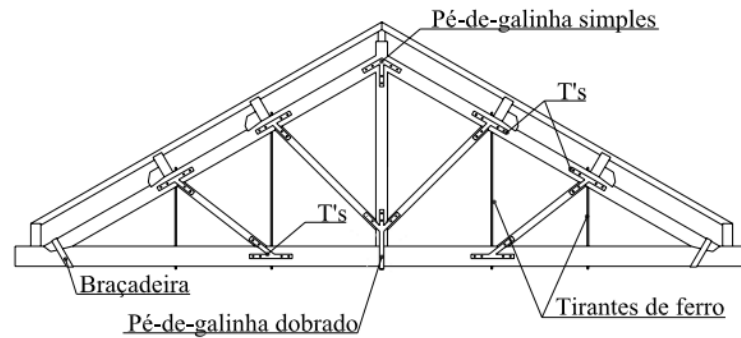


Figura 19 – Exemplo de boa prática na colocação das madres (Branco, 2008)

3.3.2 Ligação madre – perna

O apoio das madres sobre as asnas é feito com recurso a calços de madeira ou berços metálicos, para evitar o escorregamento ou a rotação da madre, assim como é exemplificado na Figura 20.

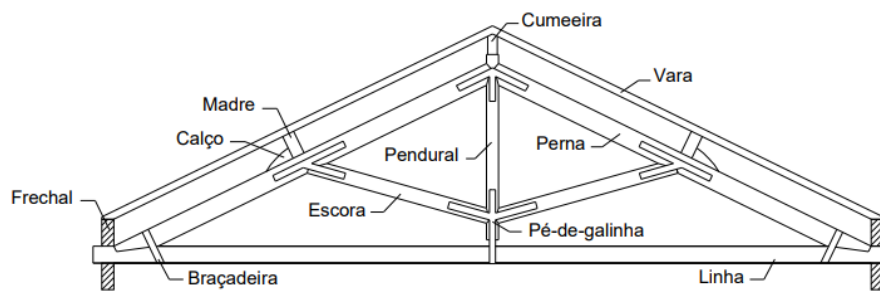


Figura 20 - Exemplo da Ligação madre-perna (Sousa, et al., 2014)

3.3.3 Ligação pendural – linha

Os manuais antigos sugerem a desconexão entre o pendural e a linha, no entanto, os exemplos de ligações mal concebidas são frequentes. A bibliografia tradicional recomenda que a linha seja fixada ao pendural através de uma tira metálica apenas pregada ao mesmo, como ilustra a Figura 21 a). Pode igualmente ser usado em vez da tira um pé-de-galinha dobrado, como ilustra a Figura 21 b). Desta forma, a deformação da linha é reduzida e a deformação para fora do plano da asna é contrariada preventivamente (Branco, et al., 2006).

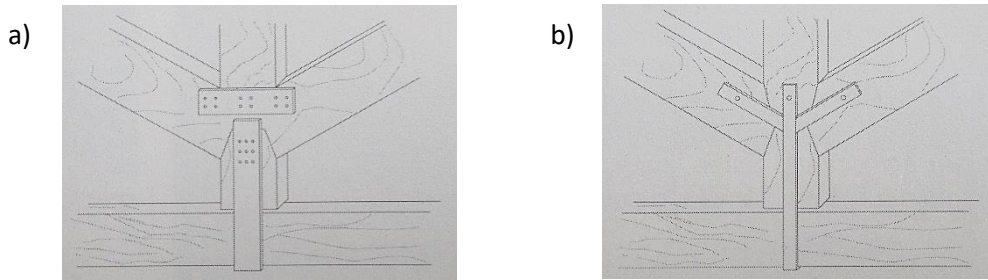


Figura 21 – Exemplificação da ligação entre linha e perna (Sousa e Abrantes, 1998): a) com tira metálica; b) com pé-de-galinha dobrado

3.3.4 Ligação asna – parede

Os apoios da estrutura devem garantir, por um lado, que os movimentos previstos em projeto 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).

Dependendo do tipo de apoio e da espessura da parede onde assentam as asnas, existem vários tipos de pormenor de apoio da asna. Na Figura 22 são apresentados alguns exemplos de apoios. A linha e o frechal transmitem os esforços para o apoio, e este deverá ser uma parede de suporte. O apoio ideal será quando a interseção das linhas de eixo da perna e da linha da asna se encontram no plano da parede, justamente a um terço da espessura da parede de suporte.

É corrente a colocação de peças de madeira (frechais) ou berços metálicos nos apoios, de modo a garantir as condições referidas. Ambos os elementos têm como função a transmissão de cargas. É fundamental que o ponto de descarga das cargas pela asna caia no suporte, normalmente a parede, caso contrário a excentricidade irá originar esforços perigosos na entrega da linha.

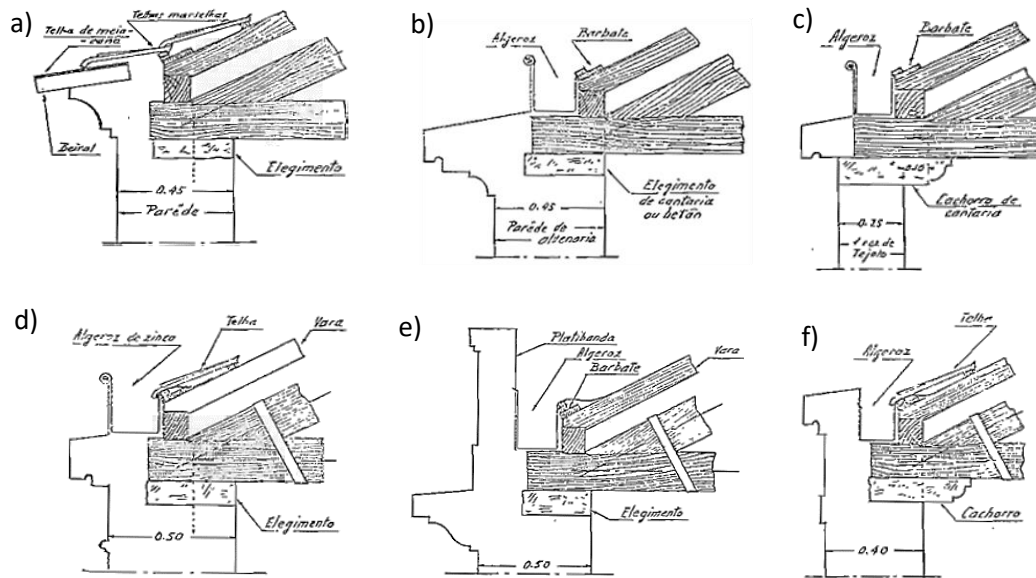


Figura 22 – Pormenores dos apoios da asna na parede (Costa, 1955): a) Apoio de asna para telhado com beiral; b) Apoio de asna para telhado com algeroz à vista; c) Apoio de asna para telhado com algeroz à vista sobre uma parede de tijolo; d) Apoio de asna para telhado de algeroz descarregando a um terço da espessura da parede; e) Apoio de asna para telhado de algeroz e platibanda; f) Apoio de asna para telhado de algeroz sobre parede

3.3.5 Ligação perna – linha

A excentricidade dos apoios das asnas com o nó da ligação perna - linha quando não cai na secção de suporte da asna pode causar roturas nas entregas das linhas que se prolongam até ao suporte de apoio. Esta situação pode ser resolvida através do reforço da ligação com a aplicação de chapa metálica, como ilustra a Figura 23 a), ou tirante, como ilustra a Figura 23 b).

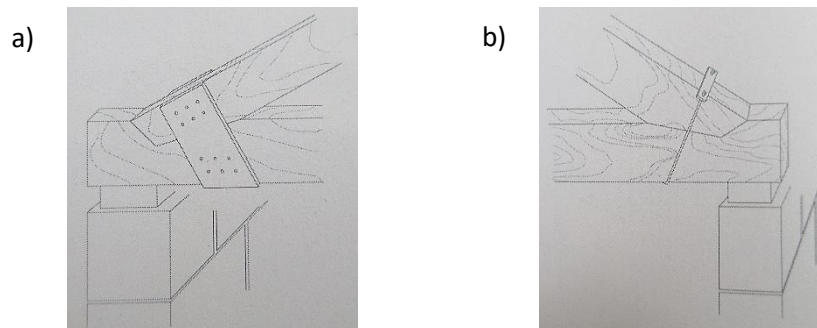


Figura 23 – Exemplificação do reforço da ligação perna – linha (Sousa e Abrantes, 1998): a) Com chapa metálica; b) Com braçadeira metálica

3.3.6 Contraventamento

As treliças planas carregadas segundo o seu plano são bastante sensíveis aos fenómenos de instabilidade transversal (bambeamento). As pernas das asnas encontram-se contraventadas pelas madres e pela cumeeira (Figura 24 a). A linha pode ser travada por exemplo através de cruzetas, nos pendurais ou nas próprias linhas, no caso de haver essa possibilidade, isto é, onde o espaço da cobertura permita a sua aplicação e não seja muito utilizado. Estas cruzetas podem ser tirantes de aço cruzados na vertical ou na horizontal, (Figura 24 b).

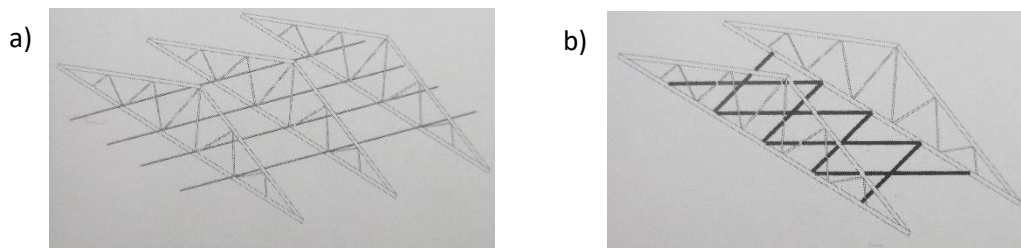


Figura 24 – Exemplos de contraventamento (Sousa e Abrantes, 1998): a) Contraventamento das pernas; b) Contraventamento das asnas

Contudo, pode ser usada qualquer estrutura secundária que desempenhe as mesmas funções. Por exemplo, no caso da ação do vento, muitas vezes acontece que esta ação é transmitida às estruturas principais segundo direções não contidas no plano das mesmas, ou seja, provocando instabilidade transversal, tornando-se necessária a utilização de uma estrutura auxiliar destinada a resistir a esses esforços. A Figura 25 ilustra um bom exemplo de contraventamento que pode ser utilizado para solucionar este problema (Logsdon, 2002).

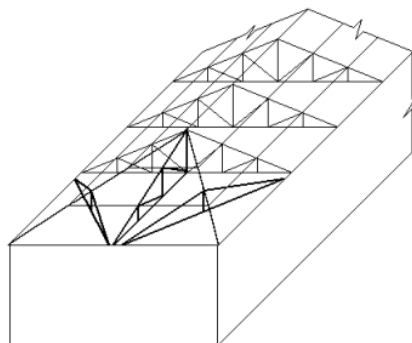


Figura 25 -Exemplo de contraventamento na extremidade de uma cobertura de quatro águas (Logsdon, 2002)

4 CASOS DE ESTUDO

4.1 Introdução

Leiria apresenta uma situação geográfica bastante privilegiada, dada a proximidade com o rio e com um castelo difícil de ser invadido. A Figura 26 ilustra aquilo que seria a cidade na época medieval, zona que hoje pertence ao centro histórico.



Figura 26 – Leiria medieval (Santos, 2008)

A cidade medieval cresceu encostada ao morro que sustenta o castelo, e as ruas, bastante estreitas, abriram-se em dédalo para sul. A exposição solar constituiu um dos principais fatores desta preferência, à qual se aliou a circunstância da inclinação da encosta sul ser mais suave. Até ao século XIX a cidade de Leiria, organizou-se preferencialmente ocupando a área mais abrigada dos ventos que eram, deste modo, cortados pela colina do castelo. Na Figura 27 pode observar-se a forma como se encontravam dispostas as ruas e os edifícios da cidade no início do século XIX.

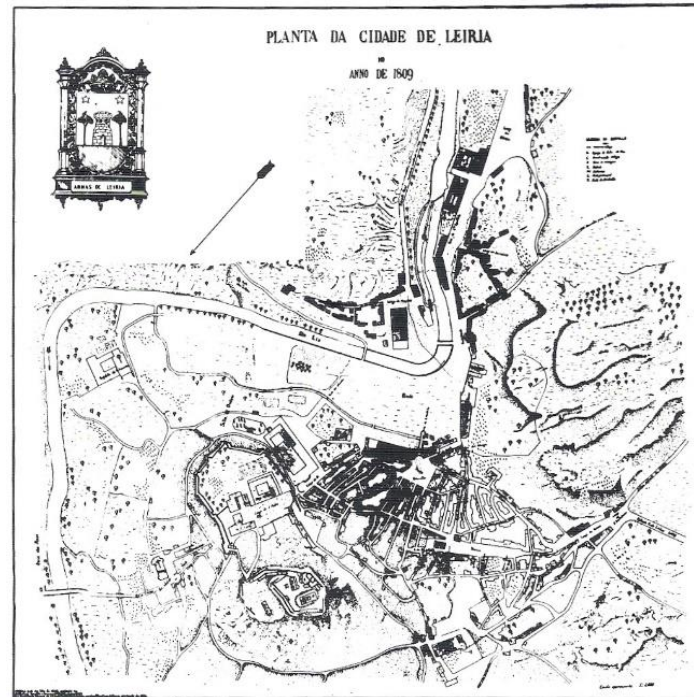


Figura 27 - Planta da cidade de Leiria em 1809 (Margarido, 1988)

O início do século XIX marcou profundamente a morfologia urbana de Leiria pelas consequências das invasões francesas. Foram destruídas casas de habitação, edifícios religiosos e os arquivos camarários. Nesta época Leiria atravessou um período de dificuldades, para além da diminuição da população, houve uma grave crise na agricultura que servia para abastecimento e exportação. Estes factos tiveram um impacto negativo no crescimento do espaço urbano, contudo, durante este século foi realizada a recuperação de alguns edifícios que tinham sido destruídos e construídos alguns edifícios novos que não foram suficientes para modificar a estrutura urbana. Só no final deste século é que a população começou a aumentar. E assim, a cidade e a sua área envolvente cresceram e desenvolveram-se em função do contributo da agricultura, da indústria e do comércio.

É nos primeiros anos do século XX, Figura 28, que se verificam algumas modificações na malha relacionadas com a abertura de novos arruamentos e construção nova realizada ao longo destes, por outro lado, verificam-se também alguma construção nova em arruamentos já existentes (Margarido, 1988).

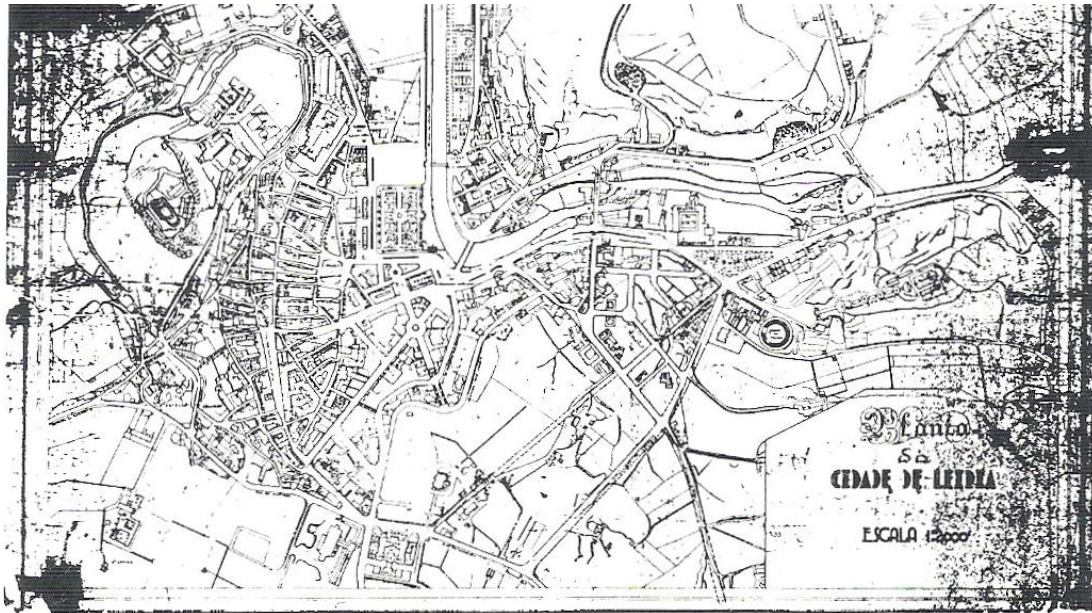


Figura 28 - Planta da cidade de Leiria em 1938 (Margarido, 1988)

Com o aumento populacional e o desenvolvimento do comércio e dos serviços, o núcleo medieval deixa de conseguir dar resposta às crescentes necessidades e é transposto, gerando vários núcleos periféricos nos quais a função residencial se vai aglutinando às indústrias que já se tinham aí fixado por falta de grandes espaços no centro da cidade. A área urbana de Leiria expande-se para além do núcleo histórico, expandindo as fronteiras entre o urbano e o rural, e começa então a apresentar uma estrutura urbana polinuclear, apresentando uma descida da função residencial no centro medieval (Figura 29) (Silva, 2010).

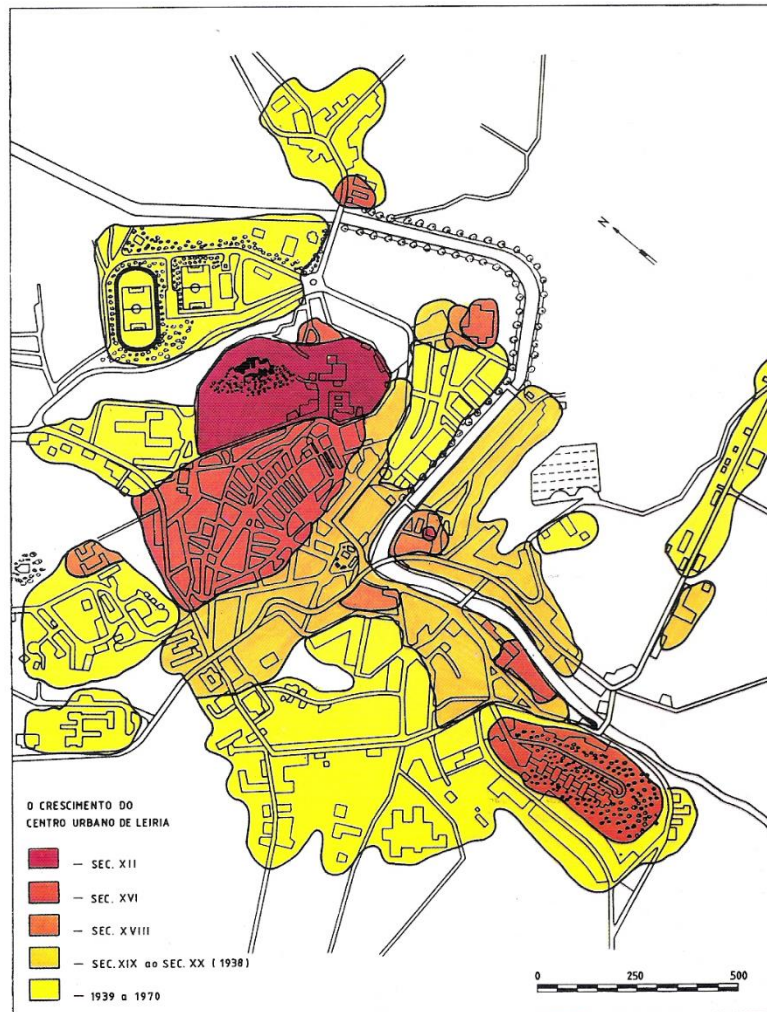


Figura 29 - Fases históricas de crescimento do centro urbano de Leiria (Margarido, 1988)

Atualmente, facilmente se percebe as semelhanças do espaço público que inclui o centro histórico, com a configuração da época medieval, pois apresenta um desenho, que quase na íntegra, preserva as características originais. Testemunhando assim, que os arruamentos existentes são de longa data, embora tenham sofrido alterações, nomeadamente no que diz respeito ao pavimento, tal como as redes de infraestruturas e os vários elementos que incorporam o meio urbano. Por outro lado, salienta-se a associação em *dédalo*, já referida anteriormente, das ruas estreitas e irregulares que integram a zona, justificando-se desta forma alguns problemas atuais na malha urbana, todavia difíceis de resolver, porque as exigências de antigamente eram muito menores e diferentes das atuais.

Como se pode ver na figura anterior (Figura 29), Leiria apresenta desde os anos setenta um grande crescimento, acontecendo-lhe o mesmo que a maioria das cidades portuguesas, ficando o centro desertificado durante a noite, por se tratar de zonas de comércio e de

serviços, com a população a deslocar-se no fim do trabalho para as suas habitações localizadas na periferia (Coelho, 1999).

Quanto ao clima em Leiria, os invernos não são muito rigorosos, pois as temperaturas não acusam valores muito abaixo dos 10°C em média, enquanto a pluviosidade pode ser superior a 140mm (totais mensais). Os verões apresentam temperaturas médias que oscilam pelos 20°C, sendo a pluviosidade quase nula (Margarido, 1988).

O núcleo do Centro Histórico de Leiria, na sua zona baixa, apresenta uma altitude média que não excede os 130 metros, sendo que as altitudes médias em torno da cidade rondam os 400 metros (Jacinto, 2009). O vento é predominantemente de norte e noroeste. Como referido anteriormente o povoamento proliferou-se numa zona mais baixa junto à encosta sul do castelo o que lhe conferiu desde logo uma certa proteção contra os ventos.

Relativamente às coberturas do centro histórico, Figura 30, estas são maioritariamente em telha cerâmica, existindo também algumas em zinco, chapa metálica, telha de betão e fibrocimento. Os edifícios são fundamentalmente ocupados por habitações plurifamiliares e também o comércio, apesar de atualmente estar a ficar menos populosa devido ao seu crescente estado de degradação (Cerejo, 2012).



Figura 30 - Coberturas do centro histórico

4.2 Trabalhos anteriores realizados no Centro Histórico

Nesta secção é feito um breve resumo de três estudos de grande importância realizados sobre o Centro Histórico de Leiria.

O primeiro estudo (2012), sobre a utilização de imagens multiespectrais na avaliação do estado de conservação das coberturas do Centro Histórico de Leiria. O segundo estudo (2016), sobre a caracterização do parque edificado do Centro Histórico de Leiria, e por fim, o terceiro estudo (2017) sobre a inspeção e caracterização das coberturas com estrutura de madeira do Centro Histórico de Leiria. Este último será a base para a presente dissertação.

O primeiro trabalho realizado por Cerejo (2012) teve como objetivo avaliar o estado de conservação de 671 coberturas do Centro Histórico de Leiria através da utilização de imagens multiespectrais digitais de dois anos diferentes, 2004 e 2010, pertencentes ao Instituto Geográfico Português (IGP). Os resultados por ele obtidos revelaram que a utilização deste tipo de imagens é muito vantajosa, no que diz respeito à recolha de informação para a avaliação do estado de conservação das coberturas.

A resolução espacial das imagens aéreas multiespectrais utilizada foi de 0.5 m, não se tratando, porém, de uma resolução grandemente satisfatória no que diz respeito ao pormenor. No entanto, terá sido possível detetar os diferentes materiais de revestimento das coberturas e a presença de anomalias.

No ano de 2004, 90% das coberturas foram identificadas com revestimento em telha cerâmica, já no ano de 2010, houve uma diminuição na identificação deste tipo de material que passou para 87%. Durante este período, algumas coberturas foram reabilitadas, apresentado um tipo de revestimento em 2010 diferente do apresentado em 2004.

Relativamente às anomalias, a informação obtida automaticamente, estimou que para as coberturas que possuíam revestimento em telha cerâmica, no ano de 2004, classificava 89% das coberturas com anomalias e em 2010 quase a totalidade (99%) do edificado possuía anomalias.

Embora tenham sido notórios alguns problemas em realizar as classificações, devido à elevada presença de sombras e à exposição solar presente nas imagens multiespectrais,

que por vezes podem induzir ao erro, a evolução das anomalias neste espaço de tempo é efetivamente comprovada pelo aumento do número de coberturas em estado de degradação.

Neste trabalho também é provado que ao fazer o cruzamento de informação entre os mapas de anomalias das coberturas e a caracterização demográfica do Centro Histórico de Leiria os locais onde o estado de degradação é maior a população residente e o número de famílias é menor. Esta redução de população, poderá ser motivada pela falta de condições de habitabilidade e salubridade das habitações e espaços circundantes. O que consequentemente e inevitavelmente leva a um aumento da degradação das construções uma vez que os tradicionais trabalhos de conservação e manutenção das mesmas deixam de ser efetuados com alguma periodicidade.

O segundo trabalho realizado por Gomes (2016) teve como objetivo caracterizar o parque edificado do Centro Histórico de Leiria, com base numa amostra de 302 edifícios. Para tal, adotou fichas de inspeção que tiveram como finalidade a criação de uma base de dados e a definição de algumas sugestões para a conservação e reabilitação do edificado.

Numa primeira fase fez a caracterização da zona de estudo, através de inspeções que consistiram basicamente numa observação visual com o levantamento fotográfico muito exaustivo e com a recolha de dados relativos às técnicas construtivas, aos materiais e às anomalias presentes nos edifícios. Esta recolha foi devidamente registada em fichas de inspeção adaptadas aos edifícios em estudo. As fichas tiveram como principal objetivo, o diagnóstico dos elementos construtivos, ou seja, paredes de fachada (paredes resistentes), cobertura e pavimentos, e ainda a identificação das condições de funcionalidade e habitabilidade.

Com o levantamento efetuado criou uma base de dados automática, com o objetivo de reunir toda a informação contida nas fichas de inspeção, podendo esta ser alterada quando necessário, permitindo assim, que qualquer informação seja modificada imediatamente.

Por fim, com os resultados da abordagem estatística foi feita a quantificação das soluções construtivas e das anomalias mais correntes nos edifícios, permitindo fazer a análise e a avaliação sustentada, sobre os problemas mais relevantes em termos de habitabilidade e segurança dos edifícios. É com base neste recurso que são sugeridas algumas técnicas

tradicionais ou inovadoras pouco intrusivas, que terão como princípio, sempre que possível, a sua reversibilidade.

Deste trabalho é possível averiguar e concluir que na globalidade o Centro Histórico de Leiria encontra-se num estado de conservação muito degradado. Sendo iminente o progressivo estado de degradação e a urgente necessidade de intervenções ao nível de todo o centro histórico, para evitar soluções de reabilitação profundas em vez de simples conservações, assegurando desta forma a identidade e autenticidade original do centro histórico.

O terceiro trabalho realizado por Israel (2017) teve como principal objetivo compreender e conhecer estatisticamente diversos fatores inerentes às coberturas do Centro Histórico de Leiria, tendo realizado o levantamento e caracterização de 29 estruturas de cobertura de madeira de edifícios antigos. Para tal, realizou uma inspeção visual, com o devido levantamento da geometria e das patologias. Com o agrupamento de todos estes elementos criou uma base de dados e avaliou o estado de conservação das estruturas.

Para o levantamento dos elementos elaborou fichas de inspeção direcionadas aos edifícios em causa, com as características específicas adequadas ao edificado existente.

No interior fez uma caracterização detalhada de todos os materiais presentes e observáveis, bem como a descrição da tipologia de toda a estrutura de suporte, onde a estrutura de suporte principal é a asna de madeira. Relativamente às asnas as mais vulgarmente encontradas foram as pequenas asnas, as asnas simples, as asnas de alpendre e as asnas em tesoura.

Tendo como base a geometria da cobertura e os elementos que obteve através de medições, elaborou peças desenhadas que complementaram todo o trabalho, uma vez que não existem os desenhos originais, ficando assim o registo para que possa ser visualizado em caso de obras e intervenções futuras.

Importa referir que além de toda a estrutura interior da cobertura, no exterior das coberturas também catalogou várias características, tais como, o tipo de telha, o tipo de beirado, a presença de caleiras, tubos de queda, trapeiras, lambrequim, janelas/clarabóias, a inclinação da cobertura, o sistema de ventilação entre outros.

Por último, fez a caracterização do estado de conservação das coberturas, tanto ao nível das estruturas de madeira como dos elementos cerâmicos, com o levantamento dos tipos de anomalias e patologias presentes, descrevendo o seu nível de degradação e extensão.

Segundo o autor, todo este processo é uma ação de grande importância que poderá servir de apoio para possíveis intervenções no futuro, pois dispõem de dados que possibilitam a indicação do melhor tipo de solução a adotar.

As coberturas analisadas encontram-se num estado bastante deteriorado e degradado. As patologias encontradas indicam que será necessário intervir para corrigir anomalias não estruturais, sendo que as intervenções a realizar devem ser executadas para prevenir e evitar soluções de reabilitação profundas e dispendiosas no futuro para assim aumentar o tempo de vida útil dos edifícios. A avaliação efetuada indicia também, nalguns casos, a existência de problemas estruturais e a avaliação da futura necessidade de fazer o reforço estrutural. Para tal, é necessário entender a estabilidade estrutural das estruturas de cobertura, facto que motivou o presente trabalho.

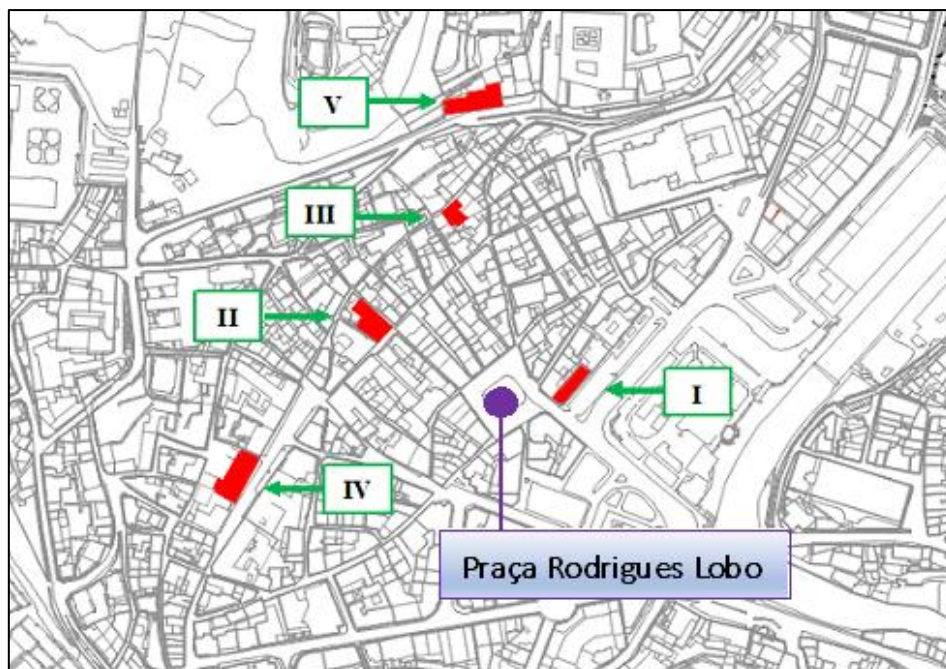
4.3 Descrição dos edifícios estudados

A avaliação da segurança estrutural das coberturas de madeira existentes no centro histórico de Leiria, foi realizada através do estudo de cinco coberturas de edifícios antigos do centro histórico. A escolha destas coberturas foi fundamentalmente baseada na existência do projeto, contudo tiveram-se em conta outras características, tais como a diversidade das tipologias e as diferentes dimensões. Na Tabela 3, apresenta-se a designação adotada para cada edifício analisado, bem como o acesso e o número de Polícia.

Tabela 3 – Caracterização dos edifícios em estudo

Edifício	Acesso	Nº Polícia
I	Largo 5 de Outubro	-
II	Rua do Barão de Viamonte Rua Maria da Fonte Rua Fernão Magalhães	68; 2; 1; 3
III	Rua D. Afonso Henriques	13
IV	Largo Cândido dos Reis Travessa Barão do Salgueiro	18; 18A
V	Largo Dr. Manuel de Arriaga	1; 2

Na Figura 31 encontra-se representada uma planta do Centro Histórico de Leiria, com a identificação dos cinco edifícios em estudo que se encontram numerados tal como foi descrito na tabela anterior.

**Figura 31** - Planta de localização dos edifícios

Todas as estruturas de cobertura tiveram como base o relatório de estágio de Israel (2017), que fez o levantamento de todos os elementos integrantes da estrutura, nomeadamente a estrutura principal, a estrutura secundária e o revestimento. Com base nestes dados foi-lhe possível realizar peças desenhadas dado que não existiam e são fundamentais para a realização do presente estudo. Fez também um levantamento das anomalias observadas que serão tidas em conta na análise dos resultados. Seguidamente apresenta-se uma descrição pormenorizada de cada edifício estudado.

4.3.1 Edifício I

Na Figura 32 é ilustrado o Edifício I deste estudo, localizado no largo 5 de Outubro. É um edifício que está atualmente destinado a serviços, comércio e escritórios. Este edifício é propriedade privada e foi construído no Século XIX. É um edifício de gaveto, constituído por três pisos, rés-do-chão, primeiro piso e cobertura, construído em alvenaria com pavimentos e cobertura em madeira.



Figura 32 – Edifício I (Israel, 2017)

Na Figura 33 é ilustrada a estrutura da cobertura e uma asna tipo (ver Figura 33 b). A cobertura é de forma quadrangular e inclinada com revestimento em telha cerâmica do tipo Marselha. Não possui sistema de ventilação. Tem a particularidade de toda a cobertura ser forrada com guarda pó. Na sua estrutura possui sete asnas, todas iguais, do tipo tesoura, com diferentes espaçamentos entre si. Os tipos de ligações presentes são tradicionais, na forma de entalhe e mecânicas, na forma de esquadro.

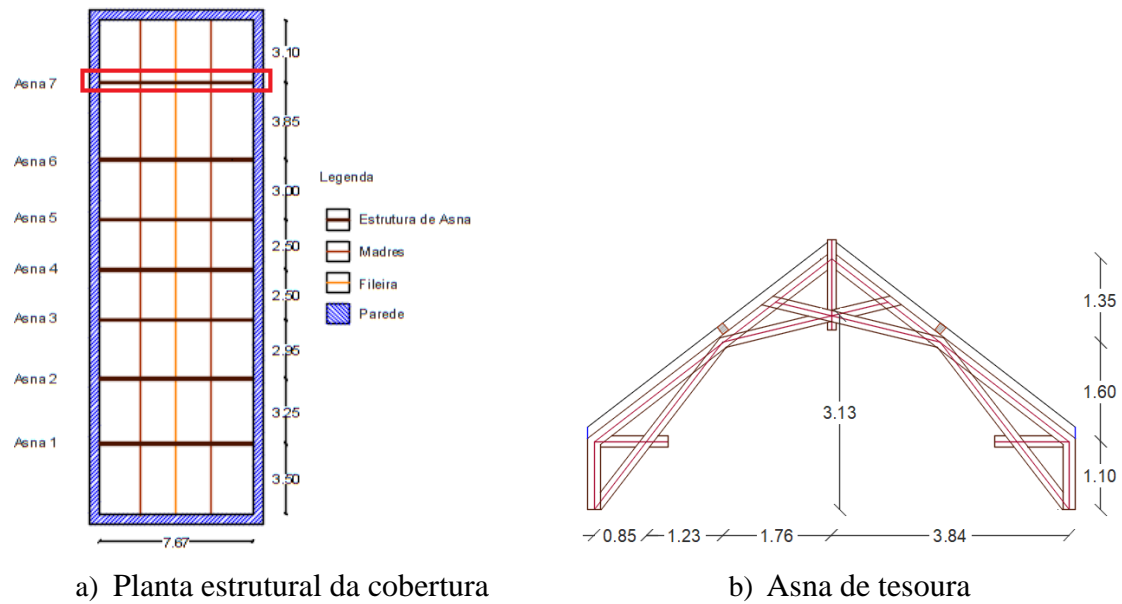


Figura 33 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício I

Na Tabela 4 são apresentadas as dimensões dos elementos da estrutura principal e secundária da cobertura do Edifício I analisada.

Tabela 4 – Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício I

Elemento	Dimensões		
	B [cm]	H [cm]	Esp [cm]
Linha	12,5	18,0	-
Perna	12,5	20,0	-
Pendural	12,5	12,5	-
Escora	12,5	18,0	-
Madre	12,0	15,0	-
Fileira	12,0	15,0	-
Vara	10,0	10,0	50,0
Ripa	4,5	4,5	38,0

No trabalho realizado por Israel (2017), não foi possível observar muitos dos elementos que constituem a cobertura por esta se encontrar toda forrada com guarda pó. Apenas foi possível verificar algumas partes, em cantos e extremidades das divisões. Deste modo, foi apenas estudada uma pequena parte da estrutura de madeira. Contudo, foi possível verificar que a estrutura apresenta um estado razoável de conservação e aparenta uma boa estabilidade.

O revestimento da cobertura apresenta um razoável estado de conservação, salienta-se apenas a presença de musgos e líquenes em quase toda a cobertura, especialmente na água virada para o logradouro e alguma deficiência nos remates junto às chaminés.

As patologias e anomalias detetadas na estrutura de madeira foram principalmente as seguintes:

- Existência de deformação reduzida no elemento madre e nas ferragens;
- Existência de infiltrações localizadas em vários pontos, abrangendo áreas consideráveis;
- Existência de condensações interiores em vários locais;
- Existência pontual de salinidades, fungos e bolores;
- Existência em alguns locais de fissuras superficiais nos elementos perna, escora, madre e guarda pó;
- Existência superficial de ataques de insetos que abrangem áreas consideráveis dos elementos perna e escora.

4.3.2 Edifício II

Na Figura 34 é ilustrado o Edifício II deste estudo, localizado na interceção da Rua do Barão de Viamonte, Rua Maria da Fonte e Rua Fernão Magalhães. É um edifício de habitação e comércio, no entanto, encontra-se devoluto desde 2014. Este edifício é propriedade privada e foi construído no Século XIX. É um edifício isolado, constituído por quatro pisos, rés-do-chão, primeiro piso, segundo piso e cobertura, construído em alvenaria com pavimentos e cobertura em madeira.



Figura 34 - Edifício II (Israel, 2017)

Na Figura 35 é ilustrada a estrutura da cobertura e uma asna tipo (ver Figura 33 b). A cobertura é de forma quadrangular e inclinada com revestimento em telha cerâmica do tipo Marselha. Não possui sistema de ventilação. Possui na sua estrutura um total de sete

asnas, três pequenas asnas, duas asnas simples e duas asnas de alpendre, com diferentes espaçamentos entre sim. Possui uma escora de ligação horizontal entre as asnas 3 e 4.

Os tipos de ligações presentes são tradicionais, na forma de entalhe e simplesmente apoiado e mecânicas, na forma de braçadeira e pé de galinha.

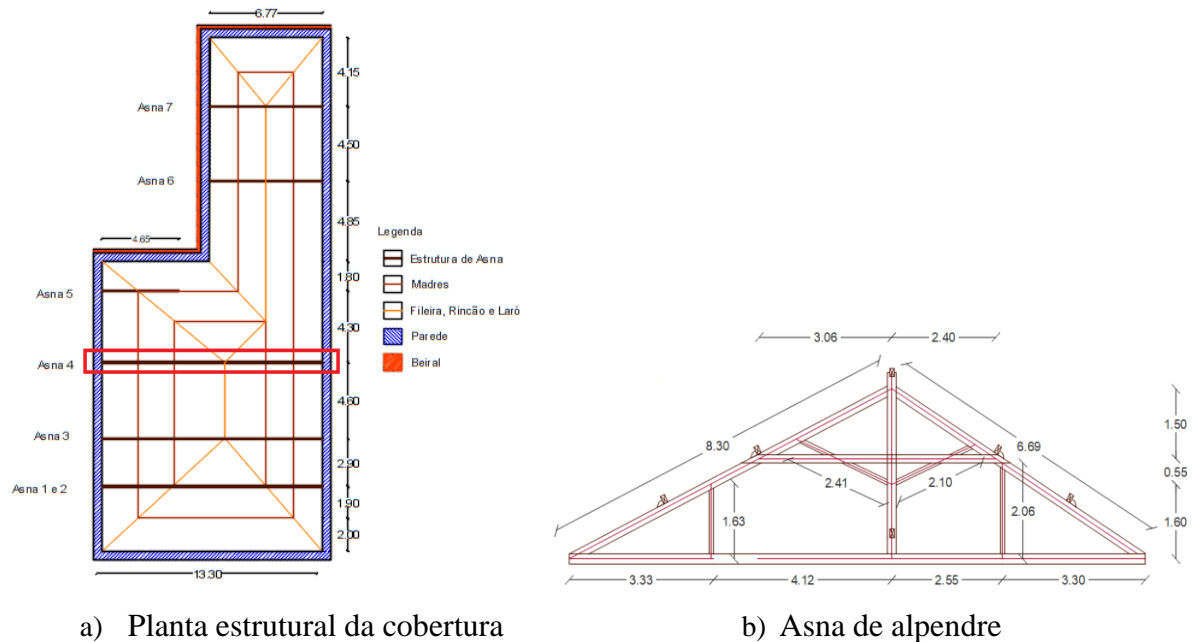


Figura 35 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício II

Na Tabela 5 são apresentadas as dimensões dos elementos da estrutura principal e secundária do da cobertura do Edifício II analisada.

Tabela 5 - Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício II

Elemento	Dimensões		
	B [cm]	H [cm]	Esp [cm]
Linha Inferior	12,0	22,0	-
Linha Superior	10,0	18,0	-
Perna	10,0	20,0	-
Pendural	12,0	20,0	-
Escora	10,0	20,0	-
Tirante	8,0	10,0	-
Madre	10,0	18,0	-
Fileira	10,0	18,0	-
Vara	7,0	10,0	50,0
Ripa	4,5	2,5	35,0

No trabalho realizado por Israel (2017), verificou-se que de uma forma geral, esta cobertura apresenta-se em mau estado de conservação e aparenta zonas de instabilidade.

Existem muitas deformações nos elementos de madeira e infiltrações. Como consequência, ao longo do tempo, houve necessidade de colocar novos elementos de travamento, que incluem escoras e tirantes.

Observou-se que ao nível das vigas de pavimento existe algum desgaste na zona dos apoios, originando o escorregamento das ligações e a rotação das vigas nos apoios.

As ligações mecânicas em algumas asnas, nomeadamente nas Asnas 3, 4, 6 e 7, aparentam elevado estado de degradação com muita ferrugem.

Os revestimentos exteriores apresentam muito mau estado de conservação, evidencia-se que as telhas se encontram em mau estado pois possuem muitas salinidades e descasque e apresentam musgos e líquenes. Note-se que possivelmente as telhas são as aplicadas originalmente na cobertura.

As patologias e anomalias detetadas na estrutura de madeira foram principalmente as seguintes:

- Existência generalizada a toda a cobertura de deformação que põem em causa o uso da mesma;
- Existência em muitos locais de degradação/envelhecimento que requerem trabalhos de reparação no soalho e nos elementos estruturais;
- As ferragens apresentam várias anomalias que requerem, portanto, reparação ou substituição.
- Existência em vários locais de escorregamento nas ligações, deformação, rotação dos apoios que põem em causa o uso e conforto da envolvente, está presente nos elementos frechal, apoios e vigas de pavimento.
- Existência em vários locais de infiltrações, condensações interiores, salinidades, fungos e bolores.
- Existência em alguns locais de fissuras superficiais;
- Existência em vários locais de ataques de insetos que abrangem áreas consideráveis, que continua ativo.

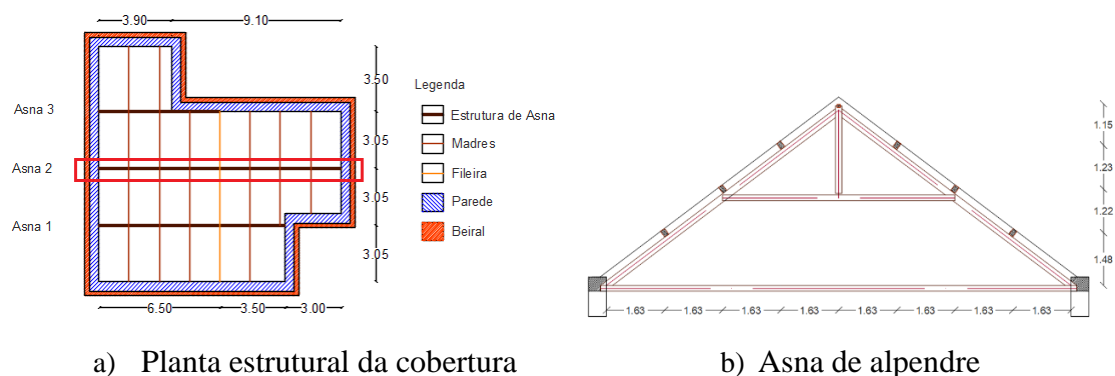
4.3.3 Edifício III

Na Figura 36 é ilustrado o Edifício III deste estudo, localizado na Rua D. Afonso Henriques. É um edifício de habitação nos pisos e armazém na cave. Este edifício é propriedade privada e foi construído no Século XX. É um edifício que fica entre edifícios, constituído por quatro pisos, cave, rés-do-chão, primeiro piso e cobertura, construído em alvenaria com pavimentos em madeira.



Figura 36 - Edifício III (Israel, 2017)

Na Figura 37 é ilustrada a estrutura da cobertura e uma asna tipo (ver Figura 37 b). A cobertura é de forma quadrangular e inclinada com revestimento em telha cerâmica do tipo Marselha. Não possui sistema de ventilação. Possui na sua estrutura um total de três asnas, ambas de alpendre, com espaçamento de 3,05 m. Os tipos de ligações presentes são tradicionais, na forma de entalhe e mecânicas, na forma de braçadeira e um outro tipo adaptado do pé de galinha.



a) Planta estrutural da cobertura

b) Asna de alpendre

Figura 37 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício III

Na Tabela 6 são apresentadas as dimensões dos elementos da estrutura principal e secundária do da cobertura do Edifício III analisada.

Tabela 6 - Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício III

Elemento	Dimensões		
	B [cm]	H [cm]	Esp [cm]
Linha	8,5	16,0	-
Perna	16,0	20,0	-
Pendural	13,0	18,5	-
Madre	14,0	20,0	-
Fileira	14,0	20,0	-
Vara	6,0	10,5	45,0
Ripa	4,5	2,5	38,0

Na altura que esta cobertura foi inspecionada por Israel (2017) estavam em curso obras de reabilitação. Soube-se que futuramente a cobertura será utilizada como espaço de habitação, que é proporcionado devido ao elevado pé direito do edifício.

No trabalho realizado por Israel (2017) observou-se, de uma maneira geral, no seu interior a cobertura aparenta estar num bom estado de conservação e aparenta boa estabilidade. Existem vários elementos fissurados e deformados, sendo que, grande parte destas fissuras se deve à retração da madeira e, portanto, não apresentam risco para a estabilidade da estrutura, pois na globalidade, esta apresenta uma boa estabilidade. O ataque de insetos é generalizado a toda a cobertura, encontrando-se num estado inativo. No que diz respeito à parte exterior, esta encontra-se em excelentes condições visto que é composta por elementos cerâmicos novos.

As patologias e anomalias detetadas na estrutura de madeira:

- Existência de deformação insignificante no soalho e nos elementos perna, pendural, frechal e madre.
- Existência degradação/envelhecimento superficial no soalho e nos elementos estruturais.
- Existência em vários locais de fissuras superficiais nos elementos linha, perna pendural, madre e fileira.
- Existência em muitos locais de ataques de insetos insignificantes, mas que abrangem uma área extensa dos elementos estruturais.

4.3.4 Edifício IV

Na Figura 38 é ilustrado o Edifício IV deste estudo, localizado no Largo Cândido dos Reis e Travessa Barão do Salgueiro. É um edifício que atualmente se encontra devoluto. Este edifício é propriedade privada e foi construído no Século XIX. É um edifício isolado, constituído por quatro pisos, rés-do-chão, primeiro piso, segundo piso e cobertura, construído em alvenaria com pavimentos e cobertura em madeira.



Figura 38 - Edifício IV (Israel, 2017)

Na Figura 39 é ilustrada a estrutura da cobertura e uma asna tipo (ver Figura 39 b). A cobertura é de forma quadrangular e inclinada com revestimento em chapa metálica. Não possui sistema de ventilação. Possui na sua estrutura um total de nove asnas, duas pequenas asnas e sete asnas simples, com diferentes espaçamentos entre sim. Os tipos de ligações presentes são tradicionais, na forma de entalhe e simplesmente apoiado e mecânicas, na forma de braçadeira.

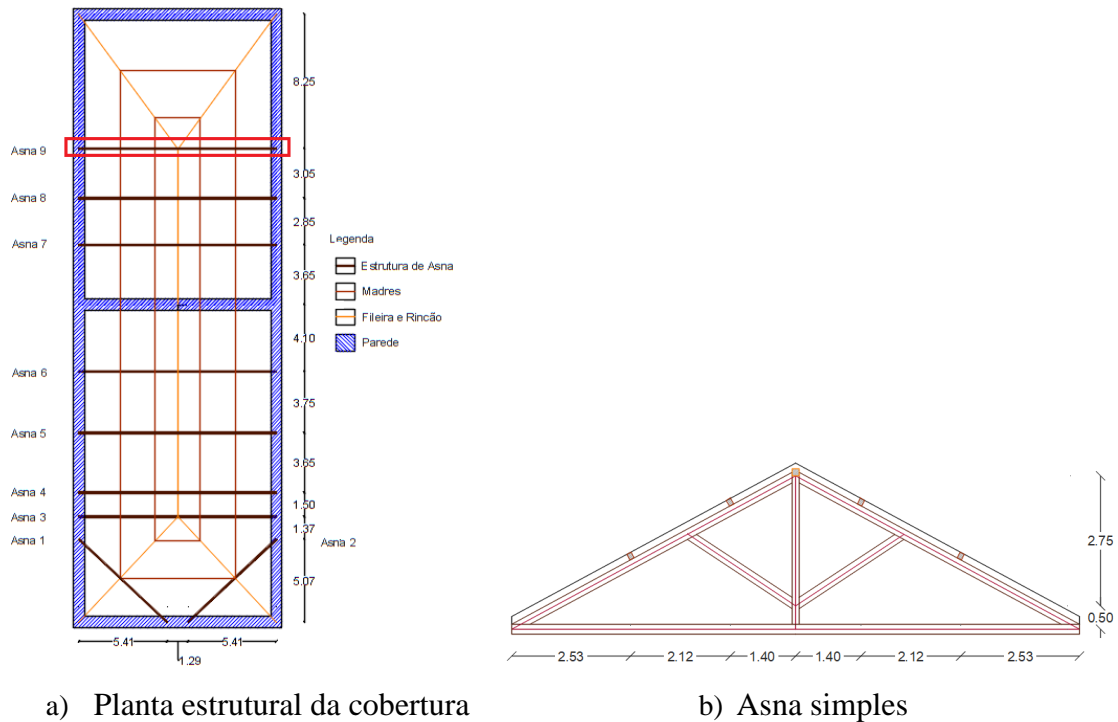


Figura 39 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício IV

Na Tabela 7 são apresentadas as dimensões dos elementos da estrutura principal e secundária do da cobertura do Edifício IV analisada.

Tabela 7 - Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício IV

Elemento	Dimensões		
	B [cm]	H [cm]	Esp [cm]
Linha	18,0	20,0	-
Perna	12,0	20,0	-
Pendural	16,0	20,0	-
Escora	16,0	20,0	-
Madre	14,0	15,0	-
Fileira	14,0	15,0	-
Vara	7,5	8,0	50,0
Ripa	4,5	4,5	100,0

No trabalho realizado por Israel (2017) verificou-se que esta a cobertura se encontra num estado muito mau de conservação, pois aparenta um estado de ruína iminente. Infiltrações, degradação elevada da madeira, ataque de insetos e a falta de elementos de madeira no soalho são as principais patologias.

O revestimento original da cobertura era em elementos cerâmicos (telha marselha). Com o passar do tempo houve a necessidade de proceder à sua remoção, em 2010, foi substituído por elementos de chapa metálica.

Para melhorar a estabilidade da estrutura, também com o decorrer dos anos foram colocados elementos de contraventamento em vários locais.

Repare-se que inevitavelmente esta cobertura necessita de uma intervenção muito urgente, se o objetivo for o de manter a estrutura inicial.

O revestimento exterior apresenta bom estado de conservação.

Patologias e anomalias detetadas na estrutura de madeira foram principalmente as seguintes:

- Existência em vários locais de deformação que põem em causa o uso da mesma, requerendo, portanto, trabalhos de reparação no soalho e nos elementos madre e vara.
- Existência generalizada a toda a cobertura de degradação/envelhecimento com risco de instabilidade iminente e elevada probabilidade de acidentes, requer trabalhos de reparação no soalho e nos elementos estruturais.
- Existência em muitos locais de escorregamento nas ligações que põem em causa o uso e conforto da envolvente, está presente no elemento madre.
- Existência em muitos locais de deformação dos apoios que põem em causa o uso e conforto da envolvente, está presente nos apoios.
- Existência em muitos locais de rotação dos apoios que põem em causa o uso e conforto da envolvente, está presente nos elementos varas e apoios.
- Existência em muitos locais de infiltrações que põem em causa o uso e conforto da envolvente, está presente nos elementos estruturais.
- Existência em alguns locais de fissuras superficiais no soalho e nos elementos estruturais.
- Existência generalizada a toda a cobertura de ataques de insetos que põem em causa o uso e conforto da envolvente, está presente nos apoios e nos elementos estruturais.

4.3.5 Edifício V

Na Figura 40 é ilustrado o Edifício V deste estudo, localizado no Largo Dr. Manuel de Arriaga. Atualmente é o edifício do SEF (Serviço de Estrangeiros e Fronteiras) no piso 0

e da Proteção Civil no piso 1. Antigo edifício do Governo Civil. Este edifício é propriedade pública e foi construído no Século XVIII. É um edifício de extremidade, constituído por quatro pisos, rés-do-chão, primeiro piso, segundo piso e cobertura, construído em alvenaria com pavimentos e cobertura em madeira.



Figura 40 – Edifício V (Israel, 2017)

Na Figura 41 é ilustrada a estrutura da cobertura e uma asna tipo (ver Figura 41 b). A cobertura é de forma quadrangular e inclinada com revestimento em telha cerâmica do tipo Lusa. Não possui sistema de ventilação. Possui na sua estrutura um total de dezoito asnas, quatro pequenas asnas, dez asnas simples e quatro asnas compostas, com diferentes espaçamentos entre si. As quatro asnas compostas deste edifício têm a particularidade de possuir tirantes cilíndricos em ferro de 1,4 cm de diâmetro. Os tipos de ligações presentes são tradicionais, na forma de entalhe e mecânicas, na forma de braçadeira, tê esquerdo, tê direito, pé de galinha e pé de galinha dobrado.

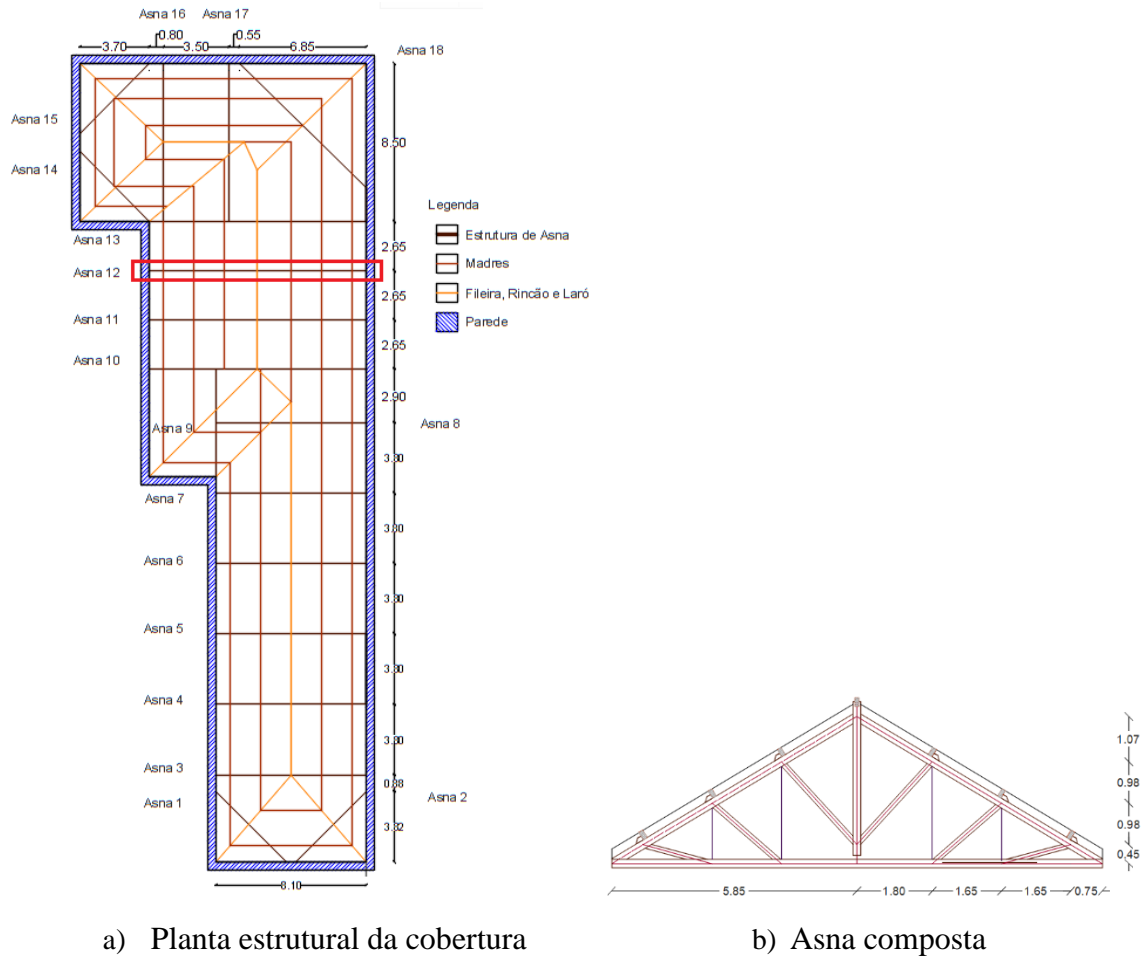


Figura 41 – Planta e asna tipo da cobertura do Edifício V

Na Tabela 8 são apresentadas as dimensões dos elementos da estrutura principal e secundária do da cobertura do Edifício V analisada.

Tabela 8 - Dimensão dos elementos estruturais da cobertura do Edifício V

	Dimensões		
	B [cm]	H [cm]	Esp [cm]
Linha	10,0	19,5	-
Perna	9,5	19,5	-
Pendural	10,0	19,5	-
Escora	9,0	13,0	-
Tirante	1,4		-
Madre	10,0	20,0	-
Fileira	10,0	20,0	-
Vara	6,0	7,5	50,0
Ripa	4,0	2,0	40,0

No trabalho realizado por Israel (2017) verificou-se que, de uma maneira geral, esta cobertura se encontra em bom estado de conservação e aparenta boa estabilidade. No

entanto, é recomendada a remoção das vigas de pavimento originais. Dado que estas não exercem qualquer tipo de função e fundamentalmente por serem os únicos elementos que possuem ataque de insetos em ativo. Note-se que existe um grande risco de propagação para os restantes elementos de madeira. Importa referir também que o soalho em tabique induz a alguma preocupação devido à sua fragilidade, remetendo para que a única forma de caminhar na cobertura seja por cima das vigas de pavimento.

Neste caso não foi possível avaliar o revestimento exterior porque não houve acesso para observar a cobertura.

Patologias e anomalias detetadas na estrutura de madeira foram principalmente as seguintes:

- Existência em alguns locais de deformação superficial nos elementos frechal, madre, vara e ripas.
- Existência em alguns locais de degradação/envelhecimento superficial no soalho e nos elementos estruturais.
- Existência pontual de fissuras insignificantes no elemento linha.
- Existência em alguns locais de ataques de insetos que põem em causa o uso e o conforto da envolvente, está presente nas vigas de pavimento.

4.4 Metodologia das coberturas analisadas

A Figura 42 ilustra a metodologia correntemente usada no dimensionamento de estruturas de madeira. O procedimento a adotar para a determinação dos esforços atuantes numa estrutura de cobertura de madeira existente é em tudo idêntica a qualquer outro projeto de estruturas.

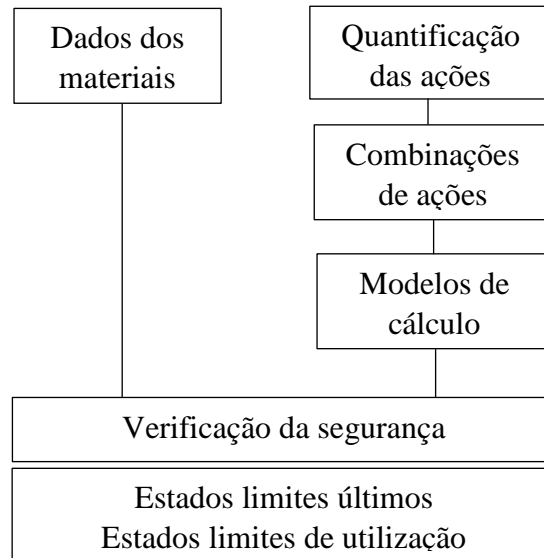


Figura 42 - Metodologia de cálculo, adaptado (Negrão e Faria, 2009)

Para realizar a verificação da segurança de estruturas existentes é necessário conhecer os materiais constituintes da estrutura, de modo a obter as características mecânicas desses materiais e os coeficientes pelos quais são afetados.

A quantificação das ações a atuarem na estrutura é outro aspeto fundamental a considerar. No processo de quantificação das ações é necessário ter em conta o previsto na regulamentação e considerar a localização dos edifícios, bem como o tipo de utilização. Determinadas as ações, é preciso combiná-las, de modo a que haja uma atuação simultânea mais realista possível. As combinações de interesse mais relevante são aquelas em que a combinação dê origem na estrutura aos efeitos mais desfavoráveis.

Após a definição da geometria dos elementos e da quantificação procede-se à modelação das estruturas de cobertura com o recurso a um programa de cálculo automático (Robot Millennum). A definição do modelo estrutural a adotar é umas das dificuldades na conceção de estruturas de madeira. A madeira apresenta uma composição celular, constituída por células de celulose alinhadas no sentido do fio da madeira e lenhina no sentido transversal, que assegura a ligação entre as fibras de celulose e apresenta uma forma muito deficiente. Assim a madeira apresenta duas direções distintas de comportamento, ou seja, a direção do fio e a direção perpendicular ao fio (Pérez, 2003).

A verificação da segurança de uma estrutura tem de passar obrigatoriamente pela aprovação das duas categorias de estados limites que são dependentes dos efeitos do tempo, estando estes efetivamente associados ao tempo de vida útil da construção. Os estados limites a considerar são os estados limites últimos que dizem respeito à segurança

das pessoas e à segurança da estrutura e os estados limites de utilização que se referem ao funcionamento da estrutura em condições normais de utilização.

Para determinar os parâmetros referidos anteriormente e para fazer a verificação da segurança das estruturas teve-se em consideração a seguinte documentação:

- RSA – Regulamento de Segurança e Ações em Estruturas de Edifícios e Pontes
- EC5 – Eurocódigo 5 – Dimensionamento de Estruturas de Madeira
- EC0 – Eurocódigo 0 – Bases para o Projeto de Estruturas
- EC1 – Eurocódigo 1 – Ações em Estruturas
- NP 4305 – Madeira Estrutural. Classes de Resistência
- EN 338 – Classes de Resistência

4.4.1 Materiais

A espécie de madeira das coberturas dos edifícios foi determinada através de observação. Todas foram identificadas com madeira de pinho bravo. Com base na norma NP 4305 (1995), a madeira foi classificada como pertencente à classe E que se fez corresponder à classe C18, tendo-se adotado as características mecânicas indicadas nas por Cruz et al. (1997).

Na Tabela 9 transcrevem-se as propriedades associadas à classe de resistência adotada.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas do pinho bravo

Madeira Maciça			
Propriedade	C18		
Resistência à Flexão	$f_{m,K}$	18	MPa
Resistência à Tração	$f_{t,0,K}$	11	MPa
	$f_{t,90,K}$	0,4	MPa
Resistência à Compressão	$f_{c,0,K}$	18	MPa
	$f_{c,90,K}$	2,2	MPa
Módulo de Elasticidade	$E_{0,mean}$	12	MPa

4.4.2 Quantificação das ações

As ações dão origem ao aparecimento dos esforços e das deformações nos elementos. Para as verificações da segurança das estruturas é necessário considerar as seguintes ações:

– Ações permanentes (G)

As ações permanentes incluem o peso próprio da madeira (PP) e o peso das restantes cargas permanentes (RCP).

O peso próprio depende da dimensão dos elementos que constituem a asna e da massa volumica da madeira utilizada, enquanto a restante carga permanente, Tabela 10, corresponde ao peso próprio dos materiais do revestimento e outros. Neste caso especificamente trata-se do conjunto de telhas ou chapas metálicas, ripado, varas, madres e em dois casos particulares forro e isotela.

Tabela 10 - Restantes cargas permanentes da cobertura segundo as Tabelas Técnicas (Farinha e Reis, 1993)

RCP	Carga [kN/m ²]				
	I	II	III	IV	V
Telha/ Chapa metálica	0,45	0,50	0,45	0,10	0,50
Forro	0,12	-	-	-	-
Isotela	-	-	0,02	-	-
Ripas	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Varas	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Madres	0,10	0,15	0,10	0,10	0,10

– Ações variáveis (Q)

Estas ações abrangem as sobrecargas de utilização e as ações de carácter variável. Neste trabalho são consideradas a sobrecarga da cobertura e a ação do vento.

o Sobrecarga – Q

Segundo o RSA (1983) e o EC 1 (2009), como se trata de coberturas não acessíveis, exceto para operações de manutenção e reparação, o valor de sobrecarga a ser adotado é o que se indica na Tabela 11.

Tabela 11 - Sobrecarga da cobertura segundo o EC 1

Sobrecarga	[KN/m ²]
Cobertura	0,4

o Vento – W

A ação exercida pelo vento sobre as coberturas inclinadas depende das condições previsíveis dos ventos em cada região, da geometria das coberturas e da implementação dos edifícios. Em caso de tempestade podem ocorrer pressões e sucções.

Neste trabalho as forças devido ao vento são calculadas de acordo com o Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA).

Para efeitos de quantificação da ação do vento é necessário identificar o zonamento do território, uma vez que a intensidade do vento pode variar consoante a localização, o artigo 20º do RSA, considera o país dividido nas seguintes zonas:

- Zona A - para a generalidade do território;
- Zona B - para os arquipélagos dos Açores e Madeira e regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura ou a altitudes superiores a 600m.

Para os edifícios em análise, localizados no Centro Histórico de Leiria foi considerada a zona A, rugosidade aerodinâmica do solo do tipo I.

Sabendo que nenhum dos edifícios ultrapassa os 15m de altura e que a rugosidade é do tipo I, o valor da pressão dinâmica ($w_k = 0,70 \text{ kN/m}$).

A quantificação da ação do vento sobre uma construção é determinada tendo em conta o valor da pressão dinâmica e os coeficientes de forma. Os coeficientes de forma a considerados são os coeficientes de pressão e os coeficientes de força.

Os coeficientes de pressão, especificados no anexo I do RSA, onde as pressões devidas ao vento resultam de pressões exteriores (δ_{pe}) e pressões interiores (δ_{pi}).

Como não são consideradas aberturas, não se consideram os coeficientes de pressão interior, logo admite-se a inexistência de pressões interiores.

Na Tabela 12 são apresentados os coeficientes de pressão exterior.

Tabela 12 – Coeficiente de pressão exterior

h/b [m]	β [graus]	Ações globais			
		Direção do vento			
		$\alpha=0^\circ$		$\alpha=90^\circ$	
		E F	G H	E G	F H
$1/2 < h/b \leq 3/2$	20	-0,7	-0,5	-0,8	-0,8
	30	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8
	45	0,2	-0,5	-0,8	-0,8

A ação do vento sobre o edifício, foi determinada considerando a pressão dinâmica do vento, W , e os coeficientes de pressão exterior δ_{pe} de acordo com a seguinte expressão:

$$P = \delta_{pe} \times W \quad (1)$$

Na Tabela 13 são apresentados os valores considerados para a pressão do vento para cada um dos edifícios em estudo.

Tabela 13 – Valores de pressão do vento por cada zona e para cada direção do vento

Edifício	h [m]	b [m]	β [graus]	WK [kN/m ²]	Valor da pressão do vento [kN/m ²]					
					$\alpha=0$				$\alpha=90$	
					X1		X2		Y	
I	8,0	7,7	37,5	0,7	-0,14	-0,35	0,14	-0,35	-0,56	-0,56
II	12,0	13,3	27,3	0,7	-0,14	-0,35	-	-	-0,56	-0,56
III	8,0	13,0	37,0	0,7	-0,14	-0,35	0,14	-0,35	-0,56	-0,56
IV	12,0	12,1	28,2	0,7	-0,21	-0,35	-	-	-0,56	-0,56
V	12,0	11,7	30,8	0,7	-0,14	-0,35	-	-	-0,56	-0,56

Na Figura 43 está representado o esquema relativo à ação do vento na cobertura.

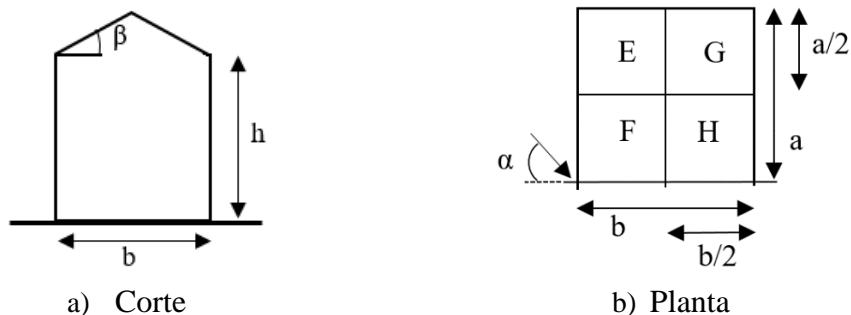


Figura 43 – Esquema da ação do vento na cobertura

Relativamente ao modelo bidimensional é indispensável determinar a força do vento sob a forma de carga concentrada. Para tal é necessário, conhecer o valor da pressão do vento, P , e a área de influência, A .

$$F = P \times A \quad (2)$$

As áreas de influência foram determinadas para asna mais desfavorável de cada edifício, de modo, a quantificar a pressão de vento que seria encaminhada para cada nó.

Na Figura 44 são apresentadas as plantas de cada edifício, com as respetivas áreas de influência que se consideraram mais condicionantes, para obter todas as cargas concentradas a aplicar por nó nas asnas.

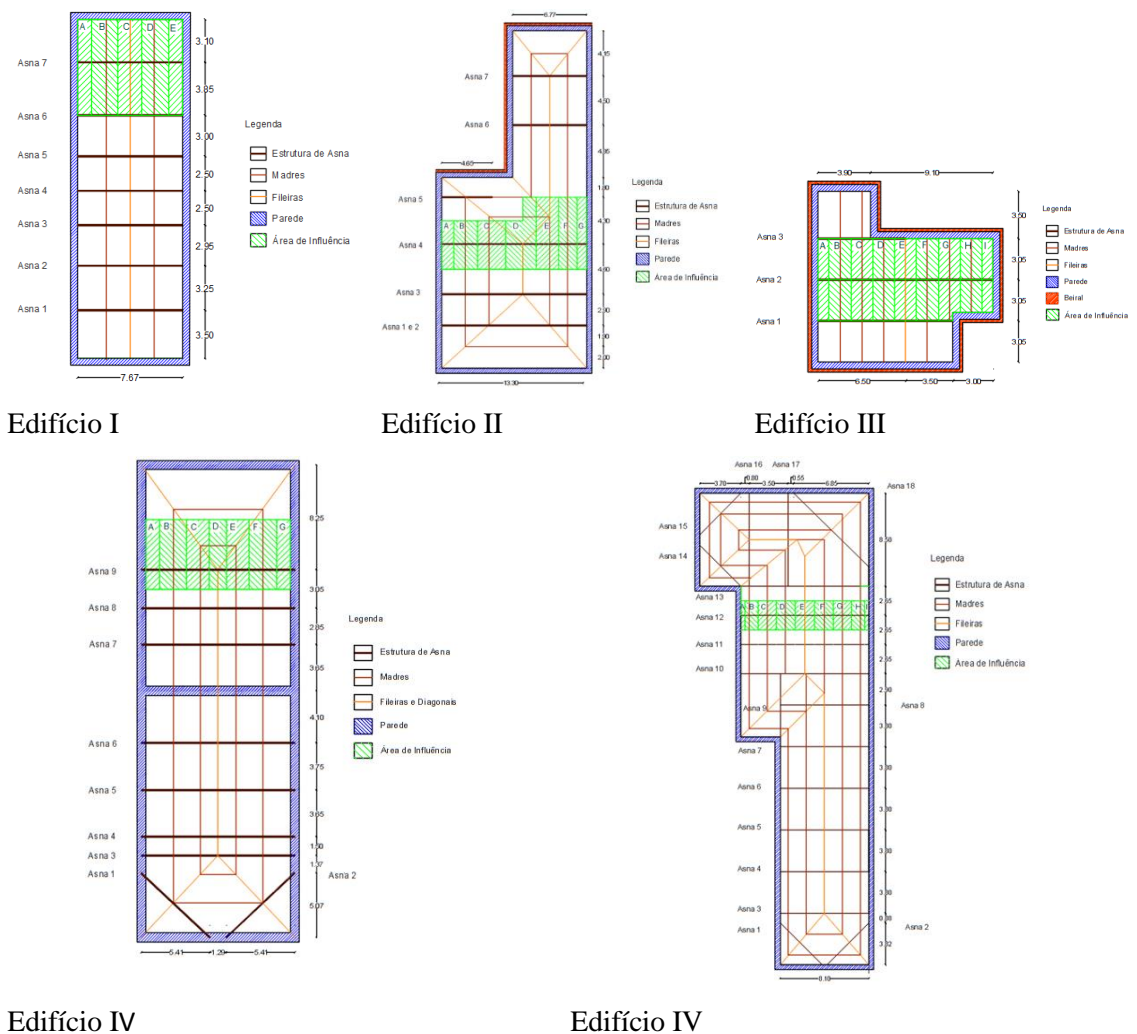


Figura 44 - Áreas de influência do edifício

4.4.3 Classe de Serviço

O EC5 (2.3.1.3(2)) caracteriza as estruturas tendo em conta dois fatores: a temperatura e a humidade relativa do ar ambiente. Adotou-se em todos os casos de estudo a seguinte classe de serviço:

Classe de serviço 1: caracterizada por um teor de água dos materiais correspondente ao teor de água de equilíbrio para um ambiente com uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa do ar ambiente, excedendo 65% somente durante algumas semanas do ano.

4.4.4 Classe de duração das ações

O EC5 (2.3.1.2) tem em conta o tempo a que uma estrutura se encontra sujeita a determinada ação. Nos casos em estudo a ação atuante nas estruturas resulta da combinação de ações de origens diferentes, pelo que na Tabela 14 encontram-se as classes de duração correspondentes a cada uma das ações consideradas.

Tabela 14 - Classificação da duração das ações

Ação	Classe de duração da ação
Cargas permanentes	Permanente
Sobrecargas	Média
Vento	Curta

4.4.5 Dimensionamento pelo método dos coeficientes parciais

Na Tabela 15 são indicados os valores de cálculo para os coeficientes ψ , relativos à sobrecarga da cobertura e ao vento, utilizados na verificação da segurança.

Tabela 15 - Coeficientes ψ para edifícios – EC0 – Quadro A1.1

Ação	ψ_0	ψ_1	ψ_2
SC Cobertura H	0	0	0
Vento	0,6	0,2	0

- Estados Limites Últimos

De acordo com o método dos coeficientes parciais, o valor característico de uma propriedade mecânica, Tabela 16, deve ser afetado de um coeficiente parcial, γ , que tem

em conta a natureza do material e um fator k_{mod} que engloba a classe de serviço e a duração da ação, sendo escolhido coeficiente correspondente à ação de menor duração, Tabela 17.

Tabela 16 - Coeficientes parciais de segurança ELU

Coeficientes	Valor
Ações permanentes - γ_g	1,35
Ações variáveis - γ_q	1,5
Madeira maciça - γ_m	1,3

Tabela 17 - Valor de k_{mod}

Ação	Classe de duração da ação	K_{mod}	Classe adotada	K_{mod} adotado
Cargas permanentes	Permanente	0,6	Curta	0,9
Sobrecargas	Média	0,8		
Vento	Curta	0,9		

- Estados Limites Utilização

Para os estados limites de utilização, os coeficientes parciais γ_M , relativos às propriedades dos materiais consideram-se iguais a 1,0. Com base na classe de serviço determinou-se o valor relativo à deformação, k_{def} , que é igual a 0,6.

4.4.6 Combinações de ações

Nesta análise são consideradas três tipos de combinações, a combinação fundamental para o estado limite último e as combinação característica ou rara e quase-permanente para o estado limite de utilização.

A combinação fundamental, distingue situações de projeto persistentes ou transitórias, onde os valores de cálculo das ações atuantes são obtidos a partir da seguinte combinação de ações:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{g,j} G_{k,j} + \gamma_{q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{q,i} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (3)$$

Onde:

$G_{k,j}$ – Valor característico das ações permanentes;

$Q_{k,1}$ – Valor característico da ação variável base;

$Q_{k,i}$ – Valor característico da ação variável acompanhante;

$\gamma_{g,j}$ – Coeficiente parcial de segurança relativo às ações permanentes;

$\gamma_{q,1}$ – Coeficiente parcial de segurança relativo à ação variável base;

$\gamma_{q,i}$ – Coeficiente parcial de segurança relativo à variável acompanhante;

$\Psi_{0,i}$ – Coeficiente de combinação do vento.

A combinação característica ou rara está associada a períodos de muito curta duração que poderá solicitar a estrutura durante apenas algumas horas do seu tempo de vida útil. Os valores de cálculo das ações atuantes são obtidos através da seguinte combinação de ações:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4)$$

Onde:

$G_{k,j}$ – Valor característico das ações permanentes;

$Q_{k,1}$ – Valor característico da ação variável base;

$Q_{k,i}$ – Valor característico da ação variável acompanhante;

Ψ_0 – Coeficiente de combinação do vento.

A combinação quase-permanente está associada a períodos de longa duração que solicitam a estrutura durante grande parte do seu tempo de vida útil. Os valores de cálculo das ações atuantes são obtidos através da seguinte combinação de ações:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i > 1} \Psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (5)$$

Onde:

$G_{k,j}$ – Valor característico das ações permanentes;

$Q_{k,i}$ – Valor característico da ação variável acompanhante;

$\Psi_{0,i}$ – Coeficiente de combinação do vento.

4.4.7 Modelos de cálculo

A modelação numérica teve como principal objetivo obter os esforços e as deformações que possibilitam efetuar as necessárias verificações de segurança. Para isso, é comum recorrer-se a programas de cálculo automático. Nos casos de estudo foi utilizado o programa de cálculo *Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2017*. Este é um programa de elementos finitos que permite a modelação de estruturas e a avaliação dos esforços nos seus elementos, em função das características mecânicas dos materiais, das características geométricas das secções e das ações.

A adoção de um modelo estrutural adequado, tal como uma correta modelação das ações, é determinante para o êxito de uma análise estrutural, uma vez que os resultados obtidos derivam diretamente da modelação utilizada. Um fator muito relevante, é a dificuldade de efetuar uma correta caracterização das condições de apoio existentes.

Nos modelos realizados o primeiro passo passou pela definição do material e pela introdução da geometria das secções dos elementos da estrutura de acordo com o levantamento geométrico feito por Israel (2017), tal como se descreveu anteriormente. Neste estudo foram considerados dois tipos de modelos, o modelo bidimensional e o modelo tridimensional. Além disto, o comportamento estrutural global foi avaliado calculando o efeito das ações com um modelo de comportamento linear para os materiais.

O modelo bidimensional, ver Figura 45, é constituído por um sistema reticulado plano rígido, definido por barras rígidas complanares ligadas entre si por extremidades rotuladas, formando um sistema estável. Este tipo de estrutura tem forma triangular, conhecida como treliça e neste caso em particular designada também por asna.

As asnas foram modeladas usando articulações de modo a calibrar as deformações e os momentos fletores. O carregamento foi efetuado nos nós e a forma como as barras são colocadas na treliça fazem com que o sistema fique eficiente para suportar as cargas. Deste modo, as forças resultantes das cargas externas e as reações a essas forças são consideradas a agir apenas nos nós dos elementos de madeira e resultam nos esforços que podem ser esforços axiais de tração ou de compressão e momentos fletores.

Importa evidenciar que este modelo foi considerado apenas para a asna mais solicitada de cada edifício e dessa asna foram então determinados os esforços axiais, o momento fletor e as deformações para todos os elementos constituintes.

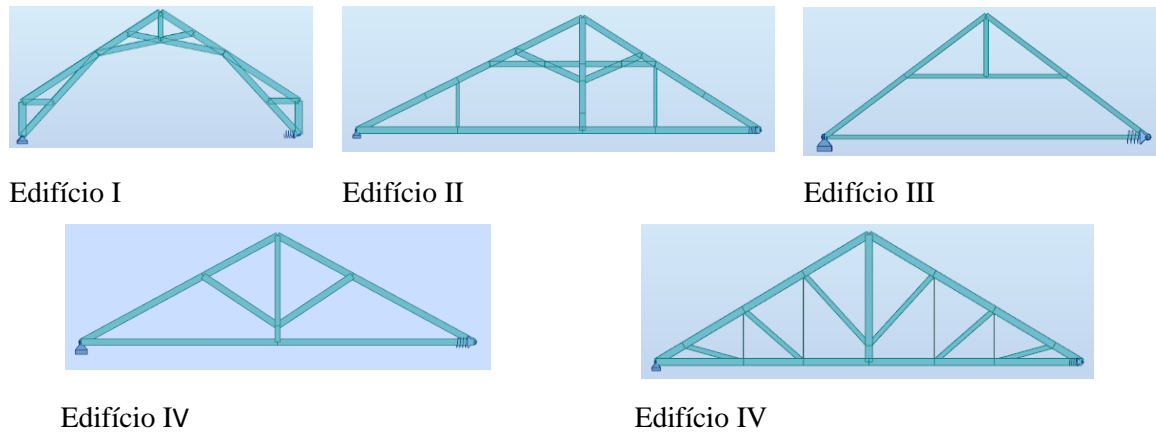


Figura 45 – Modelo bidimensional das asnas dos edifícios em estudo

Para o modelo tridimensional, ver Figura 46, utilizou-se o mesmo sistema de estrutura reticulada do modelo bidimensional, mas desta vez a estrutura é composta pelas várias asnas concordantes com a arquitetura presente nos desenhos referidos anteriormente. Neste modelo além das asnas foram introduzidas as madres, as varas e as ripas. No caso das cargas, estas foram aplicadas através de elementos 2D, não estruturais, com a função de distribuir as cargas por área de influência. Importa ainda referir que neste modelo verificaram-se apenas os esforços e as deformações máximas de cada elemento estrutural.

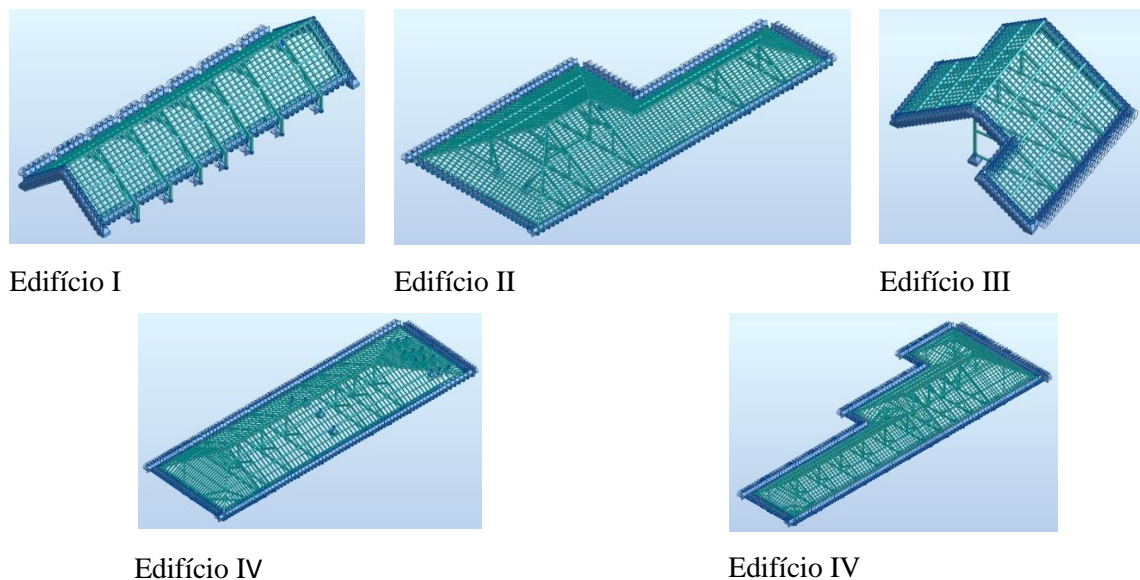


Figura 46 - Modelo tridimensional das coberturas dos edifícios em estudo

Por fim, é sabido que as paredes dos edifícios que suportam as asnas não são rígidas, por esse motivo houve a necessidade de admitir um deslocamento utilizando uma mola. No caso do modelo bidimensional a simulação é feita por um apoio simples e uma mola, já

no caso do modelo tridimensional são considerados apoios elásticos, ou seja, molas, em todo o contorno do edifício.

A rigidez da mola foi determinada admitindo uma tensão máxima na alvenaria de 0,1 MPa e um deslocamento de 5 mm. Com a tensão admitida pode-se determinar o momento máximo, como exemplificado na Figura 47, e assim obter a força resultante, considerando o comprimento de influência da asna (C) e a espessura da parede (t).

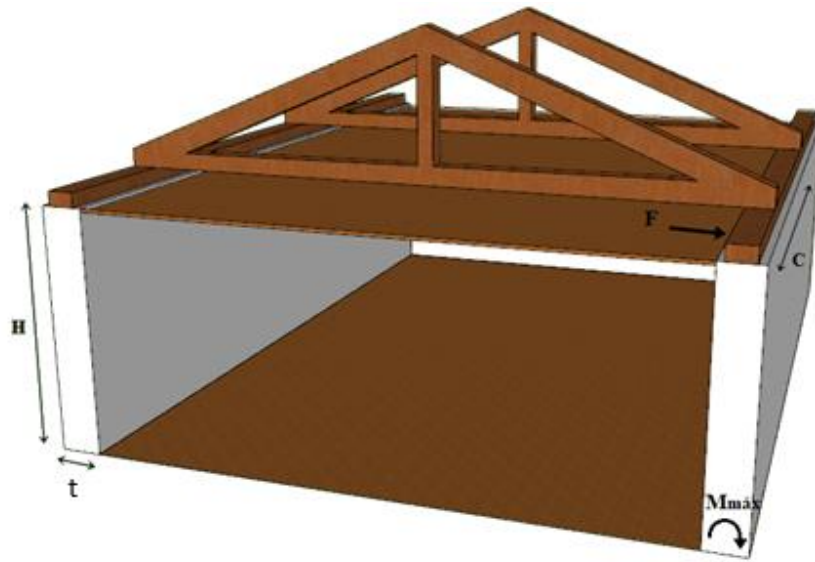


Figura 47 – Esquema para a determinação da rigidez da mola

Através da lei de Hooke, tendo admitido um deslocamento, obtém-se a rigidez da mola. Na Tabela 18 são descritas as dimensões utilizadas e a rigidez obtida para cada mola para cada edifício.

Tabela 18 – Rigidez da mola de cada edifício

Edifício	Comprimento de influência, C [m]	Espessura da parede, t [m]	Altura da parede, H [m]	K [kN/m]
I	6,95	0,4	4	927
II	6,6	0,4	4	880
III	6,1	0,4	4	813
IV	5,48	0,4	3	974
V	2,65	0,4	3	471

4.4.8 Verificação da segurança

De seguida, são apresentadas as verificações de segurança realizadas nas estruturas de madeira que correspondem a dois tipos de estado limite, nomeadamente o estado limite último (ELU), que avalia os problemas de segurança estrutural e o estado limite de utilização (ELS), que tem em vista a adequabilidade da estrutura para a utilização diária.

4.4.8.1 Estado Limite Último

A verificação da segurança em relação aos estados limite últimos, que não envolvam perda de equilíbrio ou fadiga, consiste em respeitar a seguinte condição:

$$E_d \leq R_d \quad (6)$$

Onde:

E_d - valor de cálculo do esforço atuante;

R_d - valor de cálculo do esforço resistente

De acordo com o Eurocódigo 5 parte 1-1, devem ser executadas as seguintes verificações:

- Verificação da Segurança à Tração paralela ao fio:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (7)$$

Onde:

$\sigma_{t,0,d}$ é o valor de cálculo da tensão atuante de tração paralela ao fio, para a combinação de ações mais condicionante.

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{sd}}{A} \quad (8)$$

Onde:

N_{sd} é o valor do esforço axial de cada barra que se encontra à tração, valor retirado do modelo de cálculo.

A é o valor da área da seção em estudo.

$f_{t,0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à tração paralela ao fio, e a sua expressão é dada pela expressão seguinte:

$$f_{t,0,d} = K_{mod} \times \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_m} \quad (9)$$

Onde:

K_{mod} é o fator de modificação da resistência, que tem em conta o efeito da duração das ações e do teor em água (Tabela 17).

$f_{t,0,k}$ é o valor característico da resistência à tração.

γ_m é o coeficiente parcial de segurança para uma propriedade de um material (Tabela 15).

- Verificação da Segurança à Compressão paralela ao fio:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (10)$$

Onde:

$\sigma_{c,0,d}$ é o valor de cálculo da tensão atuante de compressão, para a combinação de ações mais condicionante.

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{sd}}{A} \quad (11)$$

Onde:

N_{sd} é o valor do esforço axial de cada barra que se encontra à compressão, valor retirado do modelo de cálculo.

A é o valor da área da seção em estudo.

$f_{c,0,d}$ é o valor de cálculo da resistência à compressão paralela ao fio, e a sua expressão é a seguinte:

$$f_{c,0,d} = K_{mod} \times \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_m} \quad (12)$$

Onde:

K_{mod} é o fator de modificação da resistência, que tem em conta o efeito da duração das ações e do teor em água (Tabela 17).

$f_{c,0,k}$ é o valor característico da resistência à compressão.

γ_m é o coeficiente parcial de segurança para uma propriedade de um material (Tabela 15).

- Verificação da Segurança à Encurvadura:

Esta verificação deve ser efetuada quando o elemento estiver sujeito à compressão e a esforços de flexão. Para tal, deve começar-se por calcular a esbelteza do elemento em análise.

A esbelteza relativa é dada pela seguinte expressão:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \times \left(\frac{f_{c,o,k}}{E_{0,05}} \right)^{0,5} \quad (13)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \times \left(\frac{f_{c,o,k}}{E_{0,05}} \right)^{0,5} \quad (14)$$

Onde:

$f_{c,o,k}$, é o valor característico da resistência à compressão.

λ_y e λ_z são o coeficiente da esbelteza em y e z respetivamente, e as suas equações são dadas pelas expressões abaixo referidas:

$$\lambda_y = \frac{L_{v,y}}{i_y} \quad (15)$$

$$\lambda_z = \frac{L_{v,z}}{i_z} \quad (16)$$

Onde:

$L_{v,y}$ e $L_{v,z}$ são os comprimentos de encurvadura, Figura 48, para a flexão em torno dos eixos y e z (correspondendo a deformação nos planos xz e xy, respetivamente).



Figura 48 – Comprimento de encurvadura da barra comprimida

i_y e i_z são os raios de giração relativos aos eixos y e z, e as suas expressões encontram-se abaixo referidas:

$$i_y = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad (16)$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (17)$$

Onde:

I_y e I_z são as inércias em y e z respetivamente.

A é a área da seção.

Para que a encurvadura seja verificada é necessário que as tensões que são aumentadas devido às deformações satisfaçam as seguintes condições:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} \times f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + K_m \times \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (18)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} \times f_{c,0,d}} + K_m \times \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (19)$$

Os valores de $\sigma_{c,0,d}$ e $f_{c,0,d}$ são conhecidos, da verificação da segurança à compressão paralela ao fio. O coeficiente K_m para madeira maciça e secções retangulares é igual a 0,7. Deste modo resta calcular os coeficientes de encurvadura $K_{c,y}$ e o $K_{c,z}$. As suas equações são:

$$K_{c,y} = \frac{1}{K_y + \sqrt{K_y^2 + \lambda_{rel,y}^2}} \quad (20)$$

$$K_{c,z} = \frac{1}{K_z + \sqrt{K_z^2 + \lambda_{rel,z}^2}} \quad (21)$$

Onde:

$K_{c,y}$ é o coeficiente de encurvadura em y.

$\lambda_{rel,y}$ é a esbelteza relativa em y.

$K_{c,z}$ é o coeficiente de encurvadura em z.

$\lambda_{rel,z}$ é a esbelteza relativa em z.

Para calcular K_y e K_z , utilizam-se as seguintes expressões:

$$K_y = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,y} - 0,3)) + \lambda_{rel,y}^2 \quad (22)$$

$$K_z = 0,5 \times (1 + \beta_c \times (\lambda_{rel,z} - 0,3)) + \lambda_{rel,z}^2 \quad (23)$$

Nota: com $\beta_c = 0,2$, para madeira maciça.

4.4.8.2 Estado Limites de Utilização

A verificação da segurança em relação a estados limite de utilização consiste em respeitar a seguinte condição:

$$E_d \leq C_d \quad (24)$$

em que,

E_d – Valor de cálculo dos efeitos das ações especificadas no critério de utilização, determinado com base na combinação em causa;

C_d – Valor de cálculo correspondente ao valor limite do critério de utilização.

Um aspeto muito importante para a avaliação do estado limite de deformação é o comportamento da madeira ao longo do tempo. A estrutura responde instantaneamente com a deformação quando lhe é aplicada uma carga, esta deformação aumenta ao longo do tempo, se as condições ambientais e a duração das ações assim o proporcionarem.

Com a verificação dos estados limite de utilização, pretende-se garantir as condições de uso da estrutura, estando esta condicionada pela deformação e pela vibração. Neste estudo apenas será verificada a deformação. A deformação de qualquer elemento de madeira, deve ser compatível com o funcionamento previsto para a estrutura, não devendo apresentar aspeto desagradável, devido à excessiva deformação, nem condicionar ou danificar outros elementos adjacentes à própria estrutura.

Devido à sua natureza viscoelástica, a madeira é um material que pode ser bastante afetado por efeitos de deformação, apresentando uma fluência considerável. A

conjugação de vários fatores como as condições de teor em água, as condições de humidade relativa e a duração da carga, poderão originar grandes deformações. Segundo a Figura 49 as deformações são divididas em dois componentes.

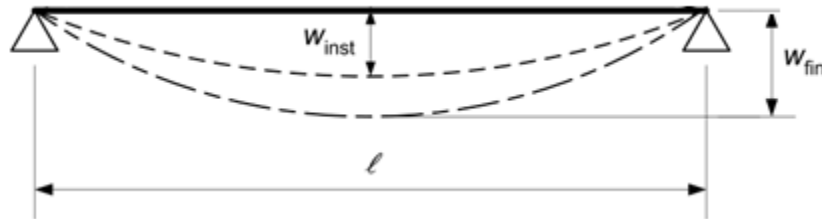


Figura 49 - Componentes da deformação

O EC5 define os dois critérios para limitação das deformações:

- O primeiro serve para limitar as deformações que podem produzir danos em elementos não estruturais e é verificado através da limitação das deformações instantâneas (W_{inst});
- O segundo limita a deformação a longo prazo (W_{fin}), sendo importante para cumprir requisitos de funcionalidade e de aspeto visual.

Para a verificação do estado limite de utilização são usados dois tipos de combinações. A deformação instantânea, W_{inst} , é determinada com base na combinação característica de ações, para a determinação de deslocamentos instantâneos. E a deformação final, W_{fin} , que é obtida através da combinação quase-permanente de ações, para determinar os deslocamentos totais.

Os valores das deformações obtidos são limitados pelos valores apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores limite de deformação para vigas segundo o EC5

	Simply supported
w_{inst}	L/300 a L/500
w_{fin}	L/150 a L/300

5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Efetuada a introdução de todos os dados necessários para um correto modelo estrutural, nomeadamente as propriedades mecânicas, a geometria e os apoios, procedeu-se à análise dos modelos fazendo as respetivas verificações. As verificações de segurança realizadas tiveram em conta os requisitos presentes no Eurocódigo 5.

Importa referir que todas as verificações foram realizadas tendo em conta a combinação mais condicionante ou quando assim era necessário as combinações mais condicionantes. Primeiramente fez-se a análise apenas para a asna mais desfavorável de cada edifício e depois a análise completa da estrutura da cobertura do edifício.

A análise dos cinco casos de estudo permite, apesar dos diferentes tipos de asnas, relacionar os elementos constituintes da estrutura principal, bem como perceber qual a função estrutural que cada elemento desempenha. As asnas analisadas estão sujeitas essencialmente a esforços axiais e momentos fletores provocados pelo peso próprio da asna e pelas ações assimétricas, neste caso específico pelo vento.

De seguida, nas Figuras 50, 52, 54, 56 e 58 apresentam-se os diagramas de esforços axiais e nas Figuras 51, 53, 55, 57 e 59 os diagramas de momentos fletores correspondentes ao tipo de ação mais relevante de cada edifício. Estes diagramas foram obtidos através do programa de cálculo automático utilizado.

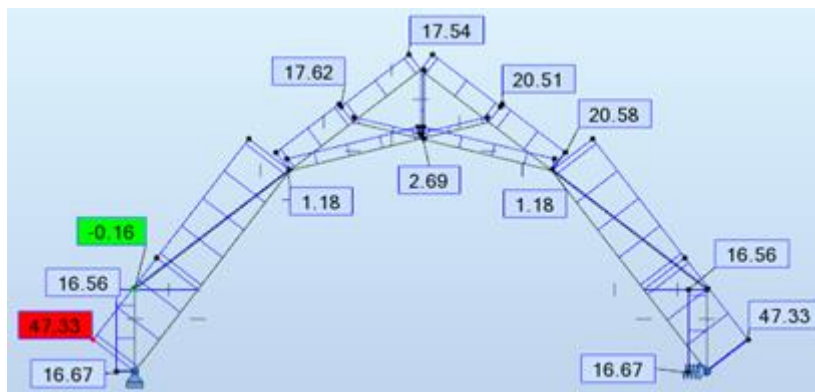


Figura 50 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício I, para a ação permanente

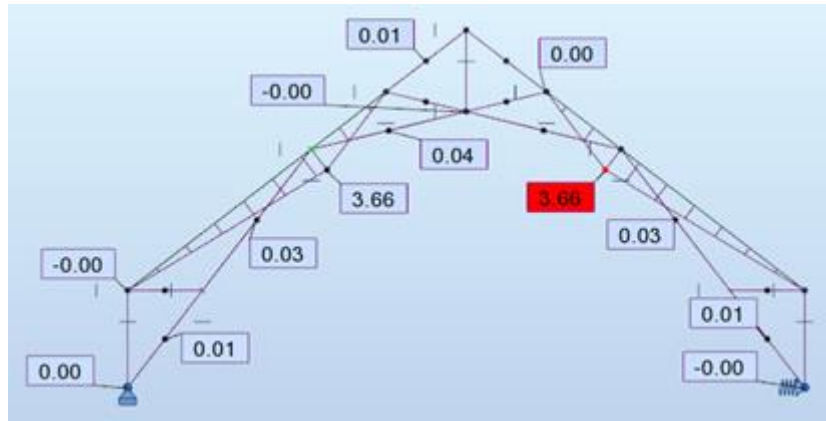


Figura 51 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício I, para a ação permanente

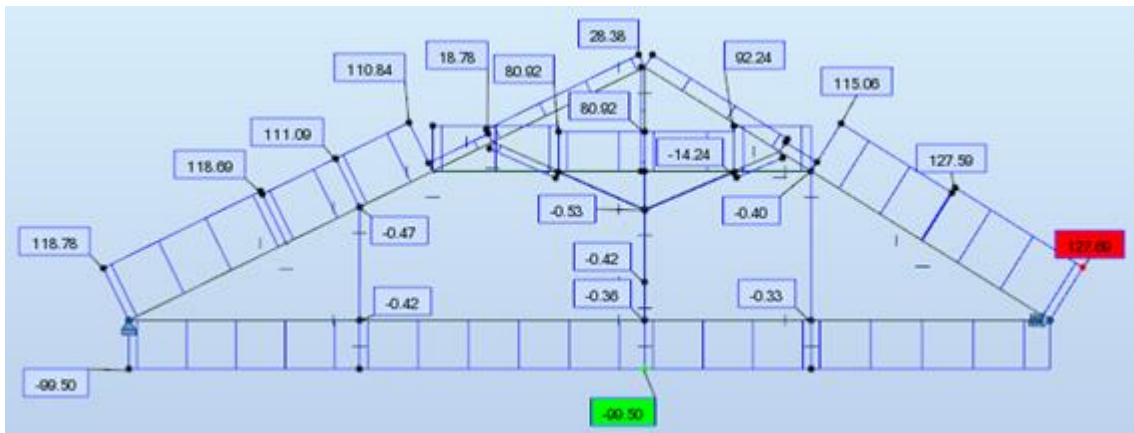


Figura 52 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício II, para a ação permanente

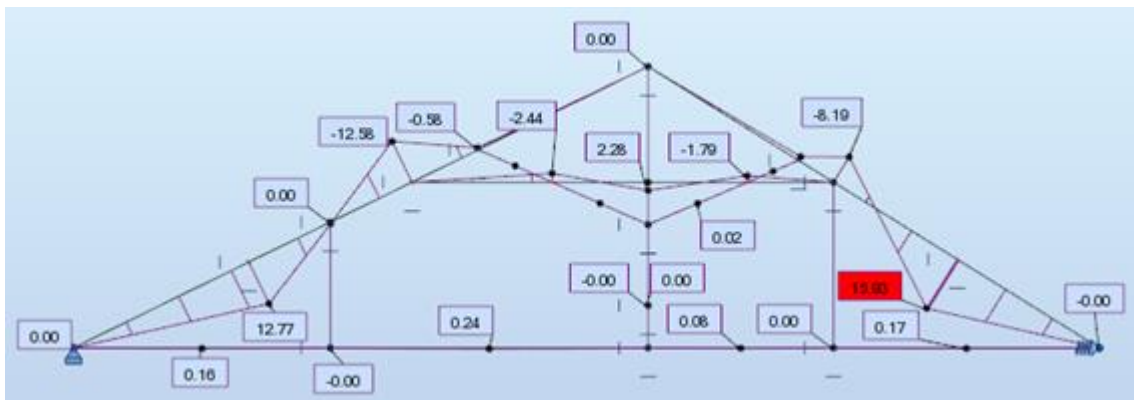


Figura 53 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício II, para a ação permanente

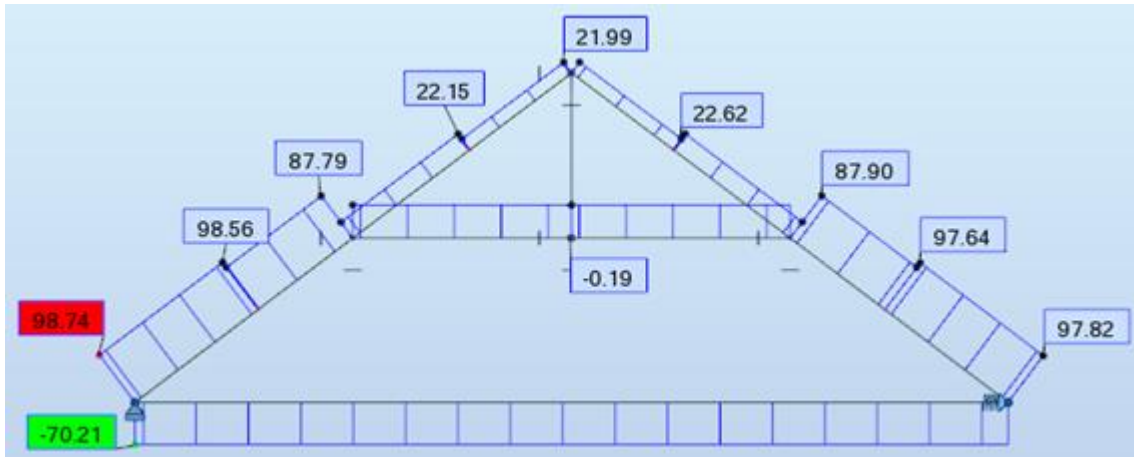


Figura 54 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício III, para a ação permanente

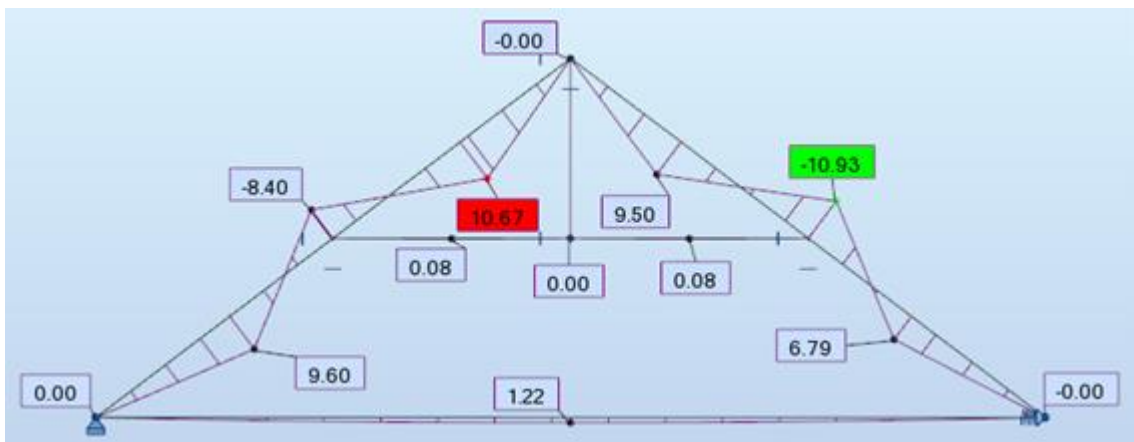


Figura 55 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício III, para a ação permanente

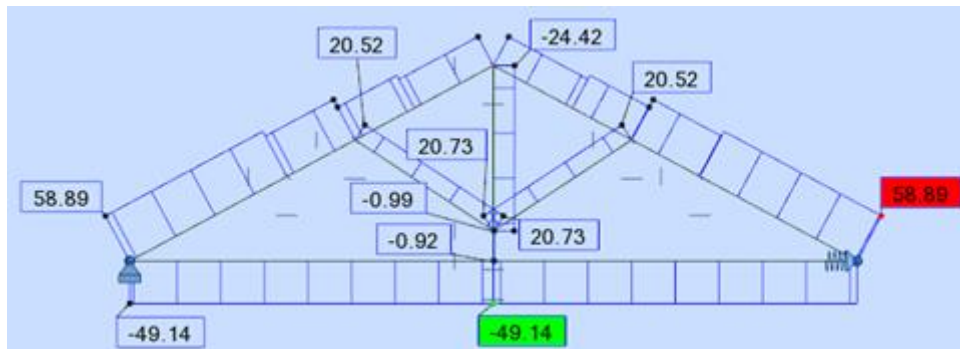


Figura 56 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício IV, para a ação permanente

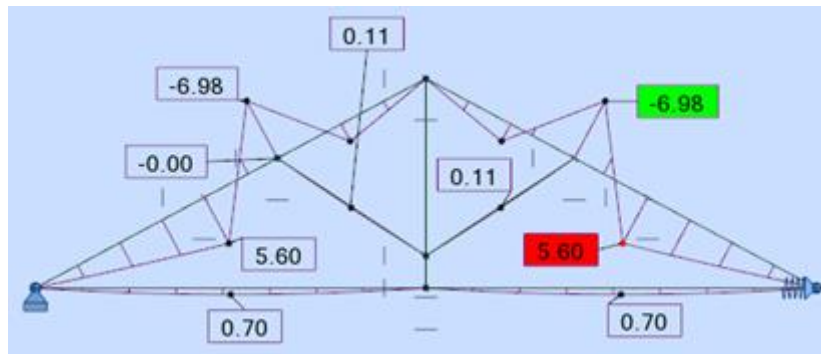


Figura 57 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício IV, para a ação permanente

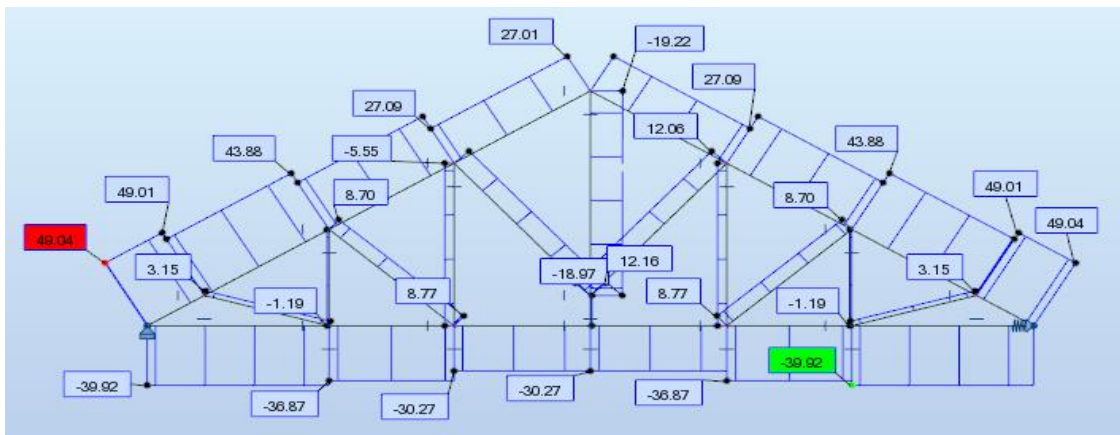


Figura 58 - Diagrama de esforços axiais, do Edifício V, para a ação permanente

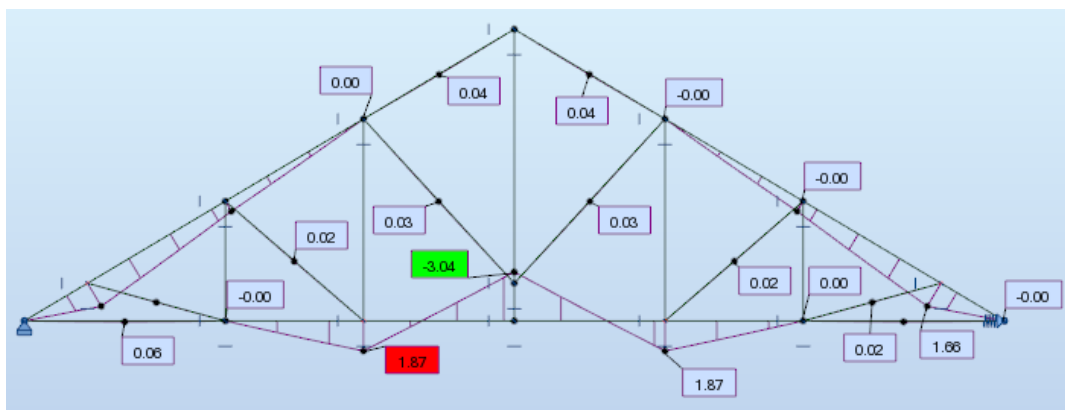


Figura 59 - Diagrama de momentos fletores, do Edifício V, para a ação permanente

Com base nos diagramas apresentados, pode dizer-se numa primeira análise que a perna é um dos elementos mais solicitados. Este elemento apresenta esforços axiais de compressão e recebe toda a carga proveniente do revestimento, da estrutura secundária e das madres. Excecionalmente a asna de tesoura, à semelhança das restantes asnas, funciona de forma diferente, neste caso o elemento mais carregado é a escora e não a

perna, isto deve-se fundamentalmente à geometria da asna e ao modo como são aplicadas as madres.

Repare-se que os maiores momentos verificados nas pernas estão relacionados com a presenças das madres, principalmente onde não existe qualquer tipo de escoramento, nomeadamente nas asnas dos Edifícios II, III e IV (Figuras 53, 55 e 57).

A linha efetua a ligação entre as duas pernas e está sujeita a esforços axiais de tração associados a flexão, devido ao seu peso próprio e ao peso do teto do piso inferior.

O pendural é o elemento que faz a ligação entre todos ou quase todos os elementos da estrutura principal, e apresenta esforços axiais de tração, com exceção da asna de tesoura (Edifício I), Figura 50, pois neste caso o pendural apresenta esforços axiais de compressão, resultantes da geometria particular desta asna e com exceção da asna de alpendre (Edifício II), Figura 52, onde o pendural apresenta compressão desde a união entre as pernas até à ligação com as escoras. No entanto, inverte o esforço para tração desde a ligação com as escoras até à linha.

Nas duas asnas de alpendre (Edifícios II e III), Figuras 52 e 54, o nível situado a meio da altura das pernas, tal como as escoras, apresenta esforços axiais de compressão e impede a flexão da perna, controlando também a deformação deste elemento.

Fundamentalmente, as escoras apresentam esforços axiais de compressão e têm a função de ligar as pernas ao pendural ou à linha, impedido deste modo a deformação por flexão das pernas, quando estas são solicitadas por ações exteriores. No caso da asna de alpendre do Edifícios II, Figura 52, excepcionalmente as escoras encontram-se à tração. Neste caso específico, a geometria observada nesta asna deixa suspeitar que tenha havido problemas de conceção, motivo pelo qual se verifica uma geometria e distribuição de esforços diferente comparativamente ao tradicional.

Relativamente aos momentos fletores nos restantes elementos, linha, pendural e escora os seus valores não são muito relevantes, pois apresentam valores nulos ou muito próximos de zero.

Desta análise pode tirar-se desde já algumas conclusões sobre cada tipo de asna dos diferentes edifícios. A asna de tesoura do Edifício I, Figura 50 e 51, apresenta uma geometria característica que tem influência nos resultados obtidos. O facto de apresentar

um pendural curto que não tem ligação com a linha demonstra que ao comparar com a típica asna simples existe uma inversão de esforços. Outro aspeto relevante, diz respeito, à presença do maior esforço axial de compressão presente na escora e não na perna. Como referido, a geometria e a aplicação das madres na asna terão um papel relevante para este sucedido.

A asna de alpendre do edifício II, Figura 52 e 53, tem a particularidade de ser uma asna assimétrica e possuir um nível e duas escoras que permitem restringir a flexão nas pernas. Esta asna possui dois tirantes cuja função não é muito relevante do desempenho estrutural. Neste caso as madres encontram-se excêntricas relativamente aos nós da asna e como se pode ver pela Figura 53, esta excentricidade provoca uma alteração na distribuição dos esforços, nomeadamente criando momentos fletores das pernas.

A asna de alpendre do edifício III, Figura 54 e 55, tem a mesma particularidade do edifício anterior, isto é, possui um nível que permite restringir a flexão das pernas. Tem um pendural curto que está ligado ao topo das pernas e ao nível, este tipo de construção tem a singularidade de aumentar as deformações da linha. Na Figura 55 pode ver-se a influência das madres quando estas não se encontram concentradas nos nós.

A asna simples do edifício IV, Figura 56 e 57, é a típica asna de referência para as estruturas de cobertura. Neste caso importa referir a excentricidade das madres visível na Figura 57 e a falta de escoramento.

A asna composta do edifício V, Figura 58 e 59, constitui um bom exemplo de boa prática na construção das asnas, uma vez que, a cada madre corresponde um escoramento, logo o carregamento concentra-se nos nós, sem que haja flexão dos elementos como se pode verificar pelo diagrama de momentos fletores da Figura 59.

De seguida são apresentados os quadros resumo para cada estrutura de cada edifício onde é indicado se os critérios de segurança exigidos no Eurocódigo 5 são ou não cumpridos. Para fazer esta avaliação foi calculado um rácio. Deste modo, nos estados limites últimos o rácio considerado foi o valor resultante do quociente entre o valor resistente de dimensionamento e o valor atuante de cálculo e nos estados limites de utilização o rácio considerado foi o valor resultante do quociente entre o valor limite e o valor de cálculo.

Quando o rácio é superior ou igual a 1 a estrutura está em segurança. Começa-se por fazer a análise dos resultados obtidos na verificação da segurança aos estados limites últimos.

Nas Tabelas 20 e 21 está representada a análise da segurança da asna mais desfavorável e a análise da segurança da estrutura completa do edifício, respetivamente. Ambas as verificações são realizadas para cada caso de estudo.

Tabela 20 - Resultados da verificação da segurança aos estados limites últimos para a asna mais desfavorável

Verificação	I	II	III	IV	V
Tração	1070,9	2,0	1,5	5,6	3,7
Compressão	5,9	2,1	3,1	7,0	4,7
Encurvadura	2,1	33,4	1,0	0,6	1,4
Flexão	2,8	0,5	0,8	1,4	4,5

Tabela 21 - Resultados da verificação da segurança para a estrutura completa

Verificação	I	II	III	IV	V
Tração	27,9	4,9	4,2	10,9	3,7
Compressão	25,9	5,1	5,8	9,9	4,1
Encurvadura	2,8	0,7	1,9	0,4	1,4
Flexão	4,1	1,0	2,3	2,0	1,8

Como se pode observar, as estruturas dos Edifícios I e V cumprem todos os requisitos regulamentares. Pode dizer-se o mesmo dos restantes Edifícios II, III e IV, mas apenas para os esforços axiais de tração e de compressão.

No caso específico do esforço de flexão, na verificação da asna mais condicionante, averiguar-se que para os Edifícios II e III não são cumpridos os requisitos do regulamento, mais concretamente em toda a perna. Note-se que para a estrutura completa esta verificação já é cumprida, neste caso pode referir-se a importância de analisar um modelo estrutural completo comparativamente com a análise apenas para a asna mais desfavorável da estrutura da cobertura.

Relativamente à encurvadura, na estrutura da asna mais desfavorável do Edifício II não existe qualquer problema, verificando o prescrito no Eurocódigo 5. No entanto quando se faz a mesma verificação na estrutura completa averiguar-se que, para os Edifícios II e IV, a perna não cumpre, apenas no troço do elemento de maior dimensão que se localiza junto ao apoio, claramente trata-se do elemento mais solicitado.

Para o Edifício IV a encurvadura não cumpre em ambos os modelos, isto é, no modelo da asna mais desfavorável e no modelo da estrutura completa. Certamente, devido ao excesso de carga transmitido pela madre excêntrica.

Em suma, pode concluir-se que de todos estes casos de estudo, os edifícios mais críticos são notoriamente os Edifícios II e IV, pois apresentam resultados não satisfatórios. Para avaliar melhor os resultados obtidos na encurvadura, procedeu-se de uma forma expedita à troca da classe de resistência, de C18 por C35. Para o Edifício II averiguou-se que ao subir a classe, a encurvadura passa a verificar, enquanto que para o Edifício IV a encurvadura continua a não verificar. No caso do Edifício II será necessário realizar uma inspeção mais detalhada de modo a avaliar a classe de resistência da madeira. No caso do Edifício IV será provavelmente necessário realizar uma inspeção mais detalhada que tenha em vista um estudo de reabilitação. Em ambos os casos é de todo o interesse analisar melhor a estrutura fazendo uma inspeção mais detalhada.

Relativamente aos estados limites de utilização analisaram-se as deformações para o curto e longo prazo. Dado que o regulamento recomenda um conjunto de valores limites inferior e superior para as flechas em função do nível de deformação considerado aceitável, nesta verificação consideraram-se ambos os valores limites.

Nas Tabelas 22 e 23, estão representadas as verificações do elemento linha para a asna mais desfavorável de cada edifício, e nas Tabelas 24 e 25 as verificações para a estrutura completa, particularmente no que diz respeito à linha e à madre mais desfavorável.

Tabela 22 - Resultados da verificação da flecha instantânea para a linha da asna mais desfavorável

Verificação	I	II	III	IV	V
L/300	0,4	0,6	0,4	11,3	6,0
L/500	0,2	0,4	0,2	6,8	3,6

Tabela 23 - Resultados da verificação da flecha a longo prazo para a linha da asna mais desfavorável

Verificação	I	II	III	IV	V
L/150	0,6	1,1	0,6	13,7	9,6
L/300	0,3	0,5	0,3	6,9	4,8

Tabela 24 - Resultados da verificação da flecha instantânea da estrutura completa

Verificação		I	II	III	IV	V
L/300	Linha	1,2	4,4	1,7	17,2	6,8
	Madre	4,4	1,2	1,3	2,3	1,7
L/500	Linha	0,7	2,7	1,0	10,3	4,1
	Madre	1,3	0,7	0,8	1,4	1,0

Tabela 25 - Resultados da verificação da flecha a longo prazo para a estrutura completa

Verificação		I	II	III	IV	V
L/150	Linha	2,5	8,9	2,6	46,7	11,8
	Madre	4,9	0,9	2,6	5,6	2,5
L/300	Linha	1,3	4,5	1,3	23,3	5,9
	Madre	2,4	0,5	1,3	2,8	1,2

Da análise das Tabelas 22, 23, 24 e 25 verifica-se mais uma vez a importância da análise tridimensional efetuada uma vez que os resultados são significativamente diferentes. Na Tabela 24 averigua-se que embora a segurança não seja verificada a curto prazo para a linha do Edifício I e para a madre dos Edifícios II e III, admite-se que as estruturas estão em segurança dado que o limite recomendado menos conservativo (L/300) para a flecha instantânea, considera a deformação do elemento aceitável.

É possível concluir que para o estado limite de utilização a segurança é verificada, com exceção da madre do Edifício II para a flecha a longo prazo (Tabela 25), que não verifica nem para o limite mais conservativo (L/300) nem para o limite menos conservativo (L/150). Esta deformação localiza-se entre as asnas mais carregadas da estrutura, na pendente de maior dimensão, uma vez que este edifício não é simétrico, consequentemente, esta área apresenta maior carga. Neste caso existe necessidade de realizar um reforço, para que a longo prazo a estrutura não esteja em risco de segurança.

Realizou-se também uma nova modelação para os edifícios onde se removeram todas as ripas. Este novo modelo foi realizado de forma a verificar a influência das ripas na rigidez do modelo e se consequentemente haveria uma grande discrepância entre os modelos. Deste modo, foi verificada a deformação e avaliada a sua influência, concluindo-se que os modelos com e sem ripas não apresentam diferenças significativas. No máximo houve um acréscimo de 9% e um decréscimo de 19%. Pode referir-se que apesar do seu peso as ripas incrementam rigidez na estrutura.

Para avaliar a influência dos apoios considerados (molas) nos resultados, foi também realizado outro modelo, onde se substituiu num dos lados o apoio mola pelo apoio simples. Desta análise pode concluir-se que não há influência significativa quando comparados os dois modelos.

A análise aos resultados permite verificar os diferentes comportamentos de tipos distintos de asnas, neste caso a asna de tesoura, a asna simples, a asna de alpendre e a asna composta. Foi observada a importância da conceção adequada da ligação linha-pendural, e a importância das escoras. A geometria da estrutura tem grande relevância na distribuição dos esforços, tal como os carregamentos centrados nos nós. Por outras palavras, para não se comprometer a segurança da estrutura é fundamental que as cargas sejam aplicadas nos nós, assim não haverá excentricidades das madres, e consequentemente os elementos não terão problemas de flexão. A distribuição dos esforços dependerá apenas da geometria da asna. A assimetria associada com o errado escoramento da estrutura da asna desenvolve problemas de flexão.

Comparando as tabelas relativas ao modelo da asna mais desfavorável com o modelo da estrutura completa, de todos os edifícios, conclui-se que é efetivamente importante realizar um modelo tridimensional para obter um efeito mais preciso da carga, pois é verdadeiramente notória a existência de diferenças entre os modelos.

Depois de analisadas as estruturas, sabendo que as mesmas foram realizadas há mais de cem anos pode dizer-se que as coberturas dos Edifícios I, III e V estão em conformidade com a análise realizada pelo Eurocódigo5. Pode dizer-se que estas estruturas passam a todos os critérios confortavelmente, no entanto importa realçar que dentro destes três edifícios, o Edifício V é aquele que além de verificar a segurança apresenta uma asna muito bem concebida associada a uma correta aplicação das madres nos nós.

Nos casos em estudo as principais preocupações são a encurvadura e a deformação. Relativamente à encurvadura esta verifica-se nas pernas dos Edifícios II e IV, particularmente no elemento que fica próximo ao apoio. Recorde-se que as pernas são o elemento mais carregado da estrutura da asna, sendo que a parte mais carregada da perna se localiza precisamente na zona do apoio, onde naturalmente a carga é transmitida. Para tentar perceber melhor os resultados insatisfatórios relativos à encurvadura procedeu-se a uma rápida avaliação dos modelos utilizando uma classe de resistência superior. Posto isto, foi possível concluir que no Edifício II a encurvadura passou a verificar, pelo que

seria pertinente realizar uma inspeção mais detalhada para averiguar a resistência da madeira e das ligações. Por outro lado, no Edifício IV continuou a não verificar, pelo que será à partida necessário intervir com um reforço estrutural, sendo para isso indispensável uma inspeção mais detalhada e respetivo projeto de reabilitação.

Contudo, em ambos os casos a reformulação da conceção estrutural, com a adição de escoras nas asnas, poderá ser eventualmente uma possível solução a considerar para resolver os problemas encontrados. No caso particular do Edifício II, no decorrer da avaliação da segurança foi possível perceber a existência de algumas deficiências de conceção, que originaram a colocação de alguns elementos de correção.

Quanto à deformação, foi verificado um valor excessivo na madre do Edifício II. Neste caso a substituição, escoramento ou reforço, são soluções a considerar para correção do problema.

Realça-se a importância de em ambos os casos ser fundamental efetuar a uma inspeção mais detalhada para obter mais dados de forma a realizar uma correta avaliação, recolhendo informação mais concreta acerca da classe de resistência da madeira e segurança das ligações e proceder à definição das soluções de reabilitação a aplicar nestes casos específicos.

6 CONCLUSOES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No presente trabalho pretendeu-se avaliar a segurança estrutural das coberturas de madeira dos edifícios do Centro Histórico de Leiria. O estudo centrou-se no comportamento estrutural de cinco edifícios distintos, cada qual, com diferentes características geométricas.

Como primeira conclusão pode afirmar-se que as coberturas dos Edifícios I, III e V estão em conformidade com a análise realizada pelo Eurocódigo 5. Pode afirmar-se que estas estruturas passam em todos os critérios confortavelmente, no entanto importa realçar que dentro destes três edifícios, o Edifício V é aquele que além de verificar a segurança apresenta uma estrutura muito bem concebida associada a uma correta aplicação das madres nos nós. Em contrapartida os Edifícios II e IV são os edifícios que oferecem mais preocupações por não satisfazerem os requisitos exigidos pelo referido regulamento, nomeadamente no que diz respeito à encurvadura.

O Edifício I, tem a particularidade de ser composto por um tipo de asna que não é muito vulgar, a asna de tesoura. Este tipo de asna exhibe uma geometria característica, com um funcionamento diferente comparativamente com a asna simples.

O Edifício II, apresenta como principal elemento uma asna de alpendre, diferenciada da asna simples pela presença de um nível situado a meia altura das pernas, neste caso trata-se de uma asna com a linha fixa ao pendural, permitindo deste modo reduzir as deformações da linha. Este edifício é assimétrico e por consequência a asna principal também é assimétrica, facto que levanta alguns problemas estruturais, nomeadamente no que diz respeito à distribuição dos esforços.

O Edifício III, tal como o edifício anterior, também é composto por asna de alpendre com nível. Contrariamente à asna anterior, possui desconexão entre o pendural e a linha.

O Edifício IV é composto pela típica asna vulgar ou simples, perfeitamente triangular. Neste caso, a presença de excentricidade das madres relativamente aos nós da asna que provoca um mau funcionamento da estrutura causando encurvadura na zona das pernas.

O Edifício V representa um exemplo de boa prática do funcionamento de uma cobertura. A cobertura é constituída por asnas compostas, com vários escoramentos, tanto quantos

são necessários para o correto apoio das madres, proporcionando um excelente funcionamento das asnas sem provocar deformações excessivas.

A excentricidade das madres relativamente aos nós da asna é claramente um problema dos Edifícios II, III e IV, porque provoca alteração na distribuição dos esforços nas pernas. Nos Edifícios II e IV esta incorreta conceção compromete a estrutura havendo problemas na verificação à encurvadura nas pernas.

O outro aspeto preocupante, nestes casos de estudo é a deformação excessiva da madre do Edifício II, provocada pela assimetria da estrutura e pela má conceção da estrutura da asna.

Identificados os pontos críticos, é de extrema importância realizar uma inspeção mais detalhada com uma análise mais cuidada, por forma a perceber melhor o funcionamento das estruturas e poder apresentar soluções que sejam efetivamente eficientes e solucionem o problema.

Com a elaboração desta dissertação pretendeu-se realizar uma avaliação da segurança estrutural de algumas coberturas pertencentes ao Centro Histórico de Leiria, deixando, no entanto, alguns pontos por analisar e que devem ser alvo de aprofundamento. Como complemento ao trabalho realizado sugere-se para trabalhos futuros o seguinte:

- Realizar um estudo de reabilitação dos edifícios do Centro Histórico de Leiria. Este assunto tem especial interesse na recuperação de construções antigas, nas quais as intervenções deverão respeitar a natureza e a conceção original da obra.
- Estudar as ligações neste tipo de estrutura e verificar como é feita a distribuição de esforços, assim, como a influência que pode ter este tipo de ligação na transmissão de esforços aos elementos que a constituem.
- Executada a verificação global da cobertura, poderia ser interessante estudar a vulnerabilidade sísmica das coberturas analisadas, ou seja, analisar o comportamento das estruturas da cobertura de madeira dos cinco edifícios sob a ação do sismo.

Referências

Almeida, F. (2012). A Madeira Como Material Estrutural – Projeto Da Estrutura De um Edifício, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Barbas, R. (2015). Reabilitação de Coberturas Antiga, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Bastos, J. (2011) Asnas Tradicionais de Madeira: Caracterização e Reforço, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Branco, J. (2008). Influence of the joints stiffness in the monotonic and cyclic behaviour of traditional timber trusses. Assesment of the efficaccy of different strengthening techniques, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães.

Branco, J., Cruz, P. e Piazza, M. (2006). Asnas de madeira: A importância da rigidez das ligações, 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, LENC: Lisboa.

Branco, J. e Lourenço, P. (2014). Coberturas tradicionais de madeira: caracterização, inspeção e classificação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães.

Branco, J., Santos, A. e Cruz, P. (2008). Asnas Tradicionais de Madeira: Evolução, Comportamento e Reforço com Materiais Compósitos, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, 1-13.

Branco, J., Varum, H. e Piazza, M. (2005). Portuguese traditional timbers trusses: static and dynamic behaviour. Universidade do Minho. Guimarães

Brites, R. (2011). Avaliação de Segurança das Estruturas Antigas de Madeira, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

C.M.L. Enquadramento histórico. Disponível em: <https://www.cm-leiria.pt/pages/405>.

Cerejo, T. (2012). Utilização de Imagens Multiespectrais na Avaliação do Estado de Conservação das Coberturas do Centro Histórico de Leiria, Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria.

Coelho, J. (1999). Leiria entre 1920 e 1940 - Sociedade e vida quotidiana. Leiria: Edições Magno.

Costa, F. (1955) Enciclopédia prática da Construção Civil. Asnas de Madeira. Lisboa: Portugália Editora.

Coignet, J. e Coignet, L. (2005). La maison ancienne: construction, diagnostic, interventions. Paris: Eyrolles.

Cruz, H., J. S. Machado, M. Rodrigues e G. Monteiro (1997). Madeira para construção - M2 - Pinho bravo para estruturas. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Cunha, J. (2013). Diagnóstico e Avaliação da Segurança de Estruturas de Madeira Existentes, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

EC1 (2009). Ações em estruturas. Parte 1-1: Ações gerais. Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios. NP EN 1991-1-1. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

EC5 (2007). Projeto de Estruturas de Madeira. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifícios. NP EN 1995-1-1. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

EN 338 (2009). Structural timber - Strength classes. CEN

Farinha, J. e Reis, A. (1993). Tabelas Técnicas. Setúbal: Edição P.O.B

Fernandes, V. (2014). Verificação da segurança da cobertura de um edifício histórico, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Gomes, I. (2015). Diagnóstico e ensaio de carga de asnas tradicionais de madeira, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

Gomes, T. (2016). Caracterização do Parque Edificado do Centro Histórico de Leiria, Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria.

Hilário, R. (2013). Dimensionamento de Estruturas em Madeira: Metodologia e disposições regulamentares relativamente a ligações, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

Israel, R. (2017). Inspeção e caracterização das coberturas com estrutura de madeira do centro histórico de Leiria, Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Leiria.

Jacinto, R. (2009). As Cheias na Cidade de Leiria: Contributo dos SIG para o Ordenamento do Território, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.

Logsdon, N. (2002). Estruturas de Madeira para Coberturas, sob a ótica da NBR 7190/1997, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá.

Lopes, M. (2007). Tipificação De Soluções De Reabilitação De Estruturas De Madeira Em Coberturas De Edifícios, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Lourenço, P. e Branco, J. (2012). Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães.

Macedo, A. (2012). Avaliação da Sustentabilidade de Soluções de Reabilitação para a Envolvente Exterior de Edifícios de Habitação, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.

Margarido, A. (1988). Leiria História e Morfologia Urbana. Leiria: Câmara Municipal de Leiria.

Mendes, P. (1994). Ligações em estruturas de madeira - Tecnologia e dimensionamento de acordo com o EC5. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Moreira, M. (2009). Reabilitação de Estruturas de Madeira em Edifícios antigos. Estudo de Caso, Relatório de Projeto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Negrão, J. e Faria, A. (2009). Projeto de Estruturas de Madeira. Porto: Publindústria.

NP 4305. (1995). Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

Pérez, L. (2003). Design and construction of timber roof structures , built over different structural systems . Cases studies at the Valencia Community, Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid

Roseiro, J. (2012) Causas anomalias e soluções de reabilitação estrutural de edifícios antigos: estudo de caso, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

RSA (1983). Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes. Dec. – Lei n.º 235/83, Casa da Moeda, 31 de Maio.

Santos, J. (2008). Leiria - Cidade sonhada. Leiria: Notícias das Colmeias.

Santos, V. (2009). Avaliação do comportamento de asnas antigas de madeira de grande vão, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Silva, B. e Guedes, J (2008). Estratégias de Modelação Numérica no Estudo de Estruturas Históricas. Experiência do NCREP (FEUP), Núcleo de Conservação e Reabilitação de Edifícios e Património da Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto.

Silva, S. (2010) Leiria, Cidade Do (Po) Lis - Análise da estratégia de revitalização da frente de água, Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Coimbra.

Soares, S. (2014). Análise de ligações em asnas de madeira, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Sousa, A. e Abrantes, V. (1998). Manual de Aplicação de Telhas Cerâmicas. Manual de Aplicação de Telhas Cerâmicas, Associação Portuguesa dos Industriais da Cerâmica de Construções, Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, Coimbra.

Sousa, H., Branco, J. e Lourenço, P. (2014). Da inspeção à avaliação de segurança na reabilitação de estruturas de madeira, Seminário Intervir em construções existentes de madeira, Guimarães.