



Isabel Manuela Dias Gomes **Diagnóstico e ensaio de carga de asnas tradicionais de madeira**

Novembro | 2015

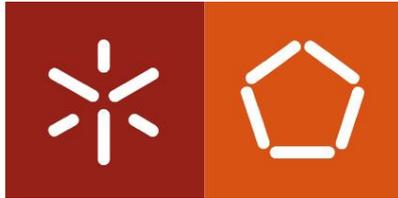


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Isabel Manuela Dias Gomes

**Diagnóstico e ensaio de carga de asnas
tradicionais de madeira**

Novembro de 2015



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Isabel Manuela Dias Gomes

**Diagnóstico e ensaio de carga de asnas
tradicionais de madeira**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Doutor Jorge Manuel Branco

Novembro de 2015

DECLARAÇÃO

Nome: Isabel Manuela Dias Gomes

Título dissertação: Diagnóstico e ensaio de carga de asnas tradicionais de madeira

Orientador: Doutor Jorge Manuel Branco

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, Novembro/2015

Assinatura: _____

Agradecimentos

Com a conclusão deste trabalho, desejo expressar o meu profundo agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a sua realização.

O meu sincero agradecimento ao meu orientador Professor Doutor Jorge Branco pela incansável dedicação, disponibilidade e motivação. Muito obrigada pelo precioso apoio, partilha de ensinamentos e experiência, essenciais para a execução deste trabalho.

Expresso também a minha gratidão ao Doutor Hélder Sousa por todo o apoio, conselhos, partilha de conhecimentos e disponibilidade que sempre dedicou.

Agradeço a colaboração dos técnicos do Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil, em particular ao Engenheiro Marco e ao Sr. Matos, cuja ajuda, experiência e conselhos foram fundamentais para a execução dos ensaios.

À AOF – Augusto de Oliveira Ferreira & Ca Lda. pela disponibilidade demonstrada no transporte dos elementos e execução dos trabalhos de carpintaria.

Aos meus amigos que me acompanharam durante estes anos e me incentivaram. Em especial à Joana, ao Luís e ao Jorge pela amizade, lealdade, apoio e disponibilidade sempre demonstrados. À Margarida pelo apoio e boa disposição nas nossas longas horas de estudo.

Agradeço à Laura por ser a minha maior e melhor amiga. Muito obrigada por estares sempre presente, pela força, dedicação, paciência e essencialmente, por acreditares sempre em mim.

Agradeço à minha irmã Rita, Marco, Tio Jerónimo, Celina, Nelson, Ana, Quitéria, Carla, Joel, Matilde, Tia Rita e Tio Carias pelo sentido de união familiar, incentivo e paciência.

À Tita, a melhor pessoa do mundo, o meu porto seguro nos bons e maus momentos, minha fonte de encorajamento e otimismo. Muito obrigada por tudo, pelos seus preciosos conselhos e pela sempre palavra doce e assertiva. Sou uma felizarda por ser sua sobrinha.

A minha gratidão aos meus pais que sempre estiveram presentes, me encorajaram e me encaminharam para ser a pessoa que sou hoje. Sem vocês este momento não seria possível.

Por fim, um agradecimento especial à Mariana, minha afilhada e minha sobrinha, minha força, minha fonte de inspiração e meu amor incondicional.

A todos o meu mais profundo e sentido obrigado. Este trabalho também vos pertence.

Resumo

Nas últimas décadas tem-se assistido a um crescente interesse e consciencialização por parte da sociedade para a necessidade da reabilitação e da preservação das estruturas existentes de madeira. Neste contexto, é fundamental desenvolver metodologias capazes de aferir o nível de segurança das estruturas existentes de madeira, de forma a suportar tecnicamente as intervenções no património construído em madeira.

O presente trabalho tem como principal objetivo evidenciar a importância da fase de inspeção e diagnóstico na avaliação de estruturas de madeira existentes através de classificação visual e ensaios não-destrutivos (NDT). Para isso, duas asnas de madeira foram inspecionadas, avaliadas e testadas à escala real até à sua rotura. Estas asnas faziam parte de uma cobertura antiga do Laboratório Chimico, Coimbra, que com mais de cem anos de idade, foi substituída por uma nova, tendo algumas das suas asnas sido transportadas para o Laboratório do DECivil da Universidade do Minho.

A primeira parte deste trabalho apresenta todo o processo implementado para a classificação visual dos elementos das asnas bem como a realização de NDT. Nesta fase, todos os elementos das asnas foram inspecionados visualmente em segmentos de 40 cm, tendo em consideração as características geométricas (secção transversal exterior, descaio e deformação), defeitos (fendas, nós e inclinação do fio) e secções críticas. A fim de caracterizar o nível de conservação dos elementos, foram aplicadas técnicas não destrutivas, tais como ensaios de penetração por impacto, resistência à perfuração e ultrassons. A combinação dos resultados de todos os NDT permitiu uma avaliação mais fundamentada dos segmentos e, por conseguinte, dos elementos. Os resultados são apresentados através de mapas de danos indicando as principais patologias da estrutura e a sua secção transversal residual, bem como as correlações entre diferentes NDT.

Na segunda parte deste trabalho, e tendo em conta as análises realizadas para as duas asnas, efetua-se uma análise comparativa utilizando os resultados obtidos na inspeção visual, nos NDT e no desempenho observado durante os ensaios de carga à escala real. Desta forma, procuram-se correlações que permitam através da inspeção, neste caso materializada através da classificação visual e de NDTs, prever com alguma fiabilidade o comportamento global de asnas tradicionais, aqui analisado através dos ensaios de carga à escala real.

Palavras-Chave: Asna tradicional de madeira; inspeção visual; classificação visual; ensaios não-destrutivos; ensaio de carga.

Abstract

In recent decades there has been a growing interest and awareness by society for the rehabilitation and preservation of existing timber structures. In this context, it is essential to develop methodologies able to assess the safety level of existing timber structures in order to technically support interventions in the wood built heritage.

This work aims to highlight the importance of the phase of inspection in the evaluation of existing timber structures by visual classification and non-destructive testing (NDT). To this end, two wooden trusses were inspected, evaluated and tested at full scale until they ruptured. These trusses were part of an old coverage of the Laboratory Museum, Coimbra, which is over a hundred years old, and has been replaced by a new one. Some of its trusses have been transported to the Laboratory of Department of Engineering of the University of Minho.

The first part of this work presents the visual grading process complete with NDT. At this stage, all elements of the trusses were visually inspected into segments of 40 cm, taking into account the geometric characteristics (outer cross section, wane and deformation), defects (cracks, knots and slope of the wire) and critical sections. In order to characterize the level of conservation of their elements non-destructive techniques have been applied, such as impact by penetration tests, perforation resistance, and ultrasound. Combining the results of all NDT allows a more informed assessment of the segments and therefore of the elements. The results are presented through damage maps indicating the main pathologies of the structure and its residual cross-section as well as the correlations between different NDT.

In the second part of this study, and taking into account the analyses of the two trusses, a comparative analysis is performed using the results of the visual inspection, in NDT and in the performance observed during load testing at full scale. Thus, seeking correlations that allow through inspection, in this case embodied by visual classification and NTDS, to predict with sufficient reliability the overall behavior of traditional trusses, here analyzed through the load tests to full scale.

Keywords: Traditional wood truss; visual inspection; visual classification; non-destructive testing; test load.

Índice

Agradecimentos.....	7
Resumo.....	9
Abstract.....	10
Índice.....	11
Simbologia.....	15
Índice de Tabelas.....	17
Índice de Figuras.....	19
Capítulo 1 - Introdução.....	23
1.1. Objetivos.....	25
1.2. Organização da dissertação.....	25
Capítulo 2 – Asnas Tradicionais de Madeira.....	27
2.1. Evolução histórica do sistema de asnas de madeira.....	27
2.2. Geometrias comuns das asnas de madeira.....	30
2.2.1. Asna simples.....	31
2.2.2. Asna composta.....	34
2.2.3. Asna de tesoura.....	34
2.2.4. Asna de mansarda.....	35
2.2.5. Asna com lanternim.....	35
2.2.6. Asna de alpendre.....	35
2.2.7. Asna de nível.....	36
2.2.8. Asna de tipo fabril.....	36
2.3. Análise do comportamento estrutural das asnas simples.....	36
2.3.1. Ligações.....	37
2.4. Anomalias mais comuns na madeira.....	42
2.4.1. Patologias provocadas por agentes bióticos.....	44
2.4.2. Patologias provocadas por agentes abióticos.....	48

2.4.3. Anomalias estruturais	50
2.5. Métodos de reforço estrutural de coberturas de madeira.....	51
2.6. Conclusões.....	54
Capítulo 3 – Intervenção em Coberturas de Madeira Existentes.....	55
3.1. Inspeção e diagnóstico.....	55
3.1.1. Metodologias para a avaliação de segurança em estruturas existentes	59
3.1.2. Inspeção visual	62
3.1.3. Classificação visual	65
3.2. Ensaio não-destrutivos	68
3.2.1. Resistência à penetração por impacto - Pilodyn	68
3.2.2. Resistência à perfuração controlada	70
3.2.3. Ultrassons	72
3.3. Conclusões.....	73
Capítulo 4 – Inspeção e Diagnóstico de Duas Asnas	75
4.1. Inspeção visual	76
4.1.1. Aspectos Gerais.....	76
4.1.2. Caracterização geométrica	77
4.1.3. Medição dos Nós	78
4.1.4. Medição da inclinação do fio.....	80
4.1.5. Inspeção visual Asna 1	81
4.1.6. Inspeção visual Asna 2	85
4.1.7. Comparação da Inspeção Visual da Asna 1 e Asna 2	88
4.1.8. Mapeamento de Fendas	90
4.2. Ensaio não-destrutivos	92
4.2.1. Ensaio de resistência à penetração por impacto	92
4.2.2. Resistência à perfuração controlada	100
4.2.3. Ultrassons	107

4.3. Ensaio à flexão simples.....	111
4.4. Correlações	113
4.5. Conclusões.....	121
Capítulo 5 – Ensaio de Carga	123
5.1. Reconstrução das asnas	124
5.1.1. Ligações das asnas.....	125
5.2. Ensaio e instrumentação	129
5.3. Metodologia do procedimento laboratorial	131
5.4. Análise de resultados	132
5.4.1. Asna 2.....	133
5.4.2. Asna 1	142
5.5. Análise comparativa das asnas	142
5.6. Conclusões.....	143
Capítulo 6	145
6.1. Desenvolvimentos futuros	149
Referências Bibliográficas.....	151
Anexo 1 – Inspeção Visual.....	160
Anexo 2 – Ensaio de penetração por impacto	193
Anexo 3 – Ensaio de Ultrassons	202
Anexo 4 – Geometria das asnas.....	214

Simbologia

Letras maiúsculas latinas

A	Área
A_d	Razão entre os diâmetros menores do nó
CoV	Coefficiente de Variação
D	Diâmetro maior do nó
$E_{m,l}$	Valor do módulo de elasticidade local
$E_{m,g}$	Valor do módulo de elasticidade global
G_v	Módulo de corte
I	Inércia
MoE	Módulo de elasticidade à flexão
MR	Medida resistográfica
W_d	Razão entre os diâmetros menores do nó

Letras minúsculas latinas

a	Distância entre os pontos de aplicação da carga e o apoio
b	Largura da secção transversal
d	Diâmetro menor do nó
d_0	Comprimento de percurso da onda
h	Altura
l	Vão em flexão
l_1	Comprimento do dispositivo para determinação de $E_{m,l}$
t	Tempo
v_p	Velocidade de propagação da onda

Letras maiúsculas gregas

ΔF	Incremento de força no regime elástico
Δw	Incremento de deslocamento vertical

Siglas

DT	Ensaio destrutivo
GTM	Métodos de ensaio globais
LEST	Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil
LTM	Métodos de ensaio locais
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear
NDT	Ensaio não-destrutivo
NC	Não-Classificável
SDT	Ensaio semi-destrutivo

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Agentes de degradação da madeira, patologias e consequências inerentes	44
Tabela 3.1 – Métodos de ensaio para avaliação da madeira.....	58
Tabela 3.2 – Ferramentas utilizadas na inspeção visual.....	63
Tabela 3.3 - Limites impostos pela UNI 11119:2004 para classificação de elementos de madeira existentes.....	66
Tabela 3.4- Caracterização mecânica de coníferas do género <i>Pinus</i> (várias espécies) atendendo à aplicação da norma UNI 11119:2004.....	67
Tabela 4.1 – Resultados do valor médio e do coeficiente de variação (CoV) da geometria nos elementos constituintes da Asna 1	83
Tabela 4.2 - Resultados do valor médio e do coeficiente de variação (CoV) da geometria nos elementos constituintes da Asna 2	86
Tabela 4.3 – Resultados da classificação visual de acordo com a norma UNI 11119	88
Tabela 4.4 – Fenda com maior dimensão por elemento	91
Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de penetração por impacto na Perna Norte	96
Tabela 4.6 – Resultados do coeficiente de variação dos elementos constituintes da Asna 1	97
Tabela 4.7 – Resultados do valor médio e do coeficiente de variação do ensaio à resistência de penetração por impacto nos elementos ensaiados à flexão.....	118
Tabela 4.8 - Resultados do valor médio e do coeficiente de variação da perda de secção dos elementos ensaiados à flexão.....	118
Tabela 4.9 – Valor do módulo de elasticidade para as diferentes classes	119
Tabela 4.10 – Módulo de elasticidade dos elementos das asnas	120

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Asna sobre o nível do solo no estaleiro da obra	24
Figura 2.1 – Asna de madeira do Mosteiro de Santa Catarina no Monte Sinai.....	28
Figura 2.2 - Diferentes tipos de asnas consoante a geografia.....	29
Figura 2.3 – Organização de uma cobertura tradicional de madeira	30
Figura 2.4 – Tipologias mais frequentes de asnas de madeira em Portugal.....	31
Figura 2.5 – Variantes da geometria da asna simplesor linha e pernas	32
Figura 2.6 – Asna de Palladio reforçada com elementos metálicos	33
Figura 2.7 – Asna simples com linha alta.....	33
Figura 2.8 – Geometria de asna composta.....	34
Figura 2.9 – Ligações tradicionais de entalhe	39
Figura 2.10 – Ligações tradicionais de uma asna de madeira usando respiga e mecha	40
Figura 2.11 – Ligadores metálicos	41
Figura 2.12 - Elementos metálicos auxiliares para a execução das ligações.....	42
Figura 2.13 – Anomalias por degradação biológica	45
Figura 2.14 - Madeira atacada por caruncho grande, larva e inseto adulto.....	46
Figura 2.15 – Anomalias estruturais.....	51
Figura 2.16 - Reforço estrutural pelo método tradicional	52
Figura 2.17 - Recuperação estrutural de ligações de asnas pelo método mecânico	52
Figura 2.18 - Reconstituição da ligação, pelo método adesivo, através de varões compósitos e injeções com resina epoxídica	52
Figura 3.1 – Relação entre técnica de avaliação e nível esperado de informações	58
Figura 3.2 – Fases requeridas para a avaliação e planeamento de intervenções em estruturas históricas em madeira.	60
Figura 4.1 – Designação dos elementos constituintes da asna	76
Figura 4.2 – Exemplo da caracterização geométrica em duas secções consecutivas.....	78

Figura 4.3 – Exemplo da medição de diferentes nós.....	80
Figura 4.4 – Exemplo da medição da inclinação do fio	81
Figura 4.5 – Processo de uniformização dos apoios.....	82
Figura 4.6 – Resultados da classificação visual da Asna 1 de acordo com a UNI 11119... 85	
Figura 4.7 - Resultados da classificação visual da Asna 2 de acordo com a UNI 11119: 2004	87
Figura 4.8 – Distribuição percentual dos elementos em cada classe de classificação visual de acordo com a UNI 11119:2004	89
Figura 4.9 – Distribuição percentual dos defeitos nas duas asnas.....	90
Figura 4.10 - Pilodyn.....	93
Figura 4.11 – Esquema representativo do ensaio de resistência à penetração por impacto 94	
Figura 4.12 – Malha das medições efetuadas no ensaio de penetração por impacto em dois segmentos consecutivos.....	94
Figura 4.13 - Mapa do ensaio à resistência de penetração por impacto para a Asna 1 - Face frontal	98
Figura 4.14 - Mapa do ensaio à resistência de penetração por impacto para a Asna 1 - Face posterior.....	98
Figura 4.15 - Mapa do ensaio à resistência de penetração por impacto para a Asna 1 - Face superior.....	98
Figura 4.16 - Mapa do ensaio à resistência de penetração por impacto para a Asna 1 - Face inferior	98
Figura 4.17 – Exemplos do efeito da presença de <i>Hylotrupes bajulus</i> nos elementos da Asna 1	100
Figura 4.18 – Detetor de metais.....	101
Figura 4.19 – Resistógrafo	102
Figura 4.20 – Esquema representativo do ensaio de resistência à perfuração controlada. 103	
Figura 4.21 – Esquema das medições efetuadas no ensaio de perfuração controlada em dois segmentos consecutivos.....	103

Figura 4.22 – Exemplo de perfil de resistência à perfuração numa secção não deteriorada	104
Figura 4.23 – Exemplo de perfil de resistência à perfuração numa secção deteriorada....	105
Figura 4.24 – Resultados do ensaio de resistência à perfuração	106
Figura 4.25 – Ultrassons.....	108
Figura 4.26 – Esquema representativo de aplicação do ensaio de ultrassons – método indireto	109
Figura 4.27 – Resultados do ensaio ultrassons para a Asna 1	110
Figura 4.28 – Esquema de ensaio de flexão estática adotado de acordo com a EN 408:2003	112
Figura 4.29 - Resultados da classificação visual de acordo com a UNI 11119:2004.....	114
Figura 4.30 - Mapas do ensaio à resistência de penetração por impacto nas diferentes faces dos elementos	116
Figura 4.31 - Mapa de danos com percentagem de perda de secção eficaz para os elementos	117
Figura 4.32 - Mapa de danos com percentagem de perda de secção eficaz para a Asna 2	119
Figura 4.33 – Processo para atribuição do módulo de elasticidade aos elementos das asnas	120
Figura 5.1 - Asnas.....	124
Figura 5.2 – Pré-montagem Asna 1	125
Figura 5.3 – Exemplos de ligações por entalhes	126
Figura 5.4 – Exemplos de ligações por entalhes reforçadas com braçadeira	126
Figura 5.5 – Exemplos de ligações por entalhe reforçadas por um esquadro metálico.....	127
Figura 5.6 – Exemplo de ligações por entalhe reforçadas com parafusos – pormenor de aplicação	127
Figura 5.7 – Calço de madeira para aplicação da carga	128
Figura 5.8 – Processo de intervenção dos apoios executada pelo carpinteiro.....	128
Figura 5.9 – Aspeto final das asnas montadas.....	129

Figura 5.10 – Esquematização do ensaio realizado em laboratório	130
Figura 5.11 – Esquema com a disposição dos LVDT's na realização dos ensaios	131
Figura 5.12 – Realização do ensaio de carga na estrutura original da Asna 2	132
Figura 5.13 – Tipo de apoio ensaiado	133
Figura 5.14 – Curvas força-deslocamento obtidas no Apoio Sul para os tipos de apoio considerados	134
Figura 5.15 – Identificação de fenda anelar segundo a norma UNI 11035-1:2003.....	134
Figura 5.16 – Rotura local do apoio simples a Sul da asna	135
Figura 5.17 – Curvas força-deslocamento obtidas no Apoio Norte para os tipos de apoio considerados	136
Figura 5.18 - Curvas força-deslocamento obtidas na linha, a Sul (LVDT 10) e a Norte (LVDT 5) para os tipos de apoio considerados	137
Figura 5.19 – Curvas força-deslocamento obtidas na ligação Perna - Linha para os tipos de apoio considerados	137
Figura 5.20 - Curvas força-deslocamento obtidas na ligação Pernas - Pendural para os tipos de apoio considerados, na direção horizontal.....	138
Figura 5.21 – Deformada da Asna 2 com apoios simples	139
Figura 5.22 - Deformada da Asna 2 com apoios duplos	139
Figura 5.23 – Distorção da Perna Sul	140
Figura 5.24 – Rotura Asna 2 em apoio simples.....	140
Figura 5.25 – Classificação visual da Asna 2 com detalhes das roturas das pernas e da ligação Pendural - Pernas	141
Figura 5.26 – Classificação visual da Asna 1 com detalhes das roturas das pernas e da ligação Diagonal - Perna	142
Figura 5.27 – Resultados do ensaio de carga à escala real das asnas	143
Figura 6.1 – Aplicação das cargas com excentricidade em relação aos nós	147

Capítulo 1

Introdução

A madeira foi desde sempre um material muito utilizado na construção, nomeadamente em construções com elevado valor histórico e patrimonial. A preservação de edifícios históricos, bem como, a conservação das estruturas de madeira assumem grande importância hoje em dia.

A aplicação da madeira destaca-se principalmente na materialização de coberturas tradicionais que integram na sua estrutura principal asnas. Existem diversas configurações de asnas que se afiguram da forma mais simples às mais complexas. A manutenção inadequada destas estruturas, muitas vezes, deve-se ao facto de se encontrarem atrás de abóbadas ou outras sub-estruturas de telhado interior ou devido à sua inacessibilidade.

Sendo a madeira um material natural, durante o seu ciclo de vida é submetida a degradação biológica associada às condições ambientais envolventes. Esta situação, aliada a más práticas de manutenção ou inexistência das mesmas, origina muitas vezes estruturas gravemente deterioradas ou danificadas e que, inevitavelmente, devem ser reparadas ou até mesmo substituídas.

Assim, a avaliação da capacidade estrutural de estruturas de madeira existentes e da correspondente capacidade de carga, são essenciais para determinar a necessidade e o nível

de possíveis ações de intervenção. Relativamente ao património e outras estruturas relevantes, esta informação deve ser obtida através de métodos que não danifiquem os elementos. A inspeção visual complementada por técnicas não-destrutivas (NDT) devem ser consideradas na medida em que são pouco invasivas. Os ensaios não-destrutivos realizados habitualmente são os ensaios de penetração por impacto, resistência à perfuração controlada e ensaios de ultrassom.

O Laboratório Chimico é um edifício neoclássico português construído entre 1973 e 1977. A ala 1 desse edifício é composta por uma cobertura em madeira de três águas com quatro asnas com 14,20 m de vão livre. Em 2005, a Universidade de Coimbra requalificou um dos seus edifícios significativos, instalando o Museu da Ciência. Aquando a construção do Museu da Ciência realizou-se a inspeção das asnas pertencentes à cobertura, tendo sido considerado necessário proceder à sua substituição. As asnas retiradas, do novo Museu da Ciência, foram armazenadas na Universidade de Aveiro, e posteriormente transportadas para o Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho com o intuito de se proceder à investigação no âmbito das madeiras.

Na Figura 1.1 apresenta-se uma das asnas em estudo, a espécie de madeira empregue é Pinho de Riga. Destaca-se que a asna sofreu alterações no passado, com a colocação de peças de reforço na parte inferior, provavelmente devido a anomalias ou insuficiência da estrutura existente.



Figura 1.1 - Asna sobre o nível do solo no estaleiro da obra

Desta forma, o objetivo principal da dissertação visa a inspeção, diagnóstico e a avaliação da capacidade de carga de duas asnas tradicionais de madeira recuperadas das obras de reabilitação dos antigos Laboratórios Chimico.

A caracterização das asnas tradicionais de madeira inicia-se com a inspeção visual dos elementos, complementada por ensaios não-destrutivos. Posteriormente procede-se ao ensaio de carga que se enquadrou na Training School da FP1101, em Maio de 2015 na Universidade do Minho. Desta forma, pretende-se obter correlações dos resultados da inspeção visual com os ensaios não-destrutivos e destrutivos realizados, por forma a validar os resultados obtidos através da inspeção visual.

1.1. Objetivos

Com a elaboração da dissertação estabelecem-se os seguintes objetivos gerais:

- Adquirir conhecimento relativamente às estruturas existentes de madeira, com especial foco na inspeção e classificação dos seus elementos constituintes;
- Prever o comportamento global de asnas tradicionais de madeira, tendo por base as informações recolhidas por inspeção visual e ensaios não destrutivos;
- Avaliar o comportamento de asnas tradicionais de madeira através de ensaio de carga à escala real executado em laboratório.

1.2. Organização da dissertação

No âmbito da inspeção e diagnóstico de asnas tradicionais de madeira, é de extrema importância fornecer métodos e ferramentas para avaliar o nível de segurança de estruturas de madeira existentes. De notar que, a madeira é um material bastante complexo e as suas propriedades mecânicas apresentam grande variação dentro e entre os elementos da mesma estrutura.

O presente trabalho propõe estabelecer uma metodologia para a avaliação da segurança estrutural de estruturas existentes de madeira.

A atual dissertação é composta por seis capítulos. O capítulo introdutório explica sucintamente o tema da investigação e o seu âmbito de aplicação e os objetivos do presente trabalho. No capítulo dois e três estabelece-se a revisão da literatura. No capítulo dois institui o enquadramento e contextualização do objeto de estudo, no âmbito das asnas tradicionais

de madeira. O capítulo três, intervenção em coberturas de madeira existentes, específica a metodologia e os parâmetros a avaliar na inspeção e classificação visual, assim como os princípios de utilização e funcionamento dos ensaios não-destrutivos. O capítulo quatro resume-se à análise dos resultados obtidos da Inspeção e diagnóstico de duas asnas. No capítulo cinco verifica-se igualmente análise dos resultados, porém relativas aos ensaios de carga. Por último, no capítulo seis estabelecem-se as considerações finais e os desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Asnas Tradicionais de Madeira

As coberturas tradicionais de madeira, quer sejam de uma, duas ou mais águas, possuem na sua estrutura principal asnas. A asna representa a estrutura de madeira mais tradicional, com uma extraordinária importância no progresso da construção. As asnas são uma espécie de vigas armadas em forma triangular, constituídas por várias peças de madeira.

Numa primeira fase expõe-se asnas com diferentes configurações geométricas e as diversas ligações existentes nestas estruturas. Segue-se uma síntese das anomalias mais comuns na madeira e um resumo dos principais métodos de reforço estrutural de coberturas de madeira.

2.1. Evolução histórica do sistema de asnas de madeira

As primeiras asnas de madeira foram usadas pelos homens primitivos como proteção contra os agentes atmosféricos e, desde então, a sua presença na arquitetura é permanente.

A configuração estrutural da asna de madeira baseia-se em técnicas romanas do século IV, desenvolvida para coberturas de igrejas cristãs. Acredita-se que o exemplo mais antigo de asnas de madeira é do tipo asnas simples, e encontra-se localizado no Mosteiro de Santa Catarina no Monte Sinai, construído pelo arquiteto Ayla Stephen, no século VI. Estas asnas

são constituídas por um elemento horizontal (a linha), por duas pernas inclinadas para a formação das vertentes do telhado, por um elemento vertical ligado ao vértice do telhado e às pernas (o pendural), todos com a mesma secção transversal e por duas escoras inclinadas que ligam as pernas ao pendural com secção transversal menor, Figura 2.1.

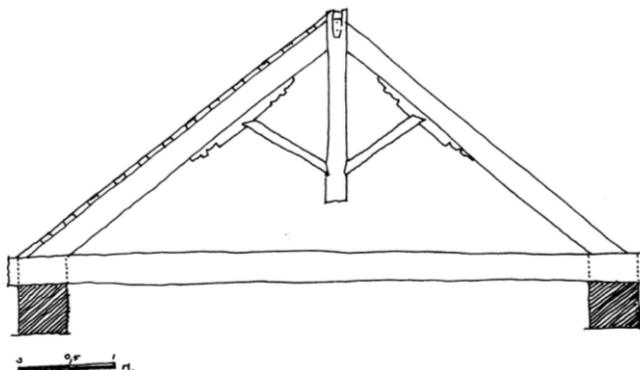


Figura 2.1 – Asna de madeira do Mosteiro de Santa Catarina no Monte Sinai (Tampone, 1996a)

No início do século XV, período Renascentista, Mariano di Jacopo apresentou várias configurações de asnas. Entre elas verificaram-se a configuração da asna simples, configurações sem a presença do elemento Linha na asna e configurações mistas em que se conjugavam elementos em madeira e elementos metálicos (Branco, 2008).

Em meados do século XVI, Giovan Battista Da Sangallo projetou asnas compostas por 3 elementos verticais (Pendurais) em que nenhum destes elementos detinha contacto direto com o elemento Linha. Pelo contrário, Andrea Palladio desenhou várias configurações com a particularidade de o elemento Pendural se encontrar apoiado na Linha.

A evolução da configuração das asnas difere significativamente de região para região. Enquanto nas regiões mediterrânicas (Figura 2.2 a)) são utilizadas estruturas mais simples e com uma ligeira inclinação, nas regiões do Norte e Centro da Europa (Figura 2.2 b)) são usados esquemas baseados num estilo Gótico sendo estes mais complexos e com inclinação mais acentuada (Branco, 2008).

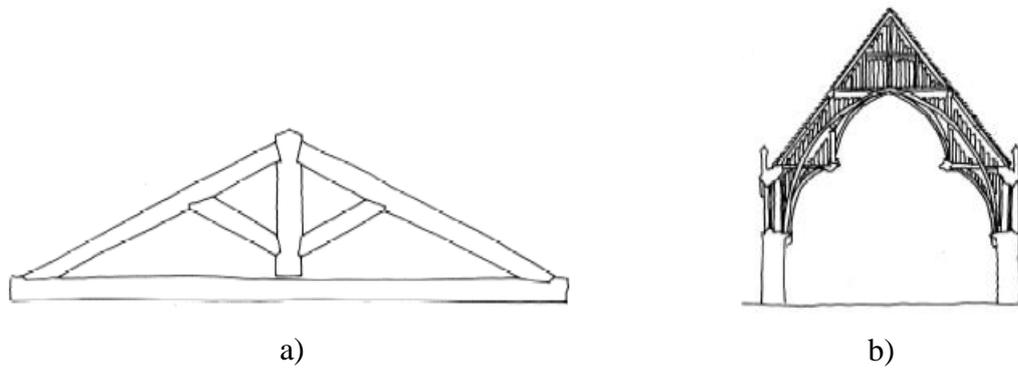


Figura 2.2 - Diferentes tipos de asnas consoante a geografia: a) Asna mediterrânica; b) Asna do Norte e Centro da Europa (Branco, 2008)

Até ao século XIX, as asnas de madeira comportavam-se como vigas simplesmente apoiadas ou como um sistema reticular, porém as configurações executadas promoviam elevada flexão sobretudo ao nível da Linha. Somente após o século XIX, as estruturas das asnas foram concebidas de modo a que os principais esforços atuantes nas asnas sejam os esforços axiais (tração e compressão). A flexão foi evitada com a separação do Pendural da Linha e deste modo, o sistema estrutural é estático e articulado.

As espécies de madeira mais comuns nas coberturas de madeira em Portugal são o Pinho Bravo (*Pinus pinaster*, Ait), o Eucalipto (*Eucalyptus globulus*, Labill) e o Castanho (*Castanea sativa*, Mill). O Pinho nacional sempre foi bastante utilizado no sector da construção. O Castanho normalmente é associado às obras das ordens eclesiásticas (mosteiros e igrejas) e como apresenta uma elevada durabilidade natural, está presente nas construções mais antigas. Nos últimos anos, o uso do Eucalipto cresceu significativamente por ser uma madeira disponível.

Qualquer que seja a espécie, a madeira deve estar seca e desempenada. Todas as peças devem ser de quina viva, galgadas e esquadriadas, para que as mortagens saiam perfeitas. Quando as asnas tenham de ficar à vista, é conveniente aplainar a madeira, usando-se também neste caso chanfrar as arestas nos comprimentos entre samblagens (Costa, 1955).

2.2. Geometrias comuns das asnas de madeira

As coberturas de madeira dos edifícios antigos são, de um modo geral, compostas por uma estrutura principal e uma estrutura secundária. Consideram-se parte integrante da estrutura principal as treliças (asnas) e vigas principais (madres), enquanto a estrutura secundária integra as varas e as ripas (Figura 2.3). A estrutura secundária tem como função transmitir as cargas do revestimento para as asnas.

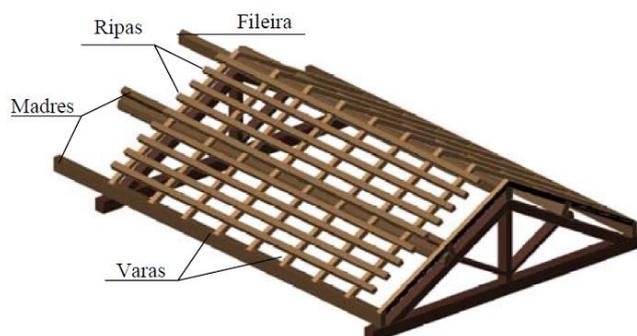


Figura 2.3 – Organização de uma cobertura tradicional de madeira (Branco, Santos & Cruz, 2008)

A escolha da configuração recai sobre vários fatores entre os quais se destacam: o vão a cobrir, a inclinação da cobertura, a natureza das ações, a arquitetura e as operações de montagem e execução (Branco & Lourenço, 2014). No entanto, a disposição dos diferentes elementos de madeira, normalmente seguem a regra de que os elementos mais curtos devem trabalhar em compressão para evitar problemas de encurvadura.

Segundo Costa (1955), os tipos de asnas de madeira que se utilizam como estrutura de suporte de coberturas tradicionais em Portugal são: a) asna simples; b) asna vulgar ou de Palladio; c) asna de tesoura; d) asna de mansarda; e) asna de lanterna; f) asna de alpendre; g) asna de nível; h), i), j) asnas fabris; k) asna composta, ver Figura 2.4.

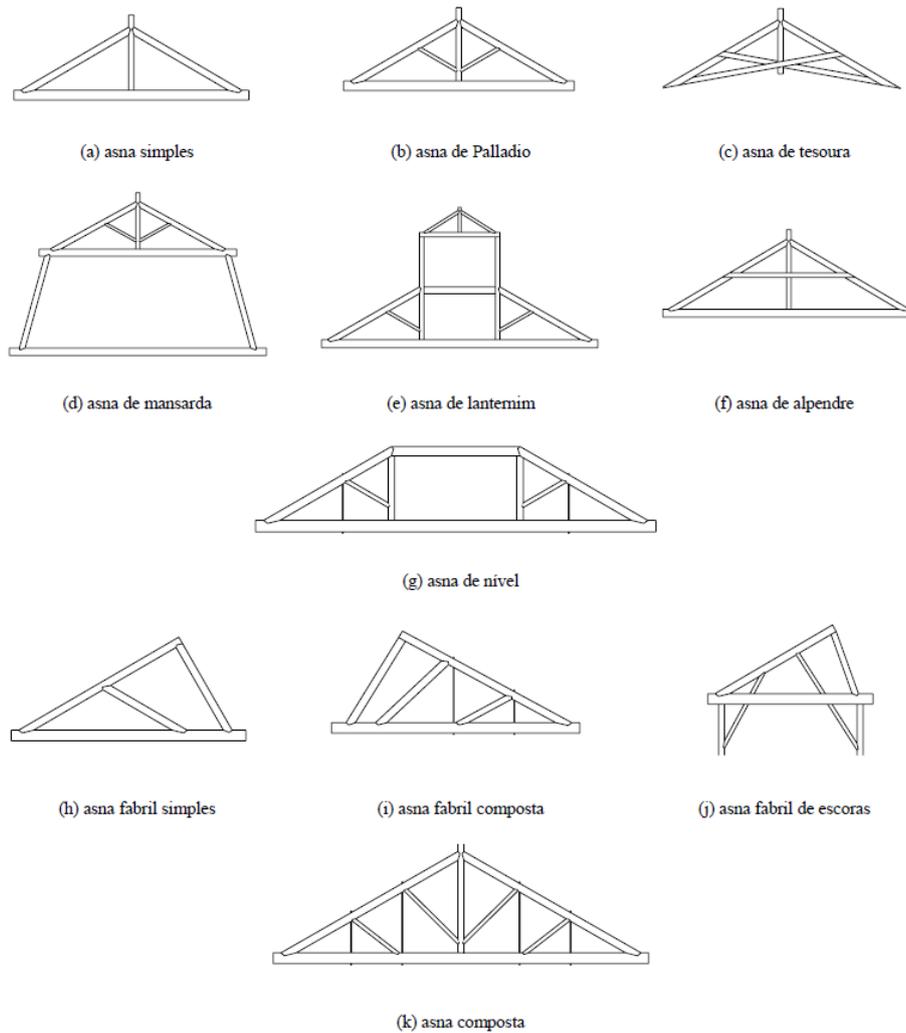


Figura 2.4 – Tipologias mais frequentes de asnas de madeira em Portugal, Costa (1955)

2.2.1. Asna simples

A asna simples apresenta uma estrutura elementar constituída por um elemento horizontal (linha) e duas pernas ligadas à linha para formar as vertentes do telhado. Em certos casos estas asnas podem usufruir de um elemento vertical ligado ao vértice do telhado e às pernas (o pendural) para melhor funcionamento estrutural (ver Figura 2.5). No entanto, esta solução sofreu várias alterações, passando de uma estrutura simples triangulada para sistemas mais complexos tanto em número de elementos como nos sistemas de ligação entre eles.

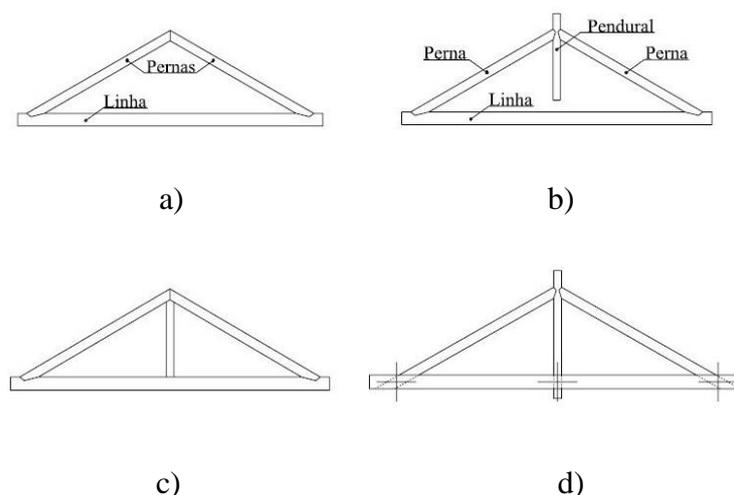


Figura 2.5 – Variantes da geometria da asna simples: a) asna simples constituída por linha e pernas; b) asna simples constituída por linha, pernas e pendural; c) asna simples constituída por linha, pernas e pendural apoiado na linha; d) asna simples constituída por linha, pernas e pendural fixados por elementos metálicos à linha, Branco *et al.*, (2008)

Na asna simples da Figura 2.5 a), o comportamento estrutural é equivalente a um arco de três rótulas. O esforço atua sobre as pernas, que trabalham à compressão, e a linha absorve a componente horizontal deste esforço, enquanto a componente vertical é compensada pela reação vertical no apoio. O pendural quando se encontra suspenso na linha, Figura 2.5 b), facilita a união entre as pernas, porém quando o pendural se encontra apoiado na linha, Figura 2.5 c), provoca esforços de flexão na linha possíveis de causar graves problemas estruturais. Neste sentido, no que respeita a asnas com geometria simples, a última configuração descrita é a menos aconselhável, isto porque a linha além de se encontrar submetida a esforços de tração está sujeita a esforços de flexão e corte que agravam substancialmente a sua deformada. O ideal é que o único esforço de flexão existente na linha seja proveniente do seu peso próprio. As ligações reforçadas por elementos metálicos, Figura 2.5 d), apresentam uma maior rigidez e, por conseguinte, uma melhor distribuição dos esforços por todos os elementos da asna (Branco *et al.*, 2008).

Posteriormente às asnas simples, surgiram as asnas de Palladio. A configuração destas asnas baseia-se na da asna simples com a particularidade de se adicionarem duas escoras apoiadas na base do pendural que dividem a perna em duas partes, ver Figura 2.6. As madres deverão estar colocadas sobre os nós formados entre as pernas e as escoras. Assim, as escoras submetem-se a esforços de compressão o que promove uma melhoria do comportamento à flexão da estrutura e simultaneamente permitem solicitações de valor superior.

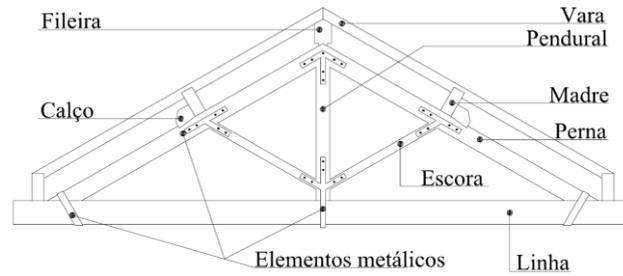


Figura 2.6 – Asna de Palladio reforçada com elementos metálicos, Appleton (2003)

As asnas simples aplicam-se a coberturas cujos vãos a vencer se encontrem entre 6 a 8 metros e o ângulo formado entre a linha e a perna aproxima-se de 30° , enquanto entre a escora e o pendural é aproximadamente 60° . Estas restrições devem-se com o aumento dos esforços de compressão nas pernas, tração na linha e das deformações, o que consequentemente implicaria um aumento significativo das secções transversais destes elementos.

2.2.1.1. Asna simples com linha alta

O sistema de asna simples com a linha alta (Figura 2.7 a)) tem como vantagem a liberdade de utilização do espaço abaixo das asnas para execução de forros em gamela ou em abóbada de berço. Contudo, este sistema tem como inconveniente a introdução de importantes esforços ortogonais ao plano das paredes laterais. A rotação das paredes pode comprometer por completo a segurança da estrutura e, em última instância, ocorrer rotura global do edifício.

Na Figura 2.7 b) é possível observar a colocação de um tirante que resulta da necessidade de estabilizar as paredes dado os impulsos introduzidos pelas asnas.

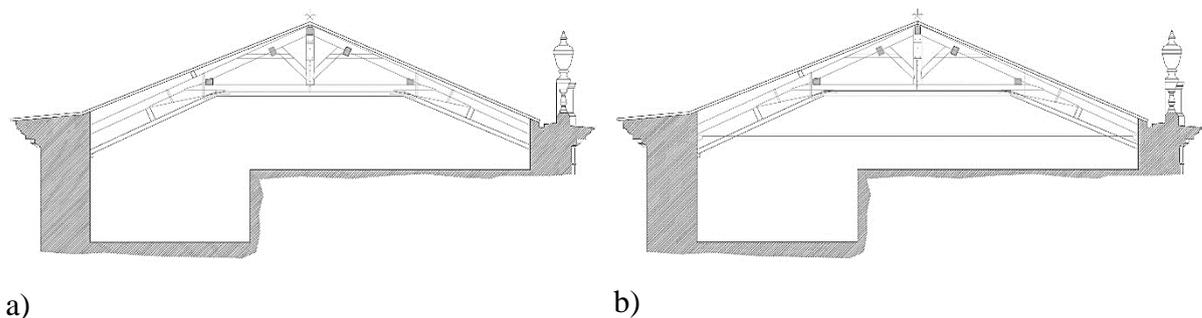


Figura 2.7 – Asna simples com linha alta: a) sem tirante; b) com tirante

2.2.2. Asna composta

A configuração da asna composta surge com a necessidade de vencer vãos de coberturas superiores a 8 metros. Desta forma evoluiu-se da estrutura de asna simples para a asna composta que permite maiores comprimentos das linhas e das pernas, através da colocação de um maior número de escoras. Segundo Branco *et al.*, (2008), o aumento do número de elementos comprimidos (escoras) obriga a introdução de tirantes para resistirem à componente de tração que surge na ligação escora-linha, Figura 2.8 a). Por vezes, a meio do vão da asna, unem-se dois elementos para a concretização de linhas com comprimento maior Figura 2.8 b).

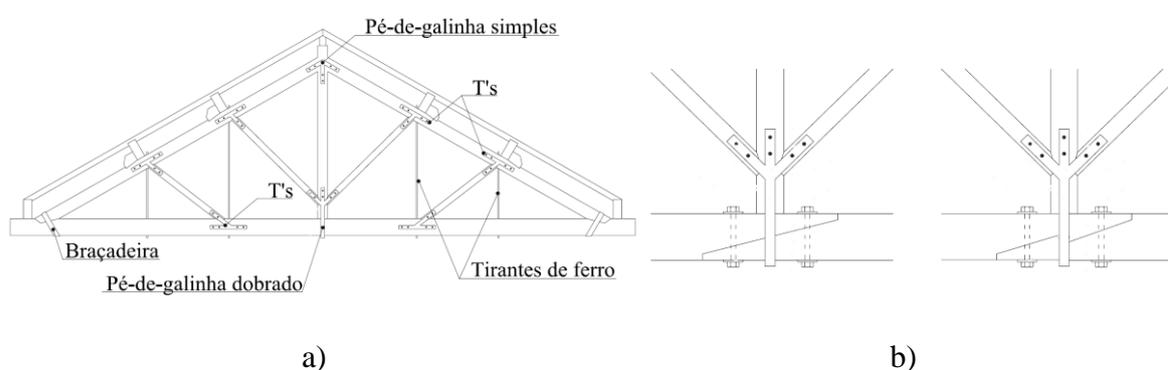


Figura 2.8 – Geometria de asna composta: a) Asna composta com tirantes de ferro reforçada com Tês, braçadeiras e pés de galinha, Appleton (2003); b) Pormenor da ligação de continuidade da linha, Munafò (2002)

É importante referir que para reduzir o valor da deformada final, o esforço de flexão na linha da asna deve ser o mais diminuto possível. Para isso, os pendurais não deverão estar apoiados na linha. A configuração da asna composta permite alcançar vãos até 14 metros.

2.2.3. Asna de tesoura

As asnas de tesoura, também designadas como asnas em Cruz de Santo André, têm a particularidade de não apresentar na sua constituição o elemento linha. Portanto, as pernas são consolidadas por duas escoras que vão desde o apoio inferior da perna ao nó onde se encontra a madre da perna oposta. Por vezes, coloca-se o elemento pendural para facilitar a ligação entre as duas pernas da asna (Segurado, 1975).

2.2.4. Asna de mansarda

Os telhados de mansarda são formados por quatro planos inclinados dois a dois, compondo assim duas águas dobradas. Genericamente, a mansarda comporta na parte superior uma asna de tipo simples que constitui o telhado propriamente dito e a parte inferior é composta por pernas de força que compõe as paredes do último piso. As pernas de força apoiam-se nas vigas do pavimento ou nas paredes da edificação.

Este tipo de asna tem como vantagem aproveitar o vão do telhado para habitação porém não é recomendável uma vez que a mansarda, em consequência da pequena espessura das paredes geralmente cobertas de chapas de zinco que apresentam desvantagens acústicas e térmicas, no Inverno é frequentemente húmida e fria e no Verão é insuportavelmente quente (Sevegnani, Filho & Silva, 1994).

2.2.5. Asna com lanternim

Este tipo de asna utiliza-se com a necessidade de uma boa ventilação num edifício. A configuração desta asna é um trapézio composto pela linha, duas pernas e um nível. Os pendurais elevam-se acima das pernas que constituindo os prumos do lanternim formando a armação deste uma pequena asna composta por linha, pernas e pendural. Os lados do lanternim são geralmente guarnecidos de persianas para permitir a ventilação do edifício (Segurado, 1975). A asna de lanternim é empregada principalmente em oficinas, mercados e cavalariças.

2.2.6. Asna de alpendre

A asna de alpendre apoia-se em prumos integrantes da sua estrutura. A configuração desta asna permite alcançar grandes vãos como por exemplo, na cobertura de armazéns, hangares, cais e recreios. Esta asna também se destaca por ser utilizada em recintos abertos.

2.2.7. Asna de nível

Esta configuração é utilizada em vãos de grande largura e tem como vantagem a possibilidade de utilização da parte central do sótão da edificação onde é aplicada. Deste modo, quanto maior for o vão que a asna ressalva maior o pé direito que se obtém na parte central do edifício.

Para a execução do pavimento de sótão permitido por este tipo de armação deverá existir um vigamento próprio, onde assenta o soalho, ficando a linha da asna intercalada nesse vigamento e abaixo do seu nivelamento de superfície. O mesmo para a construção da esteira do teto de sótão (Costa, 1955).

2.2.8. Asna de tipo fabril

A asna de tipo fabril é caracterizada por a constituição de duas vertentes de telhado terem ângulos de abertura diferentes, uma vertente é executada com o ângulo habitual de abertura (30°) e a outra com ângulo entre 60° a 70°.

Esta asna é empregue em coberturas de grandes espaços industriais ou oficinas, materializadas em cadeia para permitir a entrada de luz. O vão alcançável por esta estrutura é de 5 a 10 metros.

2.3. Análise do comportamento estrutural das asnas simples

As asnas de madeira estão essencialmente sujeitas a uma tensão normal associada a esforços axiais e a momentos fletores induzidos pelo seu peso próprio e a cargas aplicadas que podem simétrica como assimétricas (neve e sismos) (Branco, Cruz & Piazza, 2006).

Branco *et al.*, (2005) efetuaram vários estudos para avaliar o comportamento estático e dinâmico de asnas simples de madeira. O comportamento estrutural destas asnas sob o efeito de ações simétricas e assimétricas, a importância da ligação pendural-linha, a rigidez das ligações e a colocação das madres com ou sem excentricidade relativamente aos nós, representam alguns dos parâmetros analisados. Segundo Branco *et al.*, (2006; 2008) entre as principais conclusões do referido estudo, salientam-se:

- As pernas são os elementos mais carregados, apresentando tensões normais e de corte. O pendural está submetido à tração, as escoras à compressão e a linha está essencialmente tracionada mas exhibe também flexão devido ao seu peso próprio;
- Apenas para ações assimétricas, como são exemplo a neve, o vento e o sismo, a influência da rigidez das ligações é condicionante. Numa estrutura plana como é a asna, quando submetida a cargas pontuais aplicadas diretamente nos seus nós, sem provocar qualquer flexão, a distribuição dos esforços é função da sua geometria;
- A colocação das madres com excentricidade relativamente aos nós altera a distribuição de esforços na asna, em particular, nas pernas;
- A linha deve estar suspensa no pendural de forma a reduzir as suas deformações devidas ao peso próprio. A ligação deve ser articulada e impedir as deformações no plano ortogonal ao plano da estrutura (asna);
- As ligações perna-linha são as mais condicionantes, não apenas pelos esforços que aí se concentram mas por serem zonas onde a deterioração biológica é mais frequente;
- Os apoios devem ser capazes de resistir a movimentos horizontais. As forças de atrito não são suficientes para resistir a movimentos horizontais causados por exemplo, por sismos.

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 pendurais, as pernas são sujeitas a momentos fletores e a segurança da estrutura é comprometida. Como regra prática, o número de Pendurais deverá ser igual ao número de madres da cobertura em causa (Branco, 2008).

Um bom funcionamento estrutural de uma asna corresponde fundamentalmente à geometria e configuração dos elementos.

2.3.1. Ligações

As ligações entre os diversos elementos integram um dos aspetos mais importante na materialização de uma estrutura de madeira. Os principais problemas de instabilidade surgem nas ligações, por este motivo, afirma-se que as ligações são um elemento crítico das

estruturas de madeira dado que estão sujeitas a esforços e tensões localizadas, implicando uma redução da resistência global da estrutura.

A resistência da estrutura será condicionada pela resistência da ligação e a sua rigidez influenciará a grandeza dos deslocamentos e potencial distribuição de esforços que, eventualmente, se venham a verificar. O tamanho dos elementos que constituem as estruturas é também muito afetado pelo número e tipo de ligadores que são utilizados, e não apenas pelos requisitos de resistência a que um determinado elemento esteja sujeito (Porteous & Kermani, 2007).

O correto funcionamento da ligação depende sobretudo da sua tipologia, diretamente relacionada com o tipo e nível de ações de solicitação, bem como a perfeição e minúcia da sua execução (Branco *et al.*, 2005).

Em conformidade com o tipo e grandeza das ações de solicitação existem diferentes tipos de soluções que podem ser adotadas na ligação entre os elementos das estruturas de madeira, deste modo, nos pontos seguintes serão abordadas as ligações mais importantes, bem como, as mais utilizadas.

2.3.1.1. Requisitos essenciais

Existe um conjunto de requisitos, do ponto de vista estrutural, que devem ser garantidos pela ligação para que se possa considerar que a mesma esteja a cumprir, convenientemente, a função para a qual está destinada. Segundo Madsen (1998) são os seguintes:

- Resistência – a ligação deve assegurar a transmissão de esforços entre os elementos que se pretendem ligar. Devem ser avaliados todos os esforços que se desenvolvem nos elementos a ligar e deve-se assegurar caminho para os mesmos na ligação, garantindo que as resistências mecânicas de todos os componentes (peças a ligar, chapas metálicas e ligadores) são verificadas. Os esforços de corte também devem ser considerados;
- Deformação – a deformação ou deslizamento das ligações deve ser tida em consideração. Fenómenos de fluência, folgas, atritos e erros de fabrico afetos aos materiais que constituem as ligações condicionam o comportamento das estruturas. Inversão do sentido das forças – este aspeto assume especial relevância pois restringe

a adoção de soluções tradicionais que, normalmente, só resolvem as situações associadas a esforços que atuam apenas numa direção;

- Modos de rotura – preferencialmente devem ser adotadas soluções cujos modos de rotura sejam dúcteis. É mais fácil prever cenários de rotura em soluções que usem materiais mais dúcteis, que se deformam mais e dissipam energia, comparativamente com materiais mais frágeis, cujo modo de rotura é brusco e difícil de antecipar. Mais, convém que a carga de rotura da ligação não condicione os elementos que liga;
- Rigidez – conforme já referido, a rigidez das ligações tem influência na distribuição de esforços pelos elementos.

2.3.1.2. Ligações tradicionais

A forma mais antiga de efetuar a interligação entre os vários elementos 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 entre os elementos a unir (Branco *et al.*, 2008).

O contacto entre os elementos a unir é normalmente realizado por entalhe que pode ser efetuado por diferentes tipologias. No que respeita ao número e à localização dos dentes que o entalhe pode apresentar, consideram-se três tipos de ligações denteadas, ver Figura 2.9: a) entalhe de dente simples aplicado na parte anterior da zona de contacto entre os elementos, b) entalhe de dente simples aplicado na parte posterior da zona de contacto entre os elementos ou c) entalhe de dente duplo.

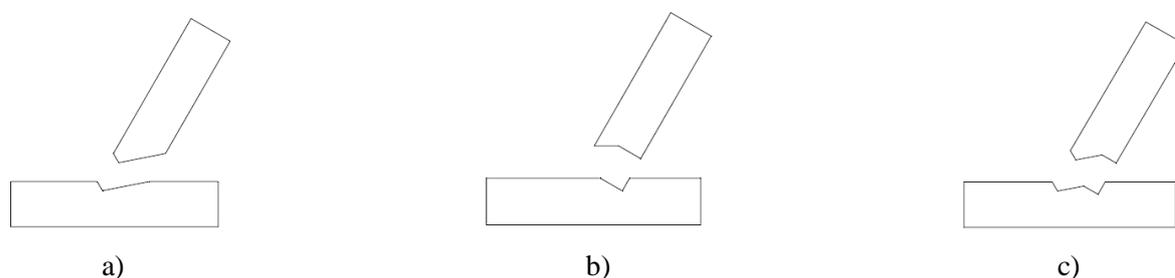


Figura 2.9 – Ligações tradicionais de entalhe: a) Dente simples anterior; b) Dente simples posterior; c) Dente duplo, (Branco *et al.*, 2008)

A ligação tradicional de dente pode ser reforçada com a execução de respiga e mecha (Figura 2.10). A respiga corresponde a uma saliência criada num dos topos de um 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 mecha e respiga, servem essencialmente para assegurar a perfeita conexão entre as peças e previnem ao mesmo tempo deslizamentos laterais das mesmas, por intermédio de penetração. Em consequência, exigem um grau de perfeição elevado, de modo a que a ligação tenha um comportamento mais satisfatório possível. Este grau de perfeição só é possível através de mão-de-obra qualificada e experiente (Costa, 1955).

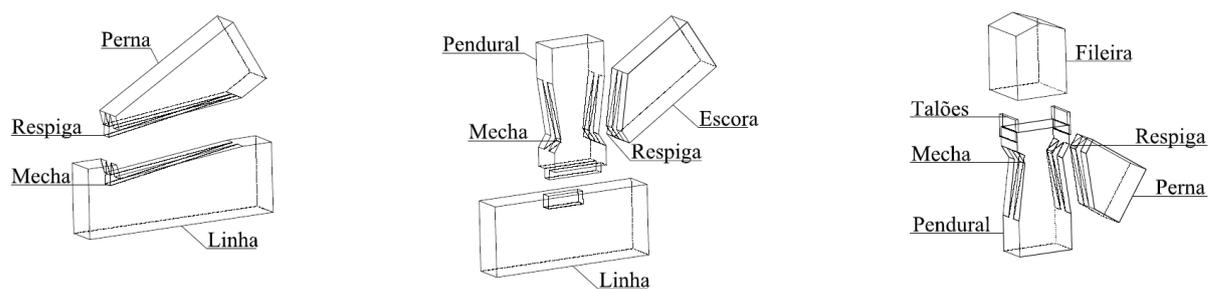


Figura 2.10 – Ligações tradicionais de uma asna de madeira usando respiga e mecha: a) Encaixe entre perna e linha; b) Encaixe entre pendural, escora e linha; c) Encaixe de fileira com pendural e escora, usando talões auxiliares, (Appleton, 2003)

2.3.1.3. Ligadores metálicos

Com a descoberta do aço século XIX e simultaneamente com a necessidade de se construir em larga escala, as ligações por meio de samblagens passaram a ser reforçadas com elementos metálicos (Branco, 2008). Os elementos metálicos são utilizados a fim de impedir deformações no plano ortogonal à estrutura, prever possíveis inversões de esforços, muito frequentes em coberturas ligeiras, e impedir o deslizamento lateral da peça (Branco *et al.*, 2006). Salienta-se que através da sua utilização consegue-se ainda minimizar eventuais defeitos resultantes da execução das samblagens.

Os ligadores metálicos (Figura 2.11) incluem os ligadores de aperto (*fasteners*), cuja função é apertar e juntar as peças de madeira a unir, e os ligadores para intercalar (*connectors*) cuja função é reduzir a concentração de tensões no plano de corte das ligações, atenuando o escorregamento nesse plano. Os ligadores de aperto correspondem aos ligadores do tipo cavilha, tais como, os pregos, parafusos de porca, parafusos auto-roscantes e agrafos. Os

ligadores para intercalar correspondem às placas denteadas e aos anéis (Cruz & Palma, 2004).

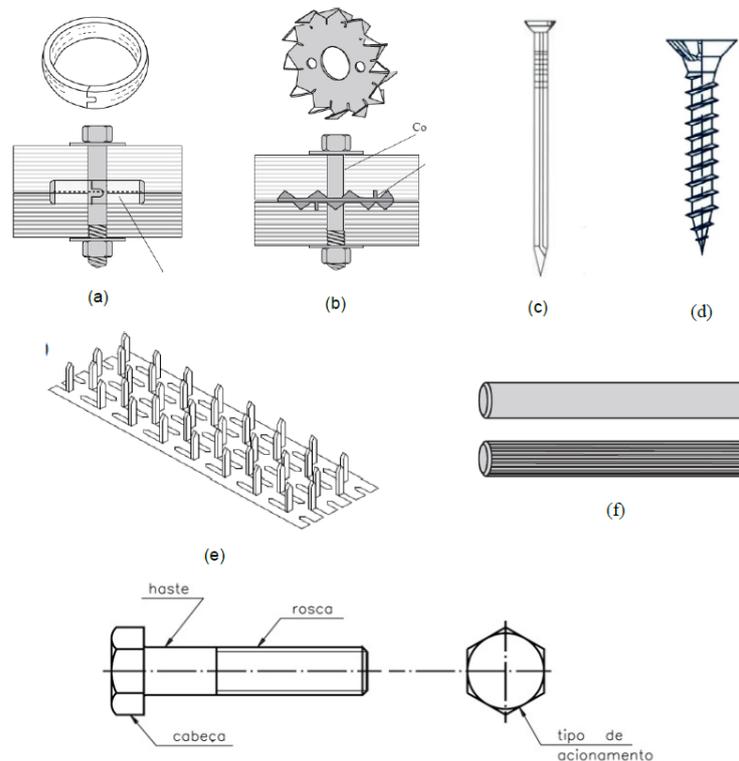


Figura 2.11 – Ligadores metálicos: a) anel aberto; b) placa metálica denteada c) pregos; d) parafuso auto-roscante; e) chapa metálica denteada; f) cavilhas; g) parafuso de porca (Fernandes, 2014)

Outra solução de ligadores metálicos são as chapas em que se distinguem chapas pregadas, chapas metálicas denteadas e chapas enformadas a frio. As chapas aplicam-se na face de madeira a unir sem sobreposição.

Os elementos metálicos mais comuns na materialização de asnas de madeira são os *Pés de galinha*, *Tês* e *braçadeiras* (Figura 2.12). O *Pé de galinha* auxilia a ligação das pernas ao pendural, o *Tê* auxilia a ligação das pernas às escoras, o *Pé de galinha dobrado* a ligação do pendural à linha e a *braçadeira*, que aperta, ou *esquadro*, que reforça, nas ligações das pernas à linha. Estes elementos possuem larguras compreendidas entre 50 a 60 mm e espessura entre 5 a 6 mm e, geralmente são colocados em associação com pregos ou parafusos de enroscar com diâmetro de 6, 9 ou 12 mm, consoante a categoria de resistência da asna.

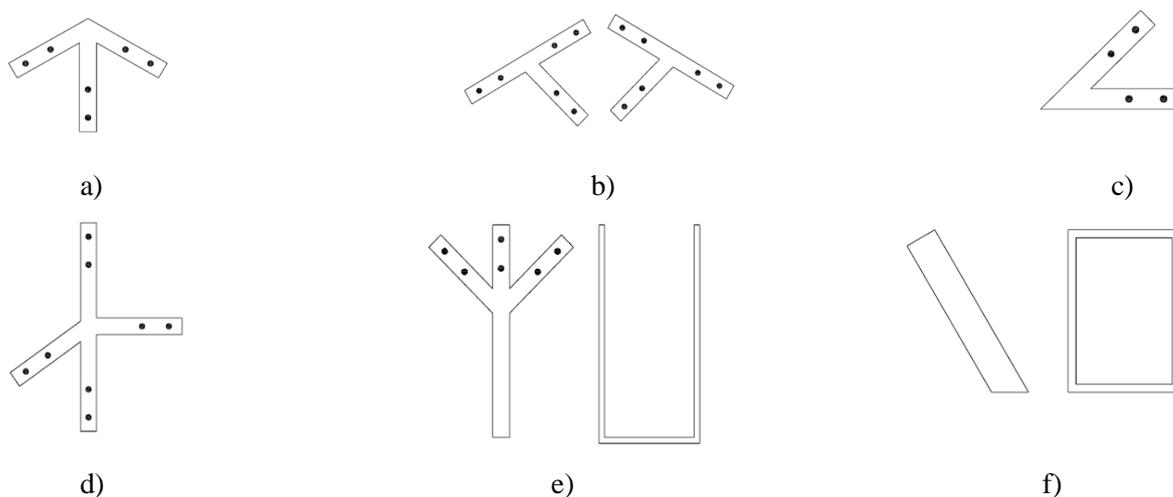


Figura 2.12 - Elementos metálicos auxiliares para a execução das ligações: a) Pé-de-galinha simples; b) Tê esquerdo e Tê direito; c) Esquadro; d) Cruzeta; e) Pé-de-galinha dobrado; f) Braçadeira (Branco *et al.*, 2008)

2.3.1.4. Importância da rigidez das ligações nas asnas de madeira

No dimensionamento de construções, como em ações de reabilitação e/ou reforço de estruturas antigas de madeira, é usual assumir que as ligações das asnas de madeira são articuladas. Contudo, estas apresentam rigidez não desprezável. Esta capacidade de transmissão de momentos torna-se determinante sob o efeito de ações assimétricas. Esta necessidade de uma correta definição do modelo estrutural e, em particular, da adoção de um valor adequado para a rigidez das ligações, ganha especial importância em estruturas antigas, onde os elementos estruturais apresentam grande variabilidade de inércias, onde nem sempre as regras práticas de boa execução das ligações são seguidas (Branco *et al.*, 2005).

2.4. Anomalias mais comuns na madeira

Atualmente, muitas estruturas necessitam de reabilitação por evidenciarem anomalias próprias do envelhecimento, sinais de degradação devido à falta de manutenção, erros de projeto, construção deficiente ou fatores acidentais (Branco *et al.*, 2008).

Relativamente às patologias em estruturas de madeira, Machado *et al.*, (2009) consideram três causas principais: ações de agentes biológicos (ou bióticos), ações de agentes atmosféricos (agentes abióticos) e anomalias estruturais.

Desta forma, os danos que se podem encontrar em estruturas de madeira dividem-se em três origens: os danos de origem biótica, relacionados com os insetos do ciclo larvar e organismos xilófagos, os danos de origem abiótica, que podem ocorrer devido à exposição de intempéries, agentes químicos ou fogo e, por fim, os problemas de origem estrutural, quer devido a questões resultantes da construção inicial ou devido a posteriores intervenções no edifício.

A Tabela 2.1 enumera diferentes tipos de agentes e patologias assim como as consequências relacionadas.

Tabela 2.1 - Agentes de degradação da madeira, patologias e consequências inerentes (Branco & Sousa, 2014)

Agentes		Patologias/Consequências	
Abióticos	Água	fendas, retrações, empolamentos, deformações, empeno e putrefação da madeira	
	Sol	fenómeno de foto-degradação	
	Fogo	destruição progressiva do borne e do cerne	
	Mecânicos, físicos e químicos	degradação da secção por abrasão, choque e ataque químico	
Bióticos	Reino Vegetal	Bactérias	apodrecimento/putrefação e consequente destruição da estrutura das fibras da madeira. Redução da secção residual resistente
		Fungos	apodrecimento/putrefação e consequente destruição da estrutura das fibras da madeira. Redução da secção residual resistente
	Reino Animal	Mamíferos	danos recorrentes da atividade biológica e social (criação de tocas e ninhos)
		Aves	
	Insetos xilófagos	destruição da estrutura da madeira por perfuração e escavação de túneis/galerias	

2.4.1. Patologias provocadas por agentes bióticos

As estruturas de madeira têm especificidades próprias que resultam da sua matéria-prima ser de origem vegetal, por este motivo, possuem um processo de degradação diferente do previsto para as estruturas executadas com base em materiais de origem mineral.

Cruz (2001) afirma que são os agentes biológicos (ou bióticos) a causa mais frequente de deterioração das estruturas de madeira, sendo mesmo os responsáveis pela maioria das situações de rotura parcial ou total das estruturas. Destacam-se, pela sua importância (em

meio terrestre), os seguintes: fungos de podridão (fungos xilófagos), térmitas e carunchos (insetos de ciclo larvar) – sobretudo o caruncho grande.

A madeira que se encontre em contacto com a água ou em ambientes de humidade elevada potencia o risco de degradação por determinados agentes biológicos, por este motivo, os agentes biológicos são mais comuns nas zonas de apoio devido à presença de águas infiltradas e às deficientes condições de arejamento dadas por erros construtivos (Figura 2.13 a)).

Estas anomalias traduzem-se pela perda de resistência e rigidez dos elementos e das ligações, assim como, pela variação de secção (Figura 2.13 b)) e cor dos elementos.

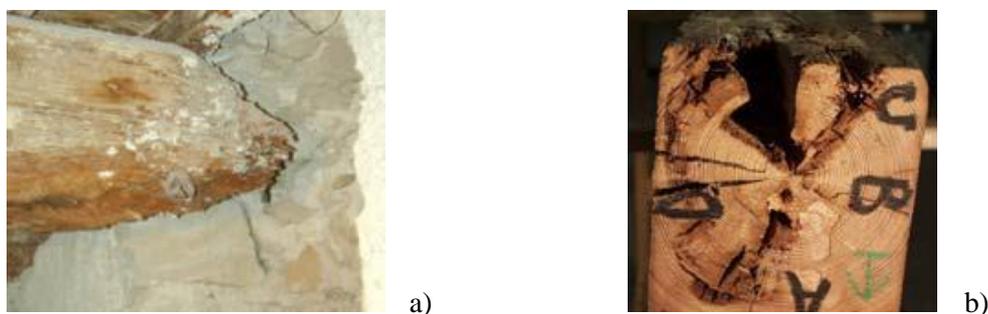


Figura 2.13 – Anomalias por degradação biológica: a) Podridão na entrega da linha b) perda de secção; (Branco *et al.*, 2008)

2.4.1.1. Insetos Xilófagos

Os insetos xilófagos (insetos que se alimentam de madeira) são os principais agentes bióticos e mais frequentes em madeiras degradadas.

Existem três grandes famílias de insetos xilófagos, sendo estas: os insetos de ciclo larvar (classe dos coleópteros), os insetos sociais (classe dos isópteros) e outros insetos.

Os insetos de ciclo larvar, vulgarmente designados por carunchos, são insetos que atacam geralmente a madeira seca, embora possam ter razoável tolerância em relação a valores elevados de humidade. As larvas penetram a madeira gerando galerias. Assim que o período larvar se aproxima do fim, a larva imobiliza-se próximo da superfície da madeira, transformando-se em pupa e finalmente em inseto adulto, ver Figura 2.14. O inseto dirige-se para o exterior da madeira originando o orifício de saída com forma circular.

Em Portugal a forma mais comum é denominada de *Hylotrupes bajulus* (caruncho grande), caracterizado pelo ataque a madeiras resinosas, cujo ataque incide principalmente no borne. O inseto adulto mede geralmente 10-30 mm e o seu ciclo de vida é em média 5 anos. Relativamente aos carunchos pequenos, destaca-se o *Anobium* que ataca indiferentemente o borne de Folhosas e de Resinosas. Sendo que, o inseto adulto mede genericamente 2-4 mm e a média de ciclo de vida é de 2 anos. A longevidade de ambos insetos depende da disponibilidade alimentar, da humidade e temperatura ambiente (Cruz, 2001).

A visualização de orifícios de saída de insetos adultos e a presença de serrim sobre a superfície da madeira afetada ou por baixo dos elementos infestados permite o reconhecimento de um ataque por carunchos. Assim como, o empolamento da superfície dos elementos de madeira, pelo efeito da pressão do serrim compactado no interior das galerias, ou ainda pelo ruído particular da atividade da larva no interior dos elementos de madeira (Branco & Sousa, 2014).

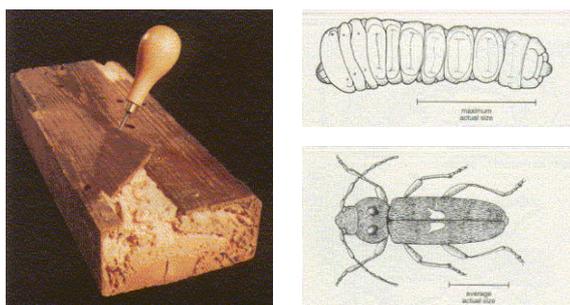


Figura 2.14 - Madeira atacada por caruncho grande, larva e inseto adulto (Cruz, 2001)

Para além dos carunchos, outros insetos xilófagos são reconhecidos, nomeadamente as térmitas subterrâneas (insetos sociais) e os xilófagos marinhos (em estruturas de madeira localizadas em águas salgadas ou salobras).

As térmitas subterrâneas constituem um dos principais fatores de degradação de estruturas de madeira. As térmitas geram degradação no sentido das fibras em que se formam galerias. As térmitas atacam a madeira quando esta possui teor de humidade superior a 20% e se encontra em contacto com o solo, ou relativamente próxima do solo (Dias *et al.*, 2009). As consequências podem ser gravosas para a segurança de determinada estrutura, pois o aspecto exterior pode ser bom e o seu interior encontrar-se num estado de destruição avançado.

Os xilófagos marinhos compreendem os crustáceos (degradação superficial da madeira) e os moluscos (degradação interior da madeira). Segundo Freitas (2012), os xilófagos marinhos

caracterizam-se pela ação mais devastadora sobre a madeira, isto é, pela maior quantidade de madeira degradada por unidade de tempo. O ataque destes agentes é influenciado pelo teor em oxigénio, salinidade da água e temperatura. A durabilidade natural da madeira aumenta com o seu teor em sílica, em relação aos agentes xilófagos marinhos.

A perda de resistência de um elemento de madeira atacado por carunchos reside na perda de secção relativa à abertura das galerias. A realização de tratamentos à madeira aplicada em edifícios consiste geralmente no tratamento superficial dos elementos, eventualmente complementados com a injeção de produto preservador no seu interior (Cruz, 2001).

2.4.1.2. Fungos xilófagos

Os fungos xilófagos dividem-se em dois grupos: os fungos de podridão e os fungos cromogéneos e bolores. O ataque à madeira ocorre aquando a presença de um teor de humidade acima de 18-20%, e na presença de oxigénio.

A alteração da coloração da madeira manifesta a presença de fungos cromogéneos e bolores num elemento. Os fungos cromogéneos e bolores atacam superficialmente a madeira, pelo que não originam perda significativa da resistência da madeira (Feio & Lourenço, 2005b). Estes agentes biológicos criam as condições necessárias para se desenvolverem fungos de podridão.

Os fungos de podridão, por sua vez, alimentam-se diretamente da parede celular da madeira e conduzem à perda de massa e de resistência mecânica da madeira, podendo levar à completa destruição do elemento. A alteração da cor e do aspeto do elemento também é característico destes agentes.

Os fungos de podridão dividem-se em três tipos, em função da cor e do aspeto que apresenta a madeira atacada: podridão branca ou fibrosa, podridão branda e podridão parda ou cúbica. Este tipo de fungos ataca normalmente a madeira que esteja permanentemente exposta à humidade.

A podridão branca caracteriza-se por uma aparência fibrosa, de cor clara e de degradação mais lenta em relação à podridão parda. Este fungo de podridão tende a degradar a celulose, hemicelulose e lenhina das madeiras duras.

A podridão branda é provocada por fungos capazes de degradar a lenhino-celulose, através de um processo lento que ocorre da superfície para o interior da madeira. A podridão branda apresenta uma cor esbranquiçada e esponjosa.

A podridão parda apresenta uma cor castanha e provoca fraturas nos elementos em forma cúbica. A podridão parda promove predominantemente a degradação de madeiras macias, e é caracterizada como a mais destrutiva (Pala, 2007).

2.4.2. Patologias provocadas por agentes abióticos

Embora a deterioração da madeira seja tradicionalmente vista como um processo biológico, a madeira também pode apresentar manifestações patológicas por agentes abióticos. Estes agentes são geralmente de atuação lenta, mas podem tornar-se importantes em locais específicos. Os agentes abióticos que provocam a degradação da madeira são: os agentes atmosféricos, os agentes químicos e o fogo.

2.4.2.1. Agentes atmosféricos

Os agentes atmosféricos que podem causar a degradação dos elementos de madeira são: a radiação ultravioleta, humidade relativa, precipitação e vento. Salienta-se que a degradação por estes agentes não é muito gravosa uma vez que não implicam grandes alterações a nível estrutural, porém, promovem as condições necessárias para o desenvolvimento de outros agentes de degradação da madeira como os agentes biológicos.

As radiações solares provocam alterações de cor (tonalidade acinzentada) e na textura uma vez que a ação dos U.V. sobre a lenhina favorece a separação da membrana exterior e consequente desfibramento superficial na madeira.

A precipitação é especialmente gravosa em coberturas que não desempenhem a sua função e ocorram infiltrações. As estruturas de madeira deformam-se naturalmente e os efeitos de fluência do material podem ser suficientes para explicar deformações excessivas. Deste modo, a alteração da configuração geométrica da estrutura provoca movimentos de

adaptação do próprio revestimento da cobertura, facilitando a infiltração de água da chuva (Branco, 2014).

2.4.2.2. Agentes químicos

De um modo geral, o ataque da madeira por parte de agentes químicos não é muito significativo, pois apenas se traduz na alteração da cor ao nível da superfície. A madeira de folhosas é mais suscetível a este efeito.

Em ambiente ácido as cadeias de carbono são destruídas deixando a madeira com um aspeto fibroso (idêntico ao de podridão branca), enquanto que em ambiente alcalino a lenhina e as hemiceluloses são destruídas havendo perda de consistência e de resistência (Rodrigues, 2004). Desta forma, dependendo da espécie da madeira, apenas em ambientes mais agressivos, esta poderá sofrer alterações mais significativas.

2.4.2.3. Fogo

A madeira sofre combustão quando sujeita à ação do fogo, que se traduz na redução da resistência mecânica devido à perda da superfície carbonizada. A superfície carbonizada funciona como isolante em relação à madeira interior, retardando o processo e evitando que esta seja atacada pelo fogo.

Apesar de a madeira ser um material combustível, apenas atinge a combustão para temperaturas superiores a 300°C, portanto mais resistente do que o betão e o aço. A elevada resistência ao fogo da madeira deve-se à elevada estabilidade mecânica associada ao seu baixo coeficiente de condutividade térmica, ao elevado grau de higroscopicidade e elevada espessura, à estanquicidade das chamas quando se forma a casca carbónica, à emissão de gases inflamáveis e ao isolamento térmico consequência da reduzida condutividade térmica (Rodrigues, 2004). A principal consequência do fogo numa estrutura de madeira é a perda progressiva da secção residual resistente dos elementos estruturais (Branco & Sousa, 2014).

2.4.3. Anomalias estruturais

Segundo Branco *et al.*, (2008) as conceções estruturais inadequadas podem introduzir esforços, num determinado elemento ou em vários, que podem comprometer a estabilidade local e global da estrutura. Deste modo, refere que danos estruturais mais comuns nos elementos de madeira são:

- Alteração da função da estrutura ao longo da sua vida, traduzindo-se em cargas superiores às que foram utilizadas para o dimensionamento das peças;
- Estruturas com secção insuficiente, por desconhecimento das características reais de resistência e deformabilidade dos materiais;
- Contraventamento ineficiente nos planos da cobertura;
- Espaçamentos incorretos entre asnas;
- Presença de defeitos locais nas peças de madeira;
- Perda da secção provocada pela ação dos agentes xilófagos;
- Utilização de madeira verde, podendo originar deformações elevadas, devidas ao efeito de fluência;
- Aplicação das madres com excentricidades relativamente aos nós da asna;
- Ligações mal dimensionadas ou mal executadas, podendo originar deformações nos elementos da estrutura em causa;
- Ligações inapropriadas entre o Pendural e a Linha;
- Aplicações de esforços de corte na Linha;
- Encurvadura dos elementos comprimidos devido ao excesso de esbelteza das peças de madeira;
- Assimetria de cargas, podendo causar empenamento dos elementos;
- Infiltrações ao nível da cobertura, normalmente, em consequência da má execução dos sistemas de impermeabilização.

Relativamente à excentricidade das madres, Branco *et al.*, (2006) provou que uma excentricidade de apenas 20 cm é suficiente para condicionar a segurança das pernas.

Branco (2014) verificou também um caso particular de anomalias em coberturas está relacionado com as asnas de madeira, em que a deterioração do material atinge a ligação nos apoios entre a barra da linha e das pernas. Quando se rompe esta ligação, perde-se o efeito

de asna, passando as paredes a receber impulsos horizontais, devido ao peso da cobertura, transmitido pelas asnas.

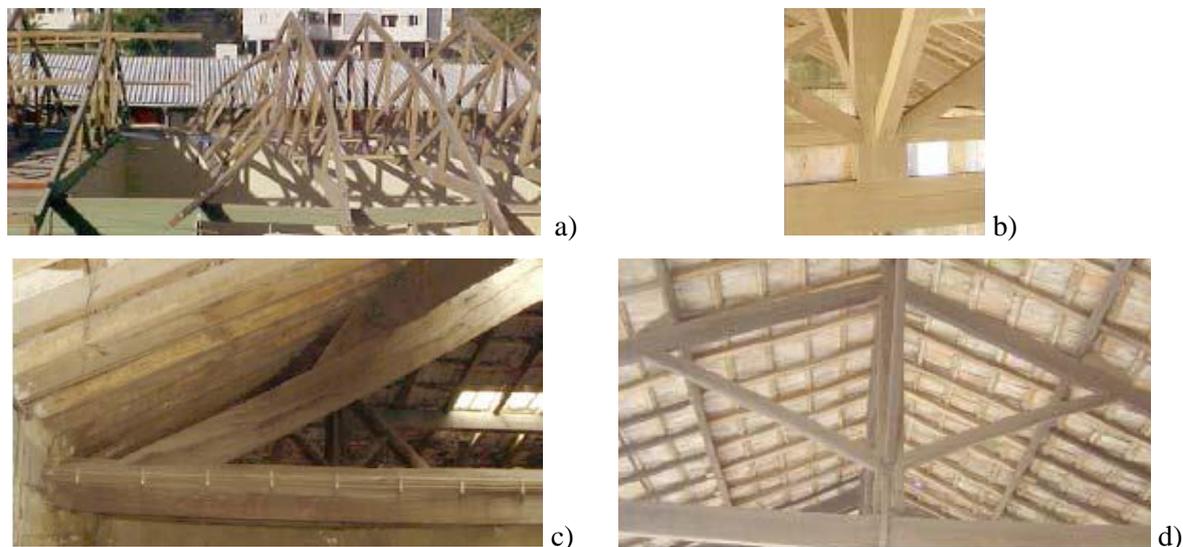


Figura 2.15 – Anomalias estruturais: a) Instabilização devido a contraventamento insuficiente; b) Pendural pregado à linha; c) Deformações excessivas nas pernas; d) Excentricidade das madres em relação ao nó escora/perna (Branco *et al.*, 2008)

2.5. Métodos de reforço estrutural de coberturas de madeira

As estruturas de madeira antigas são complexas e permanentemente suscetíveis a patologias, ao nível dos elementos estruturais, em particular, ao nível das ligações. Consequência do envelhecimento ou degradação prematura em resultado de causas acidentais, erros de projeto ou de execução.

Segundo Branco *et al.*, (2008), a ação de reforço de elementos degradados podem ser divididos em três grupos:

- O método tradicional consiste na substituição das zonas degradadas por peças inteiramente novas, de dimensões e propriedades semelhantes às originais;
- O método mecânico traduz-se pela adição de elementos metálicos, nomeadamente cavilhas, parafusos de porca, chapas denteadas, braçadeiras e esquadros, ou pela adição de materiais compósitos;
- O método adesivo consiste na substituição da zona deteriorada por argamassa de resina epoxídica ligada à madeira sã através de varões metálicos ou compósitos.



Figura 2.16 - Reforço estrutural pelo método tradicional (Piazza & Senno, 2001)

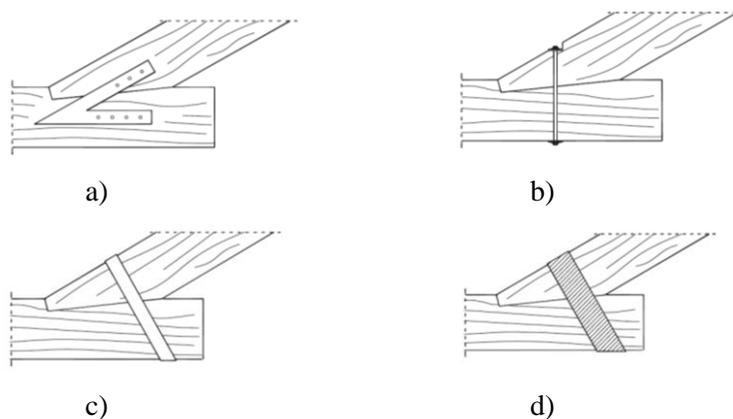


Figura 2.17 - Recuperação estrutural de ligações de asnas pelo método mecânico: a) Reforço com esquadro metálico; b) Reforço com varão metálico; c) Reforço com braçadeira metálica; d) Reforço com materiais compósitos (manta) (Branco *et al.*, 2008)



Figura 2.18 - Reconstituição da ligação, pelo método adesivo, através de varões compósitos e injeções com resina epoxídica (Appleton, 2003)

A definição da técnica de reforço a implementar só deverá ser efetuada após um correto diagnóstico das anomalias existentes nas estruturas. A solução final a adotar deverá ser tomada a partir de um estudo exaustivo e criterioso de todas as soluções propostas.

Na conceção de um reforço eficaz devem ser tidos em consideração alguns aspetos, nomeadamente:

- Caso se trate de troços de madeira nova deverá ser aplicada a mesma espécie que a existente;
- No reforço local de uma parte degradada, tem de existir o cuidado em preservar a sua rigidez inicial, com o intuito de não provocar alterações significativas na distribuição de tensões entre elementos e ligações e, conseqüentemente, não comprometer o comportamento global da estrutura, quer sob ações estáticas quer cíclicas;
- Devem ainda, evitar-se conceções que possibilitem concentrações de humidade na zona reforçada e que comprometam o comportamento da estrutura sob condições acidentais (fogo).

O erro na conceção de reforço é muito comum em inúmeros casos práticos, facto que se deve ao insuficiente conhecimento sobre a utilização da madeira enquanto material estrutural. A dificuldade em prever o real comportamento das ligações tradicionais conduz geralmente a intervenções exageradamente do lado da segurança.

Um inadequado reforço das ligações associado à incompreensão do comportamento global da cobertura poderá resultar em tensões inaceitáveis nos restantes elementos. Por exemplo, quando o mecanismo de ligação impede o livre movimento da madeira poderá ocorrer a rotura de uma estrutura pelos seus membros, o que deve ser totalmente evitado, perante a possibilidade de rotura frágil, especialmente nos elementos tracionados. É ainda de salientar o perigo que conceções de reforço com elementos metálicos representa em caso de incêndio.

Contudo em Portugal, o método mais utilizado para efetuar o reforço das estruturas em madeira é o método mecânico com recurso a elementos metálicos. O uso de elementos metálicos tem como principal objetivo prevenir os deslocamentos para fora do plano da ligação. Hoje em dia, o reforço contempla também o comportamento da ligação no seu próprio plano e o de garantir o contacto entre as peças ligadas.

2.6. Conclusões

A madeira é um material frequentemente utilizado em coberturas em que as mais correntes apresentam como sistema estrutural principal asnas. Existem inúmeras configurações geométricas de asnas que ao longo dos tempos foram desenvolvidas, dada a necessidade de cobrir vãos maiores e aproveitamento de espaço.

As ligações entre os diversos elementos são consideradas um aspeto crítico das estruturas de madeira. Inicialmente eram efetuadas tradicionalmente por entalhe, com a evolução da indústria, as ligações tradicionais começaram a ser complementadas por elementos metálicos. Os elementos metálicos conferem estabilidade da ligação a possíveis inversões de esforços e proporcionam uma diminuição dos defeitos resultantes das ligações por entalhe.

O reforço das ligações tradicionais é indispensável para assegurar a estabilidade comportamental destas. Deste modo, tem como objetivo o aumento da capacidade de carga e da capacidade dissipativa da ligação, sem alterar substancialmente o seu comportamento original.

A madeira é um material natural, por isso encontra-se sujeita a anomalias resultantes da degradação biológica, como insetos e fungos xilófagos. Embora a deterioração da madeira seja tradicionalmente vista como um processo biológico, também pode apresentar manifestações patológicas por agentes abióticos, nomeadamente agentes atmosféricos, agentes químicos e o fogo. Além disso, conceções estruturais inadequadas podem induzir a anomalias estruturais que podem comprometer a estabilidade local e global da estrutura.

Capítulo 3

Intervenção em Coberturas de Madeira Existentes

A inspeção visual deve ser, sempre que possível, complementada por ensaios não-destrutivos de uma ou mais natureza, com o objetivo de aferir sobre determinada propriedade que poderá ser posteriormente correlacionada com a rigidez e resistência desse elemento. Independentemente da natureza do ensaio, este deverá ser o menos invasivo possível de forma a preservar a integridade da estrutura e aparência estética dos elementos.

Este capítulo descreve na primeira parte a metodologia e os parâmetros a aferir na inspeção e classificação visual. Na segunda parte do capítulo descrevem-se os princípios de utilização e funcionamento dos ensaios não-destrutivos.

3.1. Inspeção e diagnóstico

A madeira é um material de construção que se caracteriza por ser um material natural, e como apresenta defeitos, apresenta uma grande variabilidade relativamente às suas propriedades físicas e mecânicas. Neste contexto, perante estruturas existentes, torna-se importante conhecer a espécie de madeira empregue, o estado de conservação e a qualidade dos

elementos para avaliar a resistência dos elementos, a fim de prever o seu desempenho estrutural com segurança.

Segundo Sousa, Branco & Lourenço (2014), existem várias razões para que o nível de segurança de uma estrutura existente deva ser analisada, entre os quais se destacam:

- Caso seja necessário atendendo a resultados de inspeções periódicas;
- Quando o período de vida, determinado por análise anterior, chegou ao fim;
- Caso sejam verificados erros no planeamento ou construção;
- Se o uso da estrutura for modificado;
- Quando são visualizados danos ou degradação dos elementos construtivos e/ou estruturais;
- Devido ao inadequado desempenho em serviço;
- Devido a situações imprevistas ou cargas acidentais que possam ter comprometido a integridade estrutural do edifício;
- Caso exista dúvidas sobre a qualidade do material ou técnicas construtivas utilizadas;
- Na necessidade de eliminar qualquer suspeita sobre o comportamento estrutural do edifício.

Caso seja necessário intervir na estrutura, previamente a qualquer ação deve ser efetuado um diagnóstico exaustivo sobre as causas do inadequado desempenho estrutural. Porém, tal como referido por ICOMOS (1999), tal diagnóstico não impede a realização de medidas preventivas ou de emergência nem a prática de pequenas intervenções.

O primeiro pressuposto que é assumido numa inspeção e diagnóstico de uma estrutura existente é que esta continuará a servir as suas funções adequadamente, em circunstâncias de carregamento e uso normais, tendo em conta que o seu desempenho no passado lhe permitiu alcançar os presentes dias (Sousa *et al.*, 2014). Particularmente, na reabilitação, dever-se-á ter em consideração a aplicação de materiais e técnicas adequadas e promover a condição de reversibilidade da intervenção ou, caso não seja tecnicamente possível, que estas não prejudiquem ou impeçam futuros trabalhos de preservação (ICOMOS, 1999).

Neste processo de planeamento, muitas vezes os custos da inspeção e de um plano de monitorização apropriado, serão incomparavelmente inferiores aos decorrentes de manutenção inadequada ou tardia, intervenções de carácter urgente e, em situações extremas,

às consequências de um colapso estrutural (Sousa *et al.*, 2014). Tal afirmação é reforçada por Appleton (2003) que afirma que a prevenção das anomalias é sempre o melhor caminho, quer do ponto de vista de plena utilização, quer do ponto de vista da economia global e como tal, tem de ser ensinada e incentivada.

No que concerne à avaliação em obra de elementos estruturais de madeira, vários métodos têm sido estabelecidos, sendo que a sua escolha depende da informação que se pretende recolher. Perante a natureza, aplicação e dano causado ao elemento os testes são definidos em diferentes categorias.

A divisão mais importante é a que define a quantidade de dano causado ao material durante a realização do teste (Kasal & Anthony, 2004). Deste modo, quando um teste não produz dano é denominado de ensaio não-destrutivo (NDT), quando o teste produz pequenos danos é designado de semi-destrutivo (SDT) e ensaio destrutivo (DT) quando o dano causado no material não permite recuperação. A diferença entre ensaios não-destrutivos e ensaios semi-destrutivos gera controvérsia, alguns autores têm opiniões diferentes em relação ao nível de dano causado por técnicas que não necessitam de extração da amostra e apenas realizam um pequeno dano superficial (dano normalmente pontual). Na Tabela 3.1 apresentam-se alguns exemplos de ensaios divididos pelo seu nível de dano.

Apesar dos ensaios destrutivos possuírem a desvantagem de destruírem a amostra em análise, apresentam uma completa e correta caracterização dos materiais. Pelo contrário, NDT mantém a integridade do elemento contudo, possuem uma recolha de informação restrita e é necessária uma elevada quantidade de medições para proporcionar uma preliminar caracterização dos materiais (ver Figura 3.1).

Tabela 3.1 – Métodos de ensaio para avaliação da madeira, adaptado de Sousa (2013)

Tipo Método	Exemplo do método
Destrutivo	Testes elemento completo
Semi-destrutivo	Testes de Micro-tensão Núcleo de perfuração Extração de amostra pequena Testes de retenção de parafuso Testes de dureza Resistência à perfuração Testes de penetração Medição do teor em água Videoscopia Microscopia Métodos Acústicos Métodos de Ultrassom Ondas de tensão
Não-destrutivo	Radiografia Termografia IR Radar de penetração Identificação das espécies Inspeção visual

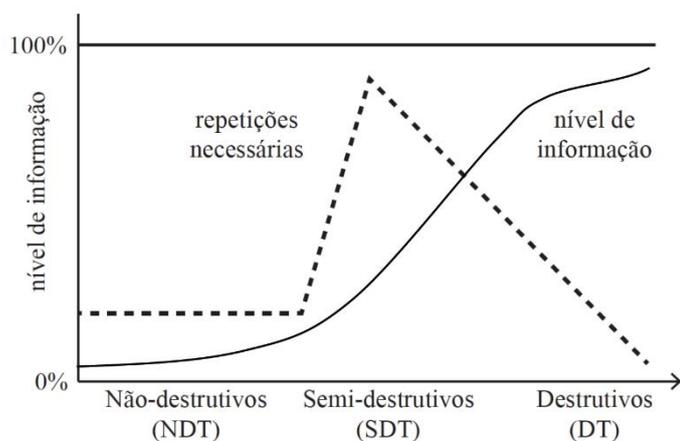


Figura 3.1 – Relação entre técnica de avaliação e nível esperado de informações, adaptado de Kasal (2010)

Outra divisão importante entre os métodos de ensaio de madeira é o tipo de parâmetro obtido em relação à extensão de medição que pode ser local ou global (Baldassino, Piazza, & Zanon, 1996). Os métodos de ensaio locais (LTM) avaliam o elemento pontualmente e a obtenção das propriedades do elemento é efetuada por correlação ou conhecimento empírico. Por outro lado, os métodos de ensaio globais (GTM) permitem medir parâmetros em áreas relativamente grandes ou até mesmo propriedades de um elemento completo. Os ensaios semi-destrutivos são exemplos de LTM, uma vez que apenas fornecem informações sobre as amostras extraídas ou de uma medição pontual (por exemplo: ensaios de resistência à penetração por impacto e de resistência à perfuração controlada), enquanto os ensaios não-destrutivos e os ensaios destrutivos geralmente resultam de ensaios globais (Sousa, 2013).

Alguns detalhes dos ensaios individuais estão explicitados no relatório de estado de arte da comissão RILEM TC 215 (Kasal & Tannert, 2010), onde é referido que para a avaliação de elementos de madeira em construções históricas devem ser seguidos os seguintes passos: i) inspeção visual; ii) identificação da espécie de madeira; iii) medição do teor da água; e iv) avaliação das propriedades mecânicas de referência. Todos os procedimentos mencionados possuem de uma forma global o objetivo de promover uma melhor caracterização do material individualmente. Desta forma é necessário considerar uma metodologia que permita através de diferentes fases, analisar a estrutura de uma forma holística, perante a informação obtida pelas diferentes fontes (Kasal & Anthony, 2004).

Segundo Feio & Lourenço (2005b), a identificação da espécie lenhosa pode ser uma tarefa complexa, exigindo conhecimento anatómico da madeira e das técnicas de reconhecimento macroscópico e microscópico. O reconhecimento da espécie implica, muitas vezes, a recolha de amostras e a sua análise pormenorizada em laboratório.

3.1.1. Metodologias para a avaliação de segurança em estruturas existentes

Precedentemente a qualquer inspeção devem-se reunir todas as informações possíveis sobre o desempenho da estrutura a avaliar. Assim, um diagnóstico preciso e profundo do desempenho de uma estrutura deverá ser composto por evidências documentais/históricas, inspeções e análises estruturais e, quando necessário, complementar a informação com determinação das propriedades mecânicas e com os parâmetros físicos do material e dos elementos.

Uma avaliação preliminar é elaborada através de fonte documental, tal como de uma inspeção visual preliminar seguida de levantamento e medições, que vão sendo executadas mediante a evolução da análise. A análise estrutural é efetuada através de um diagnóstico detalhado das ligações assim e dos elementos, que resulta num relatório preliminar. O relatório preliminar segue-se do relatório de diagnóstico que, por sua vez, resulta no plano detalhado das intervenções, proporcionando assim os resultados das análises e futuras intervenções (Cruz *et al.*, 2013).

Esta primeira fase é qualitativa e possibilita uma visualização e apreciação geral da estrutura e reconhecimento das anomalias existentes, bem como os riscos associados. As fases necessárias para a avaliação e planeamento de intervenções em estruturas históricas em madeira representa-se na Figura 3.2.

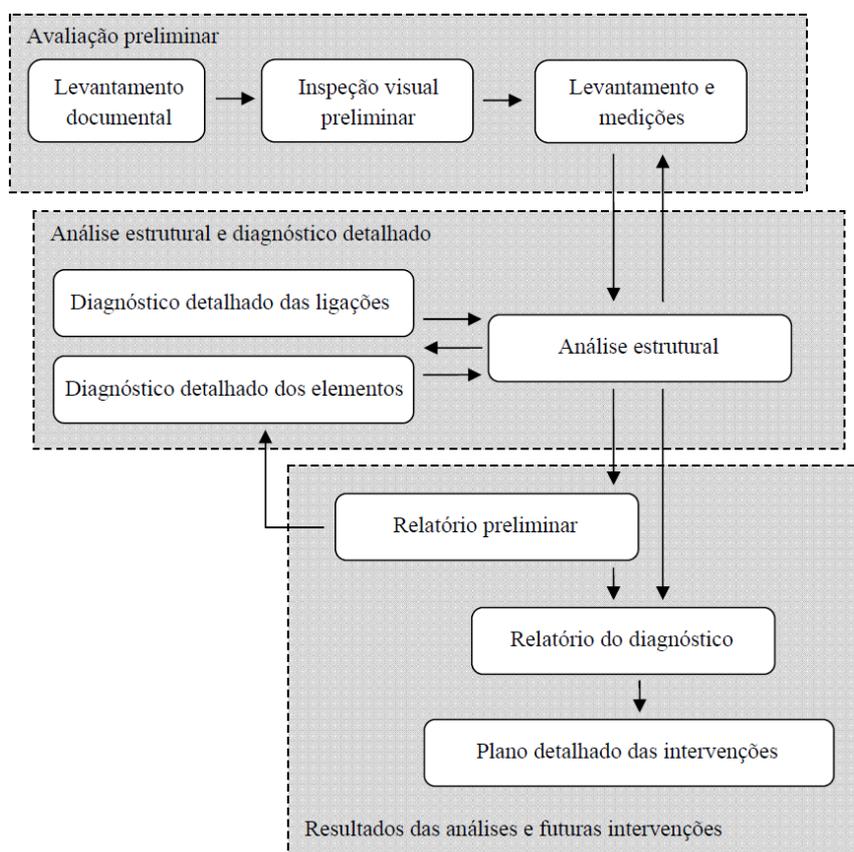


Figura 3.2 – Fases requeridas para a avaliação e planeamento de intervenções em estruturas históricas em madeira (Cruz *et al.*, 2013).

O primeiro passo na realização do diagnóstico consiste no levantamento documental de todos os dados disponíveis sobre a história da construção (data) e todas as obras executadas até à data da inspeção (manutenção, reabilitação, alteração, tipo de carregamento) (Appleton,

2003; Cruz, 2011). Em todo o processo é imprescindível o conhecimento aprofundado do material em estudo, do seu comportamento e das técnicas de construção aplicadas (Branco *et al.*, 2008). Perante estas informações é possível aferir sobre o desempenho atual da estrutura e causas de eventuais danos.

Em função dos dados recolhidos, esta fase permite a elaboração do plano de visita e inspeção detalhado a realizar na fase subsequente, incluindo os meios necessários para a sua execução. Para tal é necessário que sejam identificados os elementos a inspecionar e ensaiar na fase detalhada (zonas de risco), sendo que os restantes apenas serão sujeitos a uma inspeção geral. Nesta fase é também importante conceber as condições de trabalho necessárias, desde segurança, iluminação e limpeza essenciais às tarefas precedentes.

A fase seguinte, correspondente ao levantamento e medições, engloba as componentes de medição geométrica dos elementos, identificação da espécie de madeira e condições técnicas, e levantamento de danos e defeitos.

Assim, procede-se a inspeção visual aos elementos em que os defeitos naturais, tais como, nós, desvio do alinhamento do fio, fendas de secagem, descaio e percentagem de cerne na secção; danos induzidos, tais como, deformações, fendas ou roturas devido ao carregamento e degradação biológica são identificados, caracterizados e inventariados.

O levantamento do teor em humidade e/ou infiltrações também é fundamental pois, caso se verifiquem, fundamentam a atividade biológica. No caso da identificação de degradação por agentes xilófagos, o técnico deve analisar e procurar a presença de serrim e orifícios de saída (caruncho), cor e textura (fungos) e galerias, asas e terra (térmitas). Na eventualidade de existência de degradação biológica, a extensão e a profundidade de degradação devem ser verificadas, principalmente em zonas críticas como, por exemplo, ligações e apoios (Palaia, 2007).

É importante salientar que os elementos são sujeitos a uma inspeção geral, porém nos segmentos críticos deverá ser considerada uma análise individualizada. Entendem-se por segmentos críticos os segmentos com uma maior concentração de defeitos e/ou maior concentração de esforços (UNI, 2004).

3.1.2. Inspeção visual

A inspeção visual consiste num método de ensaio global utilizado para identificar o estado geral dos elementos de madeira, perante a deteção de deterioração externa da madeira e de danos mecânicos visíveis. Segundo vários autores, a inspeção visual é considerada o passo mais importante no processo de reconhecimento histórico e das características originais da madeira, avaliação e deteção de danos ocorridos durante a vida de serviço (Ceccotti & Uzielli, 1989; Feio & Lourenço, 2005b; Tampone, 1996a, 1996b; Uzielli, 1992).

Durante a inspeção visual deverão ser caracterizados os fenómenos que estão na origem de eventuais anomalias e estabelecer as relações de causa-efeito futuras. Para tal são caracterizados e inventariados, os defeitos naturais, tais como nós, desvio do alinhamento do fio da madeira, descaio, fendas de secagem e percentagem de cerne e medula na secção, danos induzidos, tais como deformações, fissuras ou roturas devido ao carregamento, ou degradação biológica.

A inspeção visual deverá ser realizada ao nível do elemento estrutural, contudo deverá ser também considerada a análise individual de segmentos críticos tendo em conta a presença de uma maior concentração de defeitos e/ou por ser uma zona de maior concentração de esforços.

A inspeção visual é realizada com o apoio de ferramentas tradicionais selecionadas em função das necessidades delimitadas na fase de inspeção preliminar e das características e acessibilidades da zona em estudo. Assim, na Tabela 3.2 descrevem-se ferramentas tradicionais existentes e respetiva utilização.

Relativamente aos defeitos naturais, os nós, o desvio do alinhamento do fio de madeira e fendas são os parâmetros que mais influenciam a resistência e rigidez do elemento, posto isto devem ser devidamente observados e medidos.

Consequência de imperfeições no método construtivo ou devido a diferentes situações de carregamento, podem verificar-se danos mais ou menos significativos nas estruturas de madeira, desde a deformação de elementos até à rotura parcial (fendas) ou total de um elemento.

Tabela 3.2 – Ferramentas utilizadas na inspeção visual (Branco & Brito, 2012; Dias, 2008; Martins, 2009)

Ferramenta	Utilização
Lâmina metálica	Permite estimar a profundidade de degradação biológica da peça, para a quantificação da secção residual. Tal como o formão, a faca permite identificar a presença de material mole e desagregável na superfície das peças
Martelo	Permite identificar zonas de vazio no interior da peça, através do som cavo (oco) provocado pela batida do martelo no elemento
Fita métrica	Permite a medição das dimensões das peças
Régua de nível	Facilita a verificação de empenos
Lanterna	Facilita a visualização das peças em locais de pouca visibilidade (por exemplo: cobertura). Deve-se utilizar fontes de iluminação artificial sempre que a natural não seja suficiente.
Comparador de Fendas	Permite a medição da largura das fendas
Escova ou pincel	Utilização para limpeza das superfícies
Espelho extensível e retrovisor	Possibilita a visualização de zonas de difícil acesso
Binóculos ou lupa	Permite a observação de elementos em locais distanciados ou próximos
Bússola	Facilita a identificação da orientação dos elementos e das fachadas
Formão	Permite verificar o estado de degradação por fungos da superfície da peça de madeira (caso esta esteja degradada a lasca raspada apresenta uma textura solta, curta e enrolada, o que não acontece quando a madeira se encontra sã através de lasca plana e longa)

No caso de estruturas de madeira, deve-se ter especial atenção ao estado de conservação das ligações porque o comportamento global da estrutura é fortemente influenciado pelo seu desempenho. No entanto, existem poucas referências normativas à inspeção de ligações, maioritariamente devido ao abundante número de tipologias de ligações com especificidades próprias (Sousa *et al.*, 2014).

Por último, numa inspeção visual, o estado de conservação da estrutura é verificado quanto ao seu nível de degradação. Esta análise é frequentemente acompanhada pelo uso de ensaios não-destrutivos, tais como resistência à penetração por impacto e resistência à perfuração controlada. Os resultados obtidos destes ensaios, permitem a avaliação da perda de resistência dos elementos através da secção transversal residual. De salientar que quando existe degradação dos elementos, devem ser determinados os agentes de degradação e se esta se encontra ativa.

A inspeção visual conclui com a produção de um relatório, onde são assinaladas as condições com que a inspeção foi realizada, materiais e meios utilizados, caracterização geométrica do elemento juntamente com defeitos encontrados (concentração, intensidade e localização). A informação pode e deve ser complementada com mapas de danos, através da catalogação, identificação e representação dos diferentes tipos de danos e patologias. Assim, torna-se possível analisar a localização dos danos e sua concentração ao longo da estrutura e avaliar as zonas críticas da mesma. De salientar que, as zonas críticas devem ser alvo de maior detalhe na classificação do elemento e na análise de segurança.

Os limites referidos para cada defeito variam dependendo da espécie da madeira, uso do elemento e mesmo entre normas de diferentes países estabelecidas para a inspeção visual de elementos de madeira. Todavia, a maioria destes limites atende à morfologia do defeito tendo em consideração a sua posição no elemento e a proporção com a secção transversal deste. Através das normas é possível atribuir classes de resistência aos elementos sendo que as classes superiores permitem menos defeitos e de menores dimensões (Branco & Sousa, 2014).

Globalmente, a inspeção visual permite a atribuição de valores de tensão para obtenção das propriedades de referência que, devido à sua correlação com outras propriedades, permitem a caracterização mecânica do material. Para uma previsão mais fidedigna, a inspeção visual deve ser complementada por ensaios não-destrutivos e ensaios semi-destrutivos (Sousa, 2013).

Sousa, Branco & Lourenço (2013) comprovaram a subjetividade patente na inspeção visual e que quanto maior a experiência do inspetor, menor a imprecisão dos resultados.

3.1.3. Classificação visual

A classificação visual permite analisar a presença de defeitos com base no tamanho, número e localização dos defeitos registados durante a inspeção visual. As regras de classificação dependem da espécie da madeira, da sua proveniência, tamanho e processamento. Cada classe de qualidade é definida por um conjunto de valores máximos, admitidos nas normas de inspeção e classificação, para os vários tipos de defeitos, avaliados visualmente (Branco & Sousa, 2014).

No caso de elementos de madeira nova existem diversas normas para classificação, porém, no que respeita a elementos integrantes de estruturas existentes, são raras as normas que existem. Salientam-se o conjunto de normas italianas que para além de apresentarem uma metodologia para avaliação de elementos e secções críticas em obra propõem também valores definição da resistência e rigidez desses elementos. As normas italianas são: UNI 11035-1:2003 “Legno strutturale - Classificazione a vista di legnami italiani secondo la resistenza meccanica: terminologia e misurazione delle caratteristiche” (UNI, 2003a), UNI 11035-2:2003 “Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale italiani”(UNI, 2003b) e UNI 11119:2004 “Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera” (UNI, 2004).

A norma UNI 11119:2004 estabelece objetivos, procedimentos e requisitos para o diagnóstico do estado de conservação e estima as propriedades mecânicas (resistência e rigidez) para elementos estruturais de madeira presentes em construção existente (Branco & Lourenço, 2014). Esta norma considera três classes distintas, classes I, II e III, dependendo da espécie de madeira em estudo e do diagnóstico efetuado durante a inspeção. Os elementos são classificados com uma respetiva classe caso integre todos os requisitos impostos pela Tabela 3.3, caso contrário, é considerado como não classificável (NC). A aplicação desta norma exige que sejam tomados todos cuidados para que sejam dadas as condições de acesso, iluminação e limpeza dos elementos.

Tabela 3.3 - Limites impostos pela UNI 11119:2004 (UNI, 2004) para classificação de elementos de madeira existentes

Parâmetro a classificar	Classe em obra		
	I	II	III
descaio	$S_w \leq 1/8$	$S_w \leq 1/5$	$S_w \leq 1/3$
Defeitos vários; Fendas de gelo e fendas anelares	ausente	ausente	admissível em extensão limitada
nós isolados	$A_d \leq 1/5$ $d \leq 50 \text{ mm}$	$A_d \leq 1/3$ $d \leq 70 \text{ mm}$	$A_d \leq 1/2$
nós agrupados	$W_d \leq 2/5$	$W_d \leq 2/3$	$W_d \leq 3/4$
inclinação da secção radial	$\leq 1/14 (\approx 7\%)$	$\leq 1/8 (\approx 12\%)$	$\leq 1/5 (\approx 20\%)$
fio (declive %) secção tangencial	$\leq 1/10 (10\%)$	$\leq 1/5 (20\%)$	$\leq 1/3 (\approx 33\%)$
fendas radiais de retração	admissíveis desde que não repassadas		

O descaio é medido através do parâmetro s_w entre a dimensão oblíqua (k) da aresta e a altura da secção transversal. Os nós isolados são avaliados considerando o parâmetro A_d que corresponde à relação entre o diâmetro mínimo do nó (d) e a largura da face do elemento onde se encontra o nó, enquanto os nós agrupados são avaliados considerando o parâmetro W_d , ou seja, a relação entre a soma dos diâmetros mínimos de todos os nós (t_k) que se encontrem a uma distância inferior a 150 mm (ou até que o fio não tenha retomado a sua direção normal) e a largura da face do elemento onde se encontrem os nós. A inclinação do fio é realizada através do uso de um riscador ou, quando presentes, através da avaliação da direção das fendas de secagem nas faces longitudinais.

A norma UNI 11119:2004 (UNI, 2004) indica também os valores para a caracterização mecânica de diferentes espécies. A Tabela 3.4 apresenta o exemplo para a madeira de pinho (várias espécies).

Tabela 3.4- Caracterização mecânica de coníferas do género *Pinus* (várias espécies) atendendo à aplicação da norma UNI 11119:2004 (UNI, 2004) (12% de teor de água)

Classe em obra	Tensões admissíveis (N/mm ²)						Módulo de elasticidade (flexão)
	compressão		flexão estática	tração ao fio	corte		
	ao fio	⊥ ao fio					
Pinho (<i>Pinus spp.</i>)	I	11	2,0	12	11	1,0	13000
	II	9	2,0	10	9	0,9	12000
	III	7	2,0	8	6	0,8	11000

A norma UNI 11035-1:2003 especifica a terminologia e os métodos para a avaliação das características relevantes para a classificação visual da resistência mecânica da madeira com proveniência italiana destinada para usos estruturais. A norma UNI 11035-2:2003 identifica os tipos mais comuns de madeira italiana estrutural e, para cada um deles, indica as regras a adotar para efetuar a classificação visual da resistência, referindo-se ainda às condições gerais presentes na UNI 11035-1:2003 (Branco & Lourenço, 2014).

No caso de coníferas são divididas em duas categorias, coníferas de tipo 1 ou 2, enquanto no caso de folhosas pertencem a uma classe única, classe S. De modo análogo à classificação pela UNI 11119:2004, se os defeitos forem mais gravosos que o limite máximo admitido pelas classes, o elemento é considerado como não classificável (NC). A norma UNI 11035-2:2003 apresenta também valores indicativos para a caracterização mecânica de diferentes espécies.

É de salientar que os valores indicados por estas duas normas para as propriedades mecânicas são distintos sendo que a UNI 11035 sugere valores característicos enquanto a UNI 11119 apresenta valores máximos de cálculo admissíveis (Branco & Lourenço, 2014).

A classe de resistência é atribuída tendo em conta o pior desempenho do elemento de madeira perante os defeitos e outras singularidades. Deste modo, Branco, Piazza & Cruz (2010) referem que a classificação visual é com base na avaliação de defeitos locais, mas o resultado é a atribuição de uma classe de resistência ao elemento de madeira, pelo que corresponderá sempre a uma avaliação condicionada pelas secções críticas, com um maior número de defeitos.

3.2. Ensaios não-destrutivos

Os ensaios não-destrutivos permitem inferir a sobre propriedades físicas e mecânicas de um dado elemento estrutural sem alterar as suas propriedades.

A inspeção visual deverá, sempre que possível, ser complementada com ensaios não-destrutivos para validar os resultados obtidos. Por outro lado, antes da realização de ensaios não-destrutivos deverá ser realizada uma inspeção visual para determinar onde estes deverão ser realizados tendo em conta a natureza local de medição destes ensaios.

O ensaio realizado deverá ser o menos invasivo possível de forma a preservar a integridade da estrutura e aparência estética dos elementos (Branco & Sousa, 2014).

Em materiais homogêneos e isotrópicos, tais como, metais, plásticos e cerâmicas a principal função do NDT é detetar defeitos de fabricação, como a presença de descontinuidades ou vazios. Porém, na madeira os defeitos são naturalmente presentes e pode facilmente ser induzida por agentes de degradação ambientais, portanto, neste caso, NDT também tem que explicar como os defeitos naturais e ambientais ou patologias afetam as propriedades mecânicas do elemento estrutural.

Atualmente existem vários ensaios não-destrutivos e tende a desenvolver pois possibilita uma inspeção mais precisa e devido também ao aumento de recursos empregues na reabilitação de estruturas de madeira existentes.

3.2.1. Resistência à penetração por impacto - Pilodyn

O ensaio de resistência à penetração por impacto consiste na libertação de um pino metálico com um diâmetro pré-definido contra a superfície de madeira através de uma força dinâmica. A força dinâmica resulta do relaxamento de uma mola que se encontra comprimida no equipamento, denominado Pilodyn. Portanto, o processo de ensaio é influenciado pelo operador do equipamento, sendo que a libertação da mola instiga à transformação de energia potencial em energia de impacto.

O Pilodyn® é um aparelho comercial baseado nos princípios do trabalho de Ronca e Gubana (1998), sendo constituído por uma agulha de 2,5 mm de diâmetro que é impulsionada através

de uma mola contra a peça de madeira, verificando-se a profundidade de penetração. O aparelho de Ronca e Gubana (1998) difere do Pilodyn® pelo facto de serem efetuadas um determinado número de pancadas em vez de uma, pelo que é razoável admitir que os resultados obtidos por estes investigadores são válidos para o Pilodyn, com as devidas alterações.

Existem diversas versões deste dispositivo que podem ser usadas em inspeções: o Pilodyn 6J é o aparelho mais comumente utilizado, enquanto o Pilodyn 12J e o Pilodyn 18J, possuem uma mola com uma rigidez mais elevada, e o Pilodyn 4JR permite um tiro repetido.

A utilização do equipamento é simples, o aparelho deve ser colocado perpendicularmente à superfície da madeira em análise de forma a encostar os dois pernos metálicos que possui na ponta na face do elemento.

O ensaio com o Pilodyn permite unicamente uma avaliação local e superficial do elemento, pelo que se torna necessário ter em consideração a variabilidade natural da dureza da madeira. Portanto, é recomendado realizar três medições no espaço de 5 cm, na direção perpendicular ao alinhamento do fio, e efetuar a sua média. Apesar de identificar zonas de menor qualidade de madeira, este ensaio não permite discernir sobre a origem de uma maior penetração na madeira (Sousa *et al.*, 2014).

A profundidade de penetração do pino metálico é usualmente considerada inversamente proporcional à densidade do elemento (Görlacher, 1987). A profundidade de penetração pode também ser utilizada como indicador de diferentes fases de degradação, desde que os seus resultados sejam comparados com resultados a zonas não afetadas por degradação (Sousa, Branco & Lourenço, 2014). O uso mais comum do Pilodyn prende-se com a estimação da densidade da madeira, função da densidade (inerente a cada espécie de madeira), teor em água e direção de penetração (Brites, 2011).

Assim, após a devida calibração do Pilodyn para determinada espécie de madeira, pode obter-se uma relação entre a profundidade de penetração e a densidade, para valores do teor em água e direção de penetração conhecidas. Contudo, existem valores para correção da profundidade de penetração tendo em consideração se a medição foi estabelecida na horizontal ou vertical. Caso o objetivo seja avaliar a qualidade da madeira sã, a camada superficial deverá ser removida antes de se proceder às medições. É importante referir que a profundidade de penetração é significativamente afetada pela humidade.

Desta forma, os ensaios de resistência à penetração por impacto resultam na definição de mapas de dano tendo em conta a profundidade de penetração obtida, permitindo a aferição qualitativa sobre a secção efetiva dos elementos.

3.2.2. Resistência à perfuração controlada

O ensaio à resistência à perfuração controlada é baseada na micro-perfuração da madeira a uma velocidade constante de corte por uma agulha de pequeno diâmetro, por rotação, medindo a energia necessária no processo. Geralmente este processo é adotado para obtenção de perfis de densidade pois permite a caracterização total da secção transversal da amostra (Rinn, Schweingruber & Schär, 1996). Dependendo da variação relativa (aumento ou diminuição), este método permite inferir sobre os defeitos internos do elemento de madeira, assim como, os vazios internos, fendas e degradação biológica (superficial e/ou interna) (Sousa *et al.*, 2014).

O equipamento Resistograph® foi desenvolvido na Alemanha com a finalidade de executar análises *in situ* do lenho das árvores, postes e estruturas de madeira. O Resistograph® surge inicialmente como um sistema de medição de fácil utilização, robusto e preciso para deteção de defeitos internos na madeira. O método utilizado é baseado na medição da resistência da madeira à penetração de uma agulha inserida com movimentação constante (Gantz, 2002).

Segundo Rinn *et al.* (1996), o conceito do aparelho é muito simples: uma agulha muito fina (3 mm de diâmetro) de aço de alta qualidade, é direcionada para o interior da madeira a uma predeterminada velocidade, dependendo da espécie de madeira, e do modelo empregado. Quando a agulha atravessa a madeira a uma velocidade constante, encontra intensidades diferentes de resistência, a resistência oferecida neste processo é medida consoante a sua progressão. Essa resistência reflete, desta forma, a condição estrutural das paredes celulares, as variações entre o lenho inicial e tardio nos anéis de crescimento, a espécie da madeira e o seu desenho típico (por exemplo, anéis difusos ou porosos), e a forma como a árvore se tem desenvolvido em resposta às condições ambientais.

No processo de penetração da agulha no elemento de madeira os sensores medem e registam a variação da resistência da madeira. Os valores de profundidade de penetração e a amplitude de resistência são registados eletronicamente e simultaneamente impressos em papel,

produzindo um gráfico à escala 1:1 e gravação para um ficheiro de dados, para uma posterior análise.

Os resultados obtidos através do resistógrafo podem ser utilizados para a determinação da deterioração em profundidade por variação de resistência em profundidade, sendo que as maiores densidades da madeira equivalem a maiores resistências de perfuração. Após calibração para determinada espécie de madeira, teor de água e velocidade de penetração, este ensaio pode ser utilizado para estimar a densidade do material, relacionando a designada medida do resistográfica, RM com a densidade. O valor da medida resistográfica (MR) exprime a resistência média por unidade de perfuração (Feio, 2005). Esta grandeza corresponde à relação entre o integral da área do perfil de resistência à perfuração e o comprimento de perfuração, h (3.1):

$$MR = \frac{\int_0^h \text{Área}}{h} \quad (3.1)$$

A pequena dimensão da agulha confere aos resultados obtidos um carácter local, devendo desta forma efetuar-se várias perfurações para obter uma resposta global. A precisão deste ensaio poderá diminuir para elementos de maior espessura (maiores percursos de perfuração) devido ao aumento de fricção lateral da agulha, sendo possível o desvio na direção de perfuração. Para averiguação do estado de degradação de determinada peça, e dado que o aparelho apenas fornece uma medida da resistência necessária para a agulha progredir, é necessário a sua calibração numa secção sã para comparação com as zonas hipoteticamente degradadas.

O dispositivo contém dois motores: um para a alimentação constante e um para a rotação da agulha. O operador deve posicionar-se de forma a evitar movimentos do resistógrafo, que podem conduzir a incorreções nos resultados. Salienta-se que o teor de humidade da madeira tem uma grande influência nos valores de densidade, tendo (Machado & Cruz, 1997) observado que a resistência à penetração diminui com o aumento do teor de humidade.

Importa ainda referir que a utilização deste aparelho é considerada semi-destrutiva, na medida em que somente provoca furos de pequeno diâmetro. Desta forma, a resistência da madeira à penetração da agulha do resistógrafo possibilita a identificação, com razoável clareza e alguma rapidez, o perfil diametral do elemento de madeira inspecionado.

O método de perfuração à resistência é atualmente um dos métodos mais usados para avaliação de estruturas de madeira existentes sendo diversos os estudos de caso que o implementam. A técnica é aplicada em condições laboratoriais controladas em elementos retirados do local da construção (Sousa *et al.*, 2013), assim como em elementos *in situ* (Medeiros *et al.*, 2010).

3.2.3. Ultrassons

O método ultrassónico consiste na emissão de ondas sonoras de alta frequência, acima da gama audível, em que para a madeira variam entre 20 a 500 kHz (Feio, 2007). Desta forma, o ensaio de ultrassons consiste na medição da velocidade de propagação de ondas sónicas através de um meio sólido. A medição efetuada permite estudar o coeficiente de atenuação do elemento em causa e relacionar esse parâmetro com outras características mecânicas, tais como densidade e rigidez.

Relativamente à posição das sondas (sonda emissora e sonda recetora) existem diferentes configurações de medição. Quando as sondas são colocadas na mesma face do elemento trata-se de uma medição indireta, enquanto que quando as sondas são colocadas em faces paralelas sobre a mesma linha reta trata-se de uma medição direta. No entanto, existe também a possibilidade de medições semidirectas.

A medição de propagação de onda é influenciada por diversos fatores como a frequência de onda, a pressão aplicada pelo utilizador, o contacto entre transdutores e o elemento, assim como a natureza do material de acoplamento (Bucur & Böhnke, 1994). A variabilidade natural da madeira e a presença de defeitos acrescenta incerteza e dispersão de às medições (Oliveira *et al.*, 2015).

Os defeitos da madeira são obstáculos à propagação das ondas ultrassónicas e quanto maior a quantidade e significância desses defeitos maior será a perda de intensidade.

A primeira consideração em relação ao método é a definição da frequência de onda a utilizar, o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência de onda e desempenha um papel importante nessa escolha. Em geral, os defeitos menores que possuam metade do comprimento de onda do sinal não são detetados, por outro lado, em frequências mais altas

(com menor comprimento de onda) verifica-se uma maior capacidade de deteção de defeitos menores, no entanto apresentam também maior atenuação.

Quando o objetivo é detetar descontinuidades de grandes dimensões deverá ser adotada uma frequência mais baixa, principalmente se for também requerida maior penetração da onda ultrassónica. Quando é pretendido a análise de elementos com aparente degradação superficial ou com superfícies rugosas é aconselhado o uso de sondas de contato pontual (exponenciais) (Sousa *et al.*, 2014).

A velocidade de propagação de onda permite relacionar o módulo de elasticidade estático com o módulo de elasticidade dinâmico. Considerando a distância entre o centro de cada transdutor (comprimento de percurso da onda d_o) e o tempo (t) que a onda sónica necessita para viajar do transdutor de emissão até ao transdutor de receção, foi possível calcular a velocidade de propagação da onda v_p pela seguinte equação:

$$v_p = \frac{d_o}{t} \quad (3.2)$$

3.3. Conclusões

A madeira é um material utilizado na construção que se caracteriza por apresentar uma grande variabilidade relativamente às propriedades físicas e mecânicas. O primeiro passo da avaliação de uma estrutura de madeira existente corresponde à inspeção e diagnóstico, este passo é crucial para identificar possíveis secções frágeis e, assim, melhorar a compreensão do comportamento mecânico da estrutura.

Um diagnóstico preciso e profundo do desempenho de uma estrutura deve ser constituído por evidências documentais/históricas, inspeções e análises estruturais, para uma avaliação mais completa deve ser complementada com ensaios não-destrutivos. Os ensaios deverão ser o menos invasivos possível de forma a manter a integridade da estrutura. No entanto, devido à variabilidade, e por vezes natureza somente qualitativa dos resultados obtidos é necessário considerar diferentes ensaios não-destrutivos de modo a complementar as análises.

A inspeção visual permite a atribuição de valores de tensão para obtenção das propriedades de referência e a sua correlação com outras propriedades, permitem a caracterização mecânica do material. Existem poucas normas para classificação visual de elementos pertencentes a estruturas existentes em que se destacam as normas italianas.

Capítulo 4

Inspeção e Diagnóstico de Duas Asnas

Os elementos integrantes da Asna 1 foram submetidos a inspeção e diagnóstico em laboratório enquanto os elementos integrantes da Asna 2 apenas foram submetidos a inspeção visual.

Em laboratório encontravam-se os restantes elementos constituintes de outras asnas pertencentes à mesma cobertura. Deste modo, três desses elementos foram inspecionados e diagnosticados e, posteriormente submetidos a ensaios à flexão de forma a obter as propriedades mecânicas do material. Perante esta análise efetuou-se a correlação das propriedades do material destes elementos para os elementos constituintes das asnas.

Neste contexto, no presente capítulo apresentam-se as diferentes fases, procedimentos e resultados obtidos na inspeção visual e nos ensaios não-destrutivos realizados em duas asnas recuperadas. Por fim, apresentam-se os resultados dos ensaios à flexão e respetiva correlação com os elementos integrantes das asnas.

4.1. Inspeção visual

4.1.1. Aspectos Gerais

Os elementos foram inspecionados visualmente e classificados em conformidade com os critérios preconizados pela norma italiana UNI 11119:2004. Esta norma aborda a análise *in situ* de elementos de madeira pertencentes a estruturas, pelo que detém uma maior tolerância em termos de limitação de defeitos em comparação com normas que visam madeira nova, à saída da serração, como é exemplo a NP 4305:1995. De uma forma geral, é possível concluir que a norma italiana, ao ser menos severa, e mais adequada para elementos pertencentes a estruturas existentes, indica que a maioria dos elementos avaliados apresentam boas condições de utilização.

Tendo em consideração que os elementos de madeira em análise são da espécie Pinho de Riga (“*Pinus sylvestris*”), pertencem ao grupo de coníferas de tipo 1 segundo a norma UNI 11119:2004 de classificação visual utilizada.

O facto de a inspeção ter sido realizada em laboratório, tornou possível avaliar todas as faces dos elementos constituintes da asna – ver Figura 4.1. Cada face foi dividida e analisada em secções afastadas de 40 cm e os defeitos presentes, em cada face, foram localizados, medidos e mapeados.

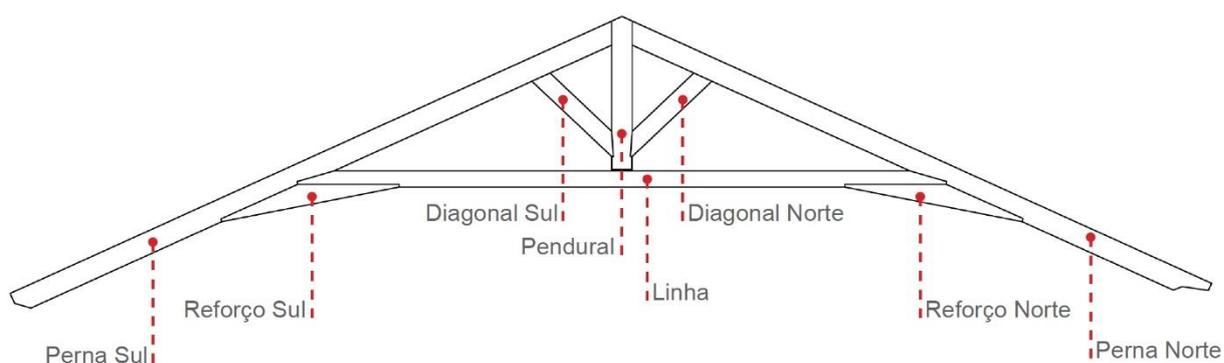


Figura 4.1 – Designação dos elementos constituintes da asna

Como referido por Sousa *et al.* (2012) e Cavalli & Togni (2011), os parâmetros aferidos por uma inspeção visual que podem mais significativamente influenciar as propriedades mecânicas de um elemento de madeira são os nós e o desvio do alinhamento do fio. No presente estudo foram considerados esses parâmetros, bem como, o descaio tendo em

consideração a importância de atender à geometria dos elementos ao longo da sua extensão, atendendo ao significativo grau de degradação visível.

Tendo em consideração os critérios de classificação visual definidos na norma UNI 11119:2004 (UNI, 2004), e atendendo à presença e características dos defeitos, esta prevê três classes: I, II, III. Para cada classe são definidos limites tendo em conta a importância e a severidade de um determinado defeito, sendo que elementos sem defeitos ou com defeitos de menor relevância são classificados com classe I. Conforme se verifique uma maior presença de defeitos será necessário diminuir a classificação de classe I para II, ou para classe III no caso de defeitos mais significativos. No presente trabalho, sempre que os limites normativos para a classe III não eram respeitados devido à presença de um defeito mais significativo, foi considerada uma denominação de não classificável (NC).

Para análise da influência de um determinado defeito, foi considerado uma diferenciação entre defeitos conforme os limites propostos para classificação do elemento. Assim, um determinado defeito foi classificado como I, II ou III caso se encontre dentro dos limites impostos pela norma aplicada para as respectivas classes, ou como NC caso não respeitasse os limites impostos para a classe III.

Seguidamente, são apresentados os métodos de medição aplicados para os diferentes defeitos considerados na classificação visual.

4.1.2. Caracterização geométrica

O primeiro passo da inspeção visual consistiu em obter a secção geométrica dos elementos. Para tal, no início e no fim de cada segmento de 40 cm, foi efetuada a medição utilizando uma fita métrica. A medição do descaio foi efetuada com o auxílio de um esquadro de lâmina e consistiu em medir o máximo descaio ao longo do segmento sendo que, por segurança, se considerou que o maior valor do descaio seria representativo desse segmento. A utilização destas ferramentas permitiu assim definir a geometria de cada secção transversal analisada.

O descaio foi determinado através da relação S_w entre a dimensão oblíqua da aresta e a altura da secção transversal. Nas situações em que os catetos do descaio fossem inferiores a 0,5 cm, desprezou-se este parâmetro já que não interferia na classificação devido ao seu valor reduzido.

Na Figura 4.2 esquematiza-se um exemplo com a caracterização geométrica em duas secções consecutivas. As duas secções do exemplo apresentam descaio em duas arestas, em que para a classificação visual considerou-se o mais gravoso, ou seja, valor de k maior. Na secção S0, $S_w = 48,3/40 = 1,21$ e em S1 $S_w = 48,3/100 = 0,48$ o que significa que em ambas as secções o descaio é superior às condições requeridas pela Norma UNI 11119:2004 (UNI, 2004), o que leva a considerar ambas as secções como não classificáveis (NC).

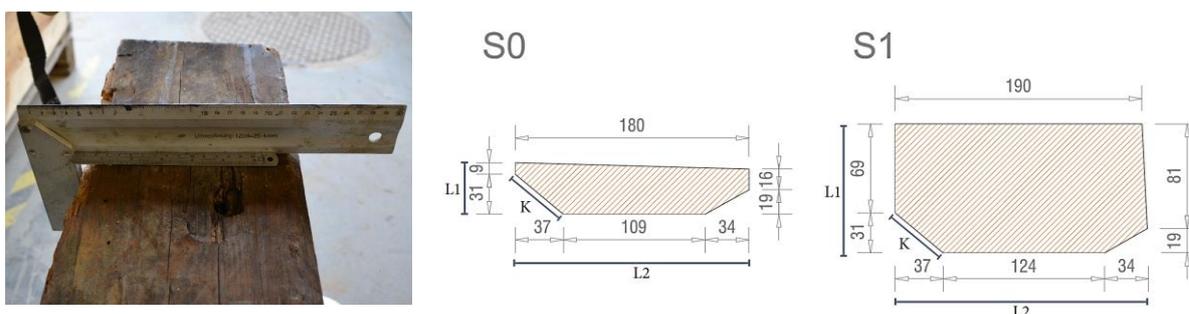


Figura 4.2 – Exemplo da caracterização geométrica em duas secções consecutivas

A caracterização geométrica das secções de todos os elementos constituintes das duas asnas representa-se no Anexo 4.

4.1.3. Medição dos Nós

A medição dos nós foi efetuada em todas as faces dos elementos. De acordo com a Norma UNI 11119:2004 (UNI, 2004) utilizada, existem nós isolados ou nós agrupados caso estes últimos se encontrem a uma distância entre centros inferior ou igual a 150 mm ou até que as fibras entre os nós não tenham retomado a sua direção inicial.

Os nós isolados foram avaliados considerando o parâmetro A_d que relaciona o diâmetro mínimo do nó (d) com a largura da face onde este se encontra, enquanto os nós agrupados foram avaliados considerando o parâmetro W_d que relaciona a soma de todos os diâmetros mínimos e a largura da face do elemento onde se encontram os nós.

Na medição dos nós ficou patente o carácter subjetivo da inspeção visual materializada por uma grande variabilidade na configuração, diâmetro e medição dos nós. Neste sentido, na Figura 4.3 apresentam-se exemplos de como foi efetuada a medição para diferentes nós encontrados. Na Figura 4.3a) apresenta-se um nó isolado em que a medição do diâmetro mínimo foi efetuada na direção ortogonal ao diâmetro maior. Na Figura 4.3 b) encontra-se

um nó de aresta, ou seja, manifesta-se em duas superfícies contíguas, assim, o nó foi considerado em ambas as faces e a medição do diâmetro menor foi efetuada nas duas faces ortogonalmente à direção do diâmetro maior. Na Figura 4.3c) apresenta-se um nó irregular no qual, tal como se pode observar na figura a título de exemplo, se explica como se delimitou o nó, se mediu o nó menor ortogonalmente ao diâmetro maior.

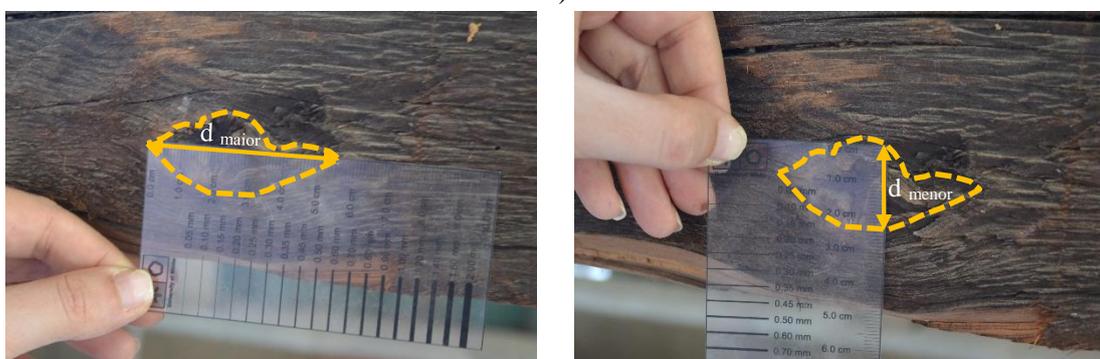
Na Figura 4.3d) expõe-se um exemplo da medição dos nós agrupados sendo que a medição dos diâmetros menores dos dois nós foi também efetuada na direção ortogonal ao diâmetro maior.



a)

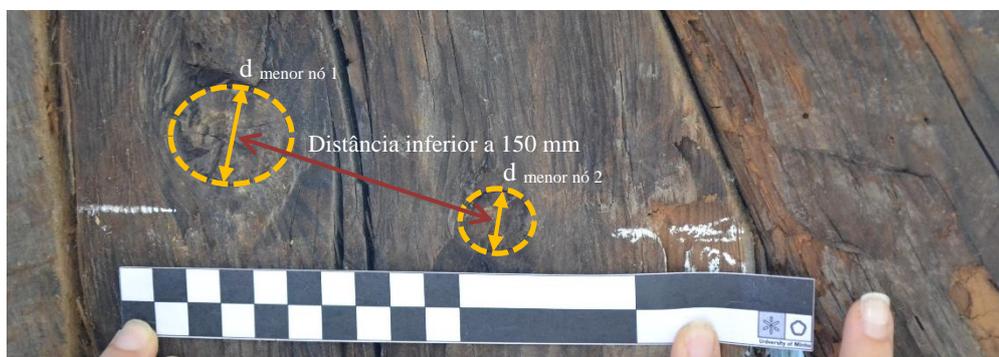


b)



c)

Figura 4.3 – Exemplo da medição de diferentes nós: a) Nó isolado; b) Nó de aresta; c) Nó irregular; d) Nós agrupados



d)

Figura 4.3 (continuação) – Exemplo da medição de diferentes nós: a) Nó isolado; b) Nó de aresta; c) Nó irregular; d) Nós agrupados

4.1.4. Medição da inclinação do fio

A inclinação do fio foi medida tendo por base a inclinação das fendas de secagem em relação ao eixo longitudinal do elemento. Esta inclinação foi medida em todas as faces do elemento numa zona afastada de nós ou outros defeitos que causem desvios localizados das fibras.

A inclinação do fio é expressa pelo quociente entre o desnível da inclinação do fio (BC) e o comprimento medidos na direção longitudinal do elemento (AB) (ver Figura 4.4). Nos casos em que a inclinação do fio apresenta valores diferentes nas distintas faces, foi considerado o valor da inclinação maior, por ser mais conservador.

Nos casos em que a inclinação do fio era reduzida, a mesma foi classificada apenas por observação. Nos restantes casos, recorreu-se a um aristo para efetuar a medição.

A inclinação do fio, uma vez que se trata de vigas, foi classificada tendo em consideração os limites impostos pela direção tangencial (direção longitudinal das fibras).

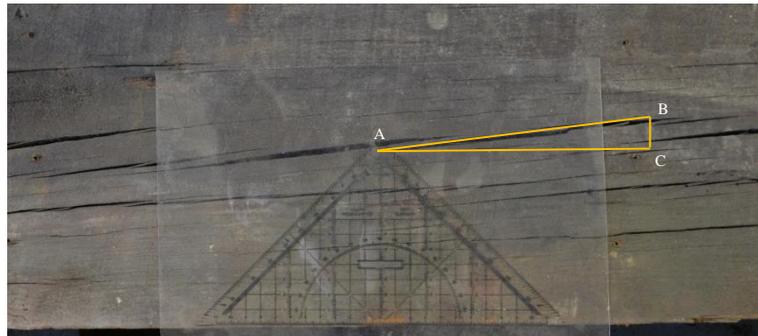


Figura 4.4 – Exemplo da medição da inclinação do fio

4.1.5. Inspeção visual Asna 1

4.1.5.1. Geometria

A Asna 1 é constituída por elementos com comprimentos muito díspares, variando entre 1,44 m e 7,92 m, com um valor médio de 4,23 m. O elemento com menor comprimento é a Diagonal Sul e o elemento com maior comprimento é a Perna Sul. Inicialmente a Perna Sul tinha mais 3 cm que a Perna Norte concluindo-se que esta diferença pode ter ocorrido devido à degradação ou por causa de ajuste na construção original. Todavia, para o ensaio, os apoios foram refeitos, sendo que as pernas apresentavam comprimentos finais iguais. O processo de uniformização dos apoios foi efetuado por um carpinteiro, tal como se ilustra na Figura 4.5.



Figura 4.5 – Processo de uniformização dos apoios: a) antes da intervenção; b) após a intervenção do carpinteiro

Na Tabela 4.1 é possível consultar-se os resultados do valor médio e do coeficiente de variação (CoV) da geometria nos diferentes elementos da Asna 1. Assim é possível concluir-se que a Diagonal Norte é o elemento que apresenta uma menor variabilidade geométrica visto que apresenta um valor médio de 210 mm com $CoV = 2,6 \%$ para a altura e 185 mm com $CoV = 0 \%$ para a largura. O elemento que apresenta uma maior variação em altura é a Linha com um valor médio de 222 mm com $CoV = 7,1 \%$ enquanto o elemento Perna Norte apresenta a maior variabilidade em largura com um valor médio de 184 mm com $CoV = 4,1 \%$.

A alteração da geometria nos elementos de madeira constituintes da asna é consequência da degradação por ataque de insetos xilófagos. Neste tipo de insetos, o processo de degradação inicia a perda de área junto do perímetro da secção transversal e posteriormente progride até ao seu interior. Ao contrário do que acontece noutros materiais, o único efeito provocado pela degradação é a redução da secção geométrica pois as propriedades mecânicas das áreas intactas não são afetadas (Sousa, Lourenço & Neves, 2010).

Na sua globalidade, os elementos apresentam uma variabilidade geométrica baixa. Tal facto deve-se porque a base de referência é a secção transversal total. Ou seja, se a abordagem se referisse à secção transversal efetiva, haveria uma variabilidade bastante mais elevada em resultado, principalmente, do processo de corte inicial dos elementos. Por outro lado, o nível e tipo de degradação detetada leva a uma significativa perda de integridade da secção transversal durante o tempo de vida da estrutura. Portanto, neste estudo, a variabilidade geométrica não foi considerada como um parâmetro limitante para a classificação visual.

É de salientar que nas Tabela 4.1 e Tabela 4.2 não se apresentam os valores médios e o coeficiente de variação (CoV) dos elementos Pendural, Reforço Sul e Reforço Norte, porque estes elementos apresentam uma secção transversal desde logo variável ao longo do seu comprimento de forma a acomodar as ligações com outros elementos da asna.

Tabela 4.1 – Resultados do valor médio e do coeficiente de variação (CoV) da geometria nos elementos constituintes da Asna 1

	Altura		Largura	
	Média (mm)	CoV (%)	Média (mm)	CoV (%)
Perna Sul	272	2,8	188	1,6
Perna Norte	275	3,8	184	4,1
Linha	222	7,1	186	1,7
Pendural	-	-	193	1,0
Diagonal Sul	259	4,6	194	0,7
Diagonal Norte	210	2,6	185	0,0
Reforço Sul	-	-	186	4,1
Reforço Norte	-	-	190	1,4

4.1.5.2. Classificação visual

O elemento Perna Sul é constituído maioritariamente por segmentos da Classe I, 79 %, os restantes segmentos são de Classe II, 10,5 % e de Classe III, 10,5 %. Devido à presença de descaio em grandes dimensões em dois segmentos, o elemento recai numa classe mais baixa, Classe III.

O elemento Perna Norte apresenta descaio ao longo do elemento total sendo maioritariamente de Classe III, 58 %, com o restante em Classe II, 42 %. Neste contexto, o elemento é classificado como Classe III pois é a classificação mais baixa do elemento.

Relativamente ao elemento Linha, este apresenta uma inclinação do fio na face superior de 11 % classificada como Classe II sendo por isso, o elemento maioritariamente constituído por Classe II, 61 %. A inspeção visual indica ainda que há segmentos que apresentam descaio classificado como Classe III, 39 %. Apesar de verificar uma maior percentagem de segmentos de Classe II, como a Classe III é mais baixa, o elemento é considerado como Classe III.

O elemento Pendural apresenta descaio na totalidade do elemento classificado de Classe II, 100%.

A Diagonal Sul apresenta na face frontal uma inclinação do fio de 14 % correspondente à Classe II, o que a coloca totalmente na Classe II, 100 %.

A Diagonal Norte é o elemento constituinte da Asna 1 que apresenta na parte inferior do elemento um valor de inclinação do fio maior, 17 %. Este valor leva a que este elemento seja maioritariamente constituído por segmentos de Classe II, 67 %. Além da inclinação do fio, o elemento apresenta um nó com dimensões classificáveis como Classe III em 33 % do seu comprimento. Assim, devido à presença de um defeito local, o elemento recai na Classe III.

O Reforço Perna-Linha Sul contém, em dois segmentos, descaio com dimensões não permitidas nos parâmetros estabelecidos pela norma italiana UNI 11119:2004 (UNI, 2004) pelo que o elemento considera-se como não classificável (NC), 33 %.

O elemento Reforço Perna-Linha Norte é composto maioritariamente por segmentos de Classe I, 66,7 %, contudo possui um nó de Classe III e um nó não classificável. Deste modo, devido à existência do nó, o elemento Reforço Perna-Linha Norte não se enquadra nas restrições estabelecidas pela norma aplicada, considerando-se assim não classificável (NC).

Analisando a Figura 4.6a) é possível verificar que a Asna 1 é composta maioritariamente por segmentos de Classe II, 48 % dos segmentos, seguindo-se a Classe III, 27 % dos segmentos e a Classe I, 22 % dos segmentos. Verifica-se também que 3% dos segmentos não se enquadram nos parâmetros estabelecidos pela norma aplicada UNI 11119:2004 (UNI, 2004) pelo que são classificados como não classificáveis (NC).

Na Figura 4.6b) é possível observar a disposição das diferentes classes para os segmentos constituintes da asna.

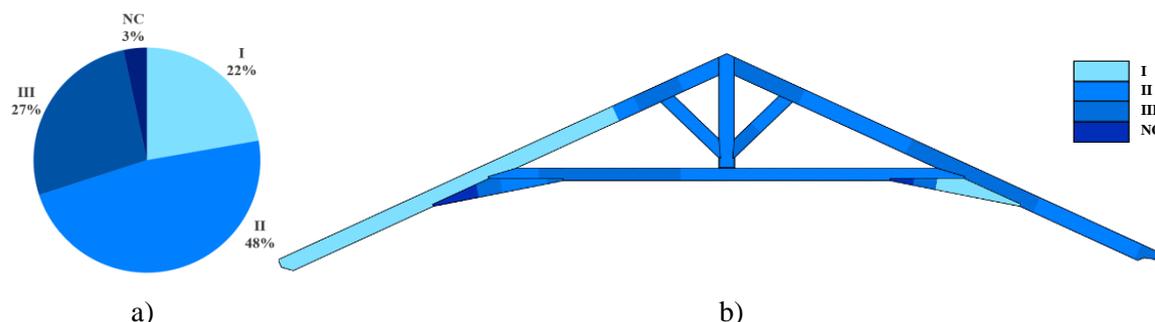


Figura 4.6 – Resultados da classificação visual da Asna 1 de acordo com a UNI 11119 (UNI, 2004): a) distribuição percentual dos segmentos em cada classe; b) classificação por segmento

4.1.6. Inspeção visual Asna 2

4.1.6.1. Geometria

A definição da geometria de cada secção transversal analisada foi determinada usando o mesmo método descrito na Asna 1.

A Asna 2 é composta por elementos com comprimentos que variam entre 1,44 m e 7,77 m, com um valor médio de 4,23 m. O elemento com menor comprimento é a Diagonal Sul e o elemento com maior comprimento é a Perna Norte. Salienta-se que as pernas da Asna 2 apresentam sensivelmente menos 15 cm que as pernas da Asna 1. Contudo, é de referir que a inspeção da Asna 2 foi realizada após o ensaio quando os apoios já se encontravam refeitos.

Na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados do valor médio e do coeficiente de variação (CoV) da geometria nos diferentes elementos da Asna 2. É possível constatar-se que o elemento Diagonal Norte apresenta uma menor variação em altura, com um valor médio de 220 mm e com $\text{CoV} = 0,9\%$, já o elemento Diagonal Sul apresenta uma menor variação em largura com um valor médio de 188 mm e com $\text{CoV} = 1,7\%$. O elemento Perna Norte apresenta uma maior variação em altura com um valor médio de 254 mm e com $\text{CoV} = 9,6\%$ e o elemento Reforço Norte exibe uma maior variação em largura com um valor médio de 189 mm $\text{CoV} = 3,4\%$. Globalmente, verifica-se que os elementos exibem uma variabilidade geométrica baixa, tal como sucede na Asna 1.

Tabela 4.2 - Resultados do valor médio e do coeficiente de variação (CoV) da geometria nos elementos constituintes da Asna 2

	Altura		Largura	
	Média (mm)	CoV (%)	Média (mm)	CoV (%)
Perna Sul	265	4,1	194	1,9
Perna Norte	254	9,6	187	2,4
Linha	208	7,9	193	2,8
Pendural	-	-	189	1,8
Diagonal Sul	214	1,1	188	1,7
Diagonal Norte	220	0,9	189	2,7
Reforço Sul	-	-	183	3,3
Reforço Norte	-	-	189	3,4

4.1.6.2. Classificação visual

Os segmentos do elemento Perna Sul apresentam descaio e nós que se classificam maioritariamente como Classe II, 38,9 %, mas também por Classe I, 33,3 %, e Classe III, 27,8 %. Como a Classe III é menos rigorosa classifica-se o elemento como sendo desta classe, pois consiste numa análise mais conservadora.

O elemento Perna Norte apresenta descaio na totalidade do elemento, classificado maioritariamente por segmentos de Classe III, 79 %, e por segmentos em que as proporções se encontram não classificáveis, 21 %, portanto, o elemento é não classificável (NC). Posto isto conclui-se que este elemento apresenta defeitos significativos que limitam a sua capacidade resistente.

O elemento Linha exhibe descaio quase na totalidade do elemento, sendo de Classe II, 33 %, Classe III, 33 %, Classe I, 22 % e não classificável, 11 %. Este elemento também apresenta nós de Classe I.

Relativamente ao elemento Pendural, este é composto por segmentos que contêm nós e descaio de Classe I, 60 %, e descaio de Classe II, 40 %. Apesar do elemento ser considerado de Classe II, visto que o Pendural é constituído maioritariamente por segmentos de Classe I, é possível concluir que contém madeira de boa qualidade.

O elemento Diagonal Sul apresenta descaio e nós de Classe II, 67 % dos segmentos, e um nó de Classe III, 33 % dos segmentos. Assim, devido à presença de um defeito local, o elemento é classificado em Classe III.

O elemento Diagonal Norte apresenta descaio em todos os segmentos de Classe II e num segmento contém um nó de Classe II. Logo a Diagonal Norte é categorizada como Classe II.

O elemento Reforço Perna-Linha Sul é constituído maioritariamente por segmentos de Classe II, 50 %, devido à presença de descaio e nós da mesma classe. No que respeita às restantes classes, apresentam defeitos locais, por isso, encontram-se igualmente distribuídas, Classe I, 16,7 %, Classe III, 16,7 %, e não classificável (NC), 16,7 %. Por conseguinte, devido à presença de um defeito pontual, o elemento obteve uma classificação de NC.

O elemento Reforço Perna-Linha Norte é constituído maioritariamente por segmentos de Classe I, 50 %. Contudo, apresenta um segmento com descaio de Classe II, 16,7 % e segmentos com nós de Classe III, 33,3 %. Assim, o elemento é considerado de Classe III.

Na Figura 4.7a) é possível conferir que a classificação dos segmentos da Asna 2 se encontra dispersa pelas diferentes Classes com percentagens muito próximas. A asna é composta maioritariamente por segmentos de Classe III, 35 %, seguida por elementos da Classe II, 33 % dos segmentos, e Classe I, 23 % dos segmentos. Destaca-se também que 9% dos segmentos não se enquadram nos parâmetros estabelecidos pela norma aplicada (UNI, 2004) e são assim categorizados como não classificáveis (NC).

Na Figura 4.7b) é possível observar a disposição das diferentes classes para os segmentos constituintes da asna.

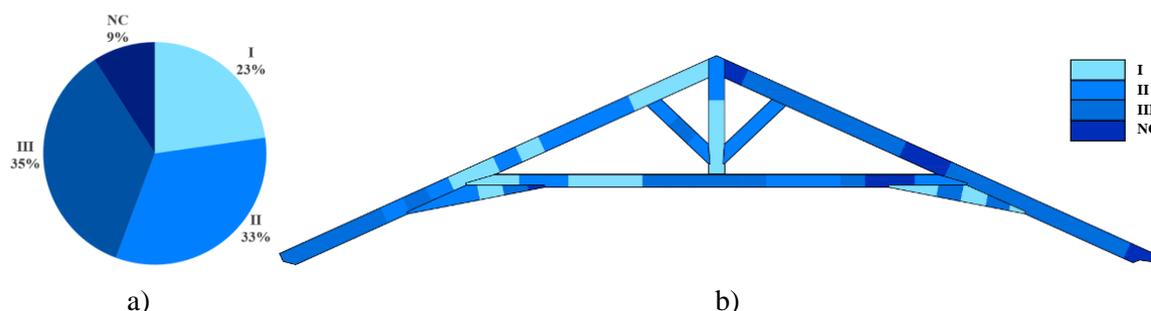


Figura 4.7 - Resultados da classificação visual da Asna 2 de acordo com a UNI 11119: 2004 (UNI, 2004): a) distribuição percentual dos segmentos em cada classe; b) classificação por segmento

4.1.7. Comparação da Inspeção Visual da Asna 1 e Asna 2

Ao longo do comprimento dos elementos de madeira destaca-se a variabilidade de anomalias e defeitos, tanto em quantidade como em tamanho.

A classificação de cada elemento foi realizada considerando a pior classificação encontrada nos vários segmentos constituintes desse elemento. Na Tabela 4.3 encontram-se as classificações obtidas para os elementos das asnas analisadas. No Anexo 1 apresentam-se em pormenor as tabelas de descrição dos defeitos encontrados e atribuição da classe de qualidade nos segmentos inspecionados.

Tabela 4.3 – Resultados da classificação visual de acordo com a norma UNI 11119 (UNI, 2004)

Elemento	Asna 1		Asna 2	
	Classe de Qualidade	Parâmetro restritivo	Classe de Qualidade	Parâmetro restritivo
Perna Sul	Classe III	Descaio	Classe III	Descaio; Nós
Perna Norte	Classe III	Descaio	Não Classificável	Descaio
Linha	Classe III	Descaio	Não Classificável	Descaio
Pendural	Classe II	Descaio; Inclinação do fio	Classe II	Descaio
Diagonal Sul	Classe II	Nós; Inclinação do fio	Classe III	Nós
Diagonal Norte	Classe III	Nós	Classe II	Descaio; Nós
Reforço Perna – Linha Sul	Não Classificável	Descaio	Não Classificável	Nós
Reforço Perna – Linha Norte	Não Classificável	Nós	Classe III	Nós

Observando a Tabela 4.3, é possível constatar que no que concerne à Asna 1, os elementos Pendural e Diagonal Sul pertencem à Classe II, os elementos Perna Sul, Perna Norte, Linha e Diagonal Norte pertencem à Classe III e o Reforço Perna-Linha Norte e Sul não são

classificáveis. O elemento Reforço Perna – Linha Sul não cumpre os critérios atribuídos ao descaio e, por isso, não é classificável enquanto o Reforço Perna – Linha Norte apresenta um nó que é superior às dimensões permitidas pela norma utilizada UNI 11119:2004 (UNI, 2004) sendo por isso, o elemento considerado como não classificável. No que respeita à Asna 2, é possível verificar que Pendural e a Diagonal Norte pertencem à Classe II, os elementos Perna Sul, Diagonal Sul e Reforço Perna-Linha Norte pertencem à Classe III e a Perna Norte, Linha e Reforço Perna-Linha Sul, são não classificáveis. O elemento Perna Norte e a Linha não cumprem os critérios impostos relativamente ao descaio e por isso, são não classificáveis. Já o Reforço Perna – Linha Sul apresenta um nó que é superior às dimensões permitidas pela norma utilizada sendo o elemento também não classificável.

A partir da Figura 4.8 é possível verificar que ambas as asnas não integram elementos de Classe I e que ambas apresentam a mesma percentagem de elementos de Classe II, 25 %. A classe que apresenta uma maior percentagem de elementos em ambas as asnas é a Classe III, 50 % Asna 1 e 37,5 % Asna 2. A Asna 2 apresenta um maior número de elementos, especialmente as vigas, não classificáveis, 37,5 %, em comparação com a Asna 1, 25 %.

Assim conclui-se que os elementos constituintes das asnas pertencem maioritariamente a classes baixas.

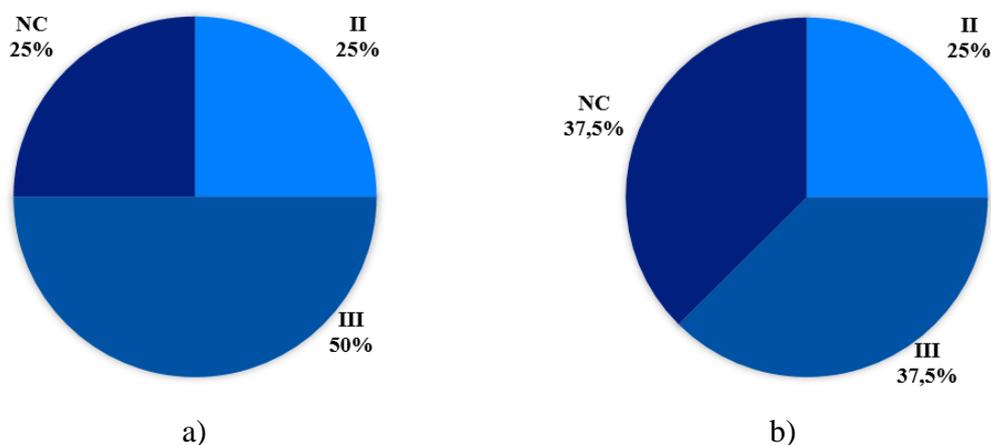


Figura 4.8 – Distribuição percentual dos elementos em cada classe de classificação visual de acordo com a UNI 11119:2004 (UNI, 2004): a) Asna 1; b) Asna 2

Analisando a Figura 4.9, é possível verificar que os defeitos com menor relevância, correspondentes à Classe I, que se encontram em maior abundância são os nós. No que se refere à Classe II, verifica-se que a inclinação do fio é o parâmetro mais presente na Asna 1 e o descaio é o defeito com maior presença na Asna 2. Para as classes mais baixas III e NC,

os defeitos mais frequentes foram o descaio e os nós em ambas as asnas, embora a Asna 2 apresente uma percentagem mais considerável de segmentos não classificáveis devido à presença de descaio.

Os nós classificados com Classe I, seguidos da inclinação do fio de Classe II, em particular na Asna 1, são claramente os defeitos mais visíveis.

Em suma, a Asna 2 detém mais secções críticas comparativamente com a Asna 1, principalmente no que respeita à quantidade de nós e dimensão do descaio.

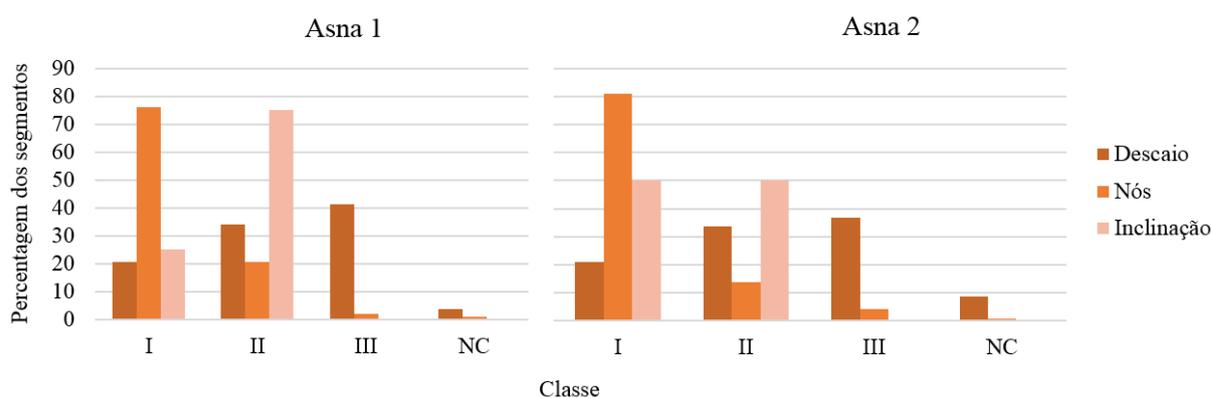


Figura 4.9 – Distribuição percentual dos defeitos nas duas asnas

4.1.8. Mapeamento de Fendas

A profundidade das fendas foi medida e mapeada em todas as faces dos elementos. No Anexo 1 pode ser consultado na íntegra o mapeamento de fendas executado nas faces de todos os elementos constituintes da Asna 1. O mapeamento consiste na identificação das fendas definindo a sua extensão e profundidade. A profundidade representa-se por uma escala com intervalo de 19 mm. De referir que as fendas com profundidades abaixo de 5 mm não foram mapeadas.

Globalmente verifica-se que a Perna Norte é o elemento que apresenta menos fendas e as Diagonais são os elementos que detêm um maior número de fendas. Todavia, o elemento Pendural apresenta fendas com maiores profundidades, com uma profundidade máxima medida de 71 mm. O elemento de reforço Perna-Linha Norte é o único elemento que possui fendas repassadas em ambas as ligações.

Na Tabela 4.4 apresenta-se a análise executada, expondo a dimensão da fenda com maior extensão, com maior largura ou com maior profundidade, verificada em cada elemento.

Tabela 4.4 – Fenda com maior dimensão por elemento

Elemento	Maior extensão (mm)	Maior Largura (mm)	Maior Profundidade (mm)
Perna Norte 	379	3,5	21
Perna Sul 	959	10	37
Linha 	623	11	64
Pendural 	503	15	71
Diagonal Norte 	414	7	45

Tabela 9 (continuação) – Fenda com maior dimensão por elemento

Elemento	Maior extensão (mm)	Maior Largura (mm)	Maior Profundidade (mm)
Diagonal Sul 	418	11	49
Reforço Perna – Linha Norte 	543	4,6	40
Reforço Perna – Linha Sul 	512	7	40

4.2. Ensaios não-destrutivos

4.2.1. Ensaio de resistência à penetração por impacto

O ensaio de resistência à penetração por impacto foi realizado com recurso ao equipamento Pilodyn 6J® que possui um pino metálico com 2,5 mm de diâmetro. O funcionamento do equipamento consiste na introdução de um pino metálico na madeira através da libertação de uma mola de rigidez conhecida que transforma a energia potencial elástica em energia de impacto (Feio & Lourenço, 2005a), Figura 4.10a) e 10b). O resultado é lido no mostrador do aparelho enquanto este se encontra pressionado contra a madeira, sendo a escala de leitura de 0 a 40 mm Figura 4.10 c).



a)



b)



c)

Figura 4.10 - Pilodyn: a) Equipamento; b) Exemplo de utilização; c) Escala de leitura

Tendo em consideração que um elemento de madeira apresenta dureza variável ao longo do seu desenvolvimento, e visto que este ensaio apenas permite uma avaliação local e superficial, a profundidade de penetração foi medida nas quatro faces e nas seções definidas anteriormente na caracterização geométrica, ver Figura 4.11.

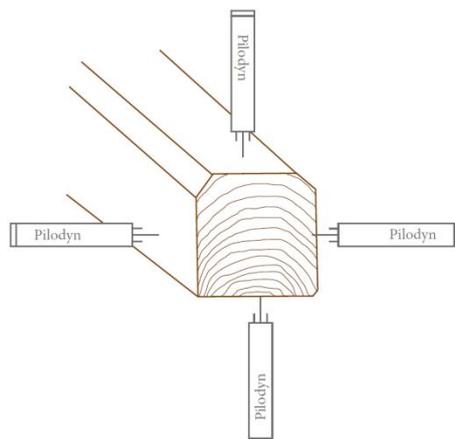


Figura 4.11 – Esquema representativo do ensaio de resistência à penetração por impacto

Os elementos foram analisados em segmentos com 40 cm de extensão, sendo que se efetuaram cinco medições na sua direção longitudinal. Com a finalidade de correlacionar os resultados obtidos pelo Pilodyn com os resultados obtidos pelo Resistógrafo®, a cada segmento de 40 cm foram efetuados três ensaios transversalmente à secção. O esquema de medições efetuado para o ensaio de resistência à penetração por impacto (Pilodyn) encontra-se representado na Figura 4.12.

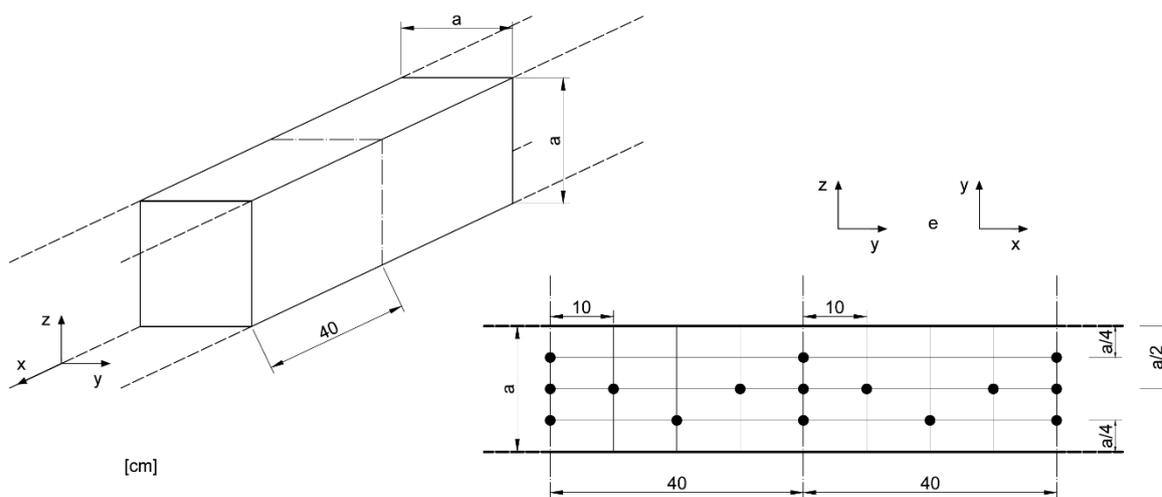


Figura 4.12 – Malha das medições efetuadas no ensaio de penetração por impacto em dois segmentos consecutivos, adaptado de Sousa (2013)

Com o propósito de minimizar a influência de defeitos locais nas medições, perante as cinco medições efetuadas ao longo do segmento, foram retirados o valor máximo e o valor mínimo obtidos. Posteriormente, o valor médio foi determinado com as três medições restantes.

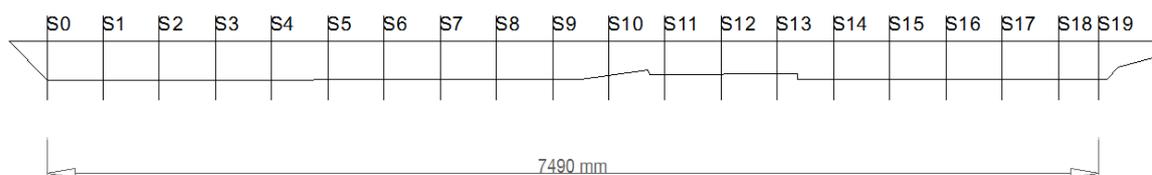
O efeito nos resultados devido à presença de degradação foi determinado subtraindo 8 mm ao valor médio da profundidade medida. Os oito milímetros subtraídos corresponderam a

um valor de referência retirado de testes a provetes livres de defeitos e degradação visíveis. Tendo por base esta metodologia, verificou-se que o valor médio de profundidade de degradação foi de 8,3 mm.

No Anexo 4 é possível verificar as secções efetivas obtidas na Asna 1.

A Tabela 4.5 apresenta a profundidade obtida por efeito da presença de degradação, a média e o coeficiente de variação (CoV) obtidos no ensaio de penetração por impacto no elemento Perna Norte, sendo que os resultados dos restantes elementos podem ser consultados no Anexo 2. Os valores estatísticos são apresentados por secção e por face.

Tabela 4.5 – Resultados do ensaio de penetração por impacto na Perna Norte



Superfície de contacto

Secção	Superfície de contacto				Média (mm)	CoV (%)
	Cima	Esquerda	Baixo	Direita		
0	6	2	7	12	6,75	60,9
1	8	2	4	10	6	60,9
2	10	2	1	10	5,75	85,6
3	6	1	2	7	4	73,6
4	7	2	4	7	5	49,0
5	4	1	5	8	4,5	64,2
6	6	2	3	8	4,75	58,0
7	6	2	4	10	5,5	62,1
8	4	3	9	9	6,25	51,2
9	5	2	3	10	5	71,2
10	4	2	2	11	4,75	89,9
11	6	2	2	11	5,25	81,4
12	7	2	2	17	7	101,0
13	22	3	3	14	10,5	88,1
14	19	3	3	15	10	82,5
15	20	8	8	22	14,5	52,1
16	14	15	15	27	17,75	34,8
17	19	4	4	24	12,75	80,8
18	7	17	17	25	16,5	44,7
19	4	12	12	25	13,25	65,6
Média	9,20	4,35	5,5	14,1	Média CoV por face	Média CoV por secção
CoV (%)	65,5	109,2	82,3	47,9	76,2%	67,9%

Os resultados apresentados na Tabela 4.5 evidenciam uma variabilidade muito significativa tanto ao longo do elemento (CoV por face com valores acima de 45% e média de 76,2%), como para a mesma secção (CoV por secção com valores acima de 30% e média de 67,9%). Tal situação evidencia que existem faces com profundidade de penetração significativamente diferentes das outras, assim como uma variação significativa destes valores ao longo do elemento. Esta conclusão é suportada pela inspeção visual que indicava valores de degradação visível superior para a extremidade inferior da perna (secções 13 a 19) e superior para uma das faces como visível nos mapas de degradação que serão analisados de seguida.

Os resultados expostos na Tabela 4.6 demonstram que todos os elementos constituintes da Asna 1 têm uma variabilidade muito significativa tanto para a mesma secção como ao longo do elemento (valores do CoV acima de 60% e média de 83,3% na secção e média de 86,2% ao longo do elemento). Esta variabilidade confirma o que os mapas de degradação abaixo apresentados demonstram, a existência de faces com elevada resistência que correspondem ao cerne da madeira e faces com maior degradação que correspondem ao borne da madeira.

Tabela 4.6 – Resultados do coeficiente de variação dos elementos constituintes da Asna 1

Elemento	Média CoV por secção (%)	Média CoV por face (%)
Perna Norte	67,9	76,2
Perna Sul	89,3	61,2
Linha	62,6	81,9
Pendural	74,9	60,3
Diagonal Norte	84,0	71,9
Diagonal Sul	121,0	165,7
Média (%)	83,3	86,2

Nas Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16 apresentam-se os mapas do ensaio à resistência de penetração por impacto nas quatro faces da Asna 1. Destaca-se que a representação dos mapas tem como referência o alçado frontal da Asna.

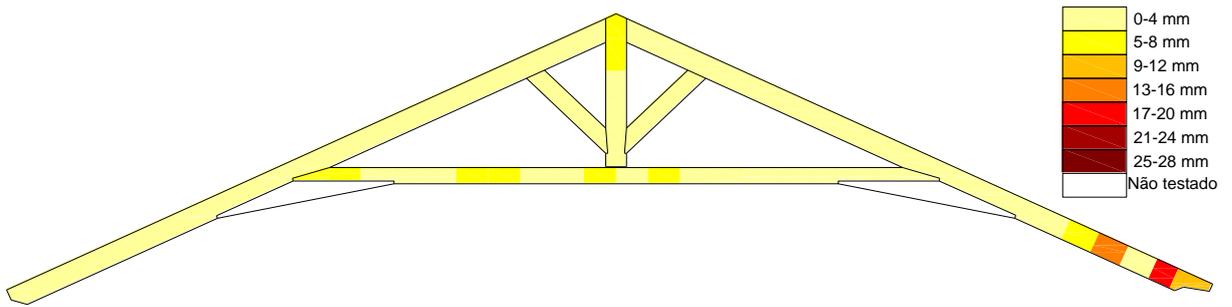


Figura 4.13 - Mapa do ensaio à resistência de penetração por impacto para a Asna 1 - Face frontal

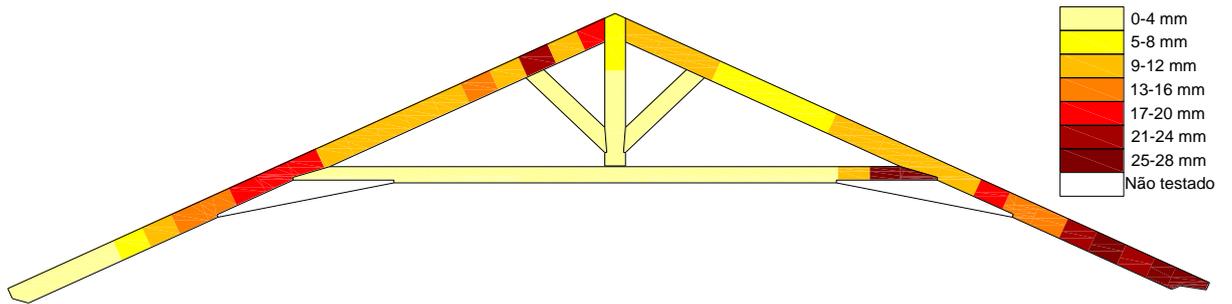


Figura 4.14 - Mapa do ensaio à resistência de penetração por impacto para a Asna 1 - Face posterior

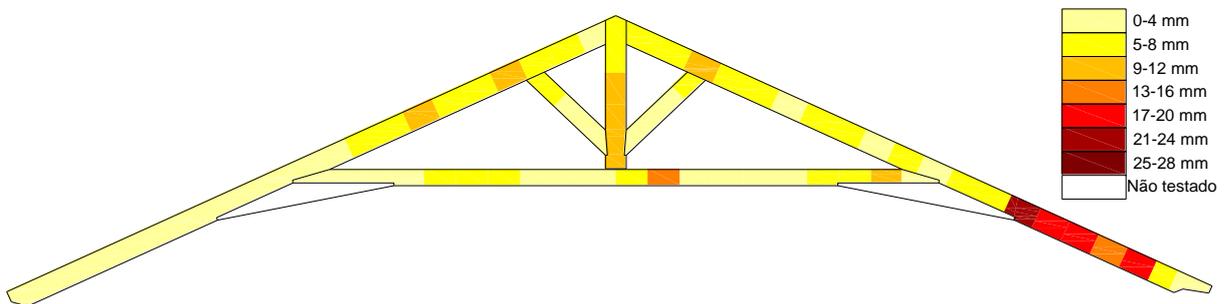


Figura 4.15 - Mapa do ensaio à resistência de penetração por impacto para a Asna 1 - Face superior

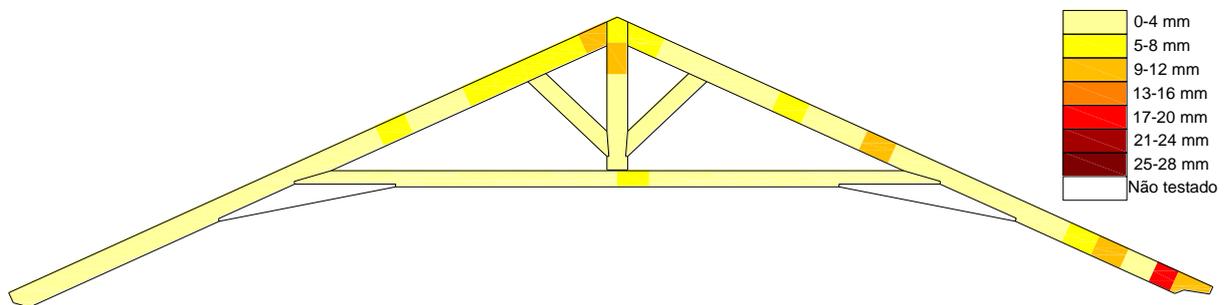


Figura 4.16 - Mapa do ensaio à resistência de penetração por impacto para a Asna 1 - Face inferior

No que respeita à penetração verifica-se diretamente que quanto maior a penetração, mais degradada se encontra a madeira.

Perante os mapas acima representados, é possível comprovar que a face frontal da Asna 1 é a face que se encontra menos degradada enquanto a face posterior é aquela que se encontra mais degradada.

Os elementos interiores, pendural, diagonais apresentaram profundidades de penetração baixas, já que na construção não estavam em contato direto com o telhado da cobertura ou com as paredes de alvenaria e, portanto, encontravam-se mais protegidos perante possíveis infiltrações de água.

No que concerne aos elementos, as pernas são os elementos que se encontram mais degradados, principalmente na parte inferior à qual corresponde a área de suporte em contacto com as paredes de alvenaria. Em particular, salientam-se as penetrações de 25-28 mm que foram obtidas na Perna Norte. A existência de penetrações do Pilodyn entre 25-28 mm indicam que os elementos se encontram degradados, possivelmente por ação do caruncho grande (*Hylotrupes bajulus*), principal agente de degradação existente nos elementos inspecionados. A identificação do caruncho vem confirmada pela presença de “serrim” sobre a superfície dos elementos de madeira e pela observação de orifícios de saída dos insetos. A Figura 4.17 apresenta diversos exemplos onde se verifica a presença de *Hylotrupes bajulus*.



Figura 4.17 – Exemplos do efeito da presença de *Hylotrupes bajulus* nos elementos da Asna 1

Por outro lado, encontram-se também valores inferiores ao valor retirado de provetes livres de defeitos e degradação. Estas secções apresentam elevada resistência e uma dureza superficial elevada, não servindo como base de comparação no âmbito em estudo.

4.2.2. Resistência à perfuração controlada

O ensaio de perfuração controlada é baseado na resistência providenciada pelo elemento de madeira ao avanço constante de uma agulha de pequeno diâmetro (Branco & Sousa, 2014). Este ensaio permite detetar variações anormais na densidade e estimar a secção residual. O perfil resultante indica a localização e a extensão de vazios ou fendas e a degradação biológica. Görlacher (1990) comprovou a existência de uma elevada correlação entre a resistência de perfuração e a densidade da madeira.

Antes de se proceder ao ensaio de perfuração controlada, utilizou-se o detetor de metais em todos os elementos. No entanto, devido à espessura dos elementos ser maior que o alcance proporcionado pelo detetor de metais efetuou-se a análise em todas as faces dos elementos. A finalidade deste processo consiste em encontrar elementos metálicos que podem estar invisivelmente no interior dos elementos e interferir no ensaio. A Figura 4.18 ilustra o equipamento detetor de metais e como é efetuada a sua utilização.



Figura 4.18 – Detetor de metais: a) equipamento; b) exemplo de utilização

Para o ensaio de perfuração controlada utilizou-se o equipamento Resistograph® 3450, o qual possui uma agulha de perfuração com 3 mm de diâmetro na extremidade e 1,5 mm de diâmetro ao longo do comprimento da haste. A agulha avança a uma velocidade constante de 30 cm/m, girando a 1500 rpm. Os resultados fornecidos pelo Resistograph® 3450 são o registro do perfil do elemento de madeira em memória interna e, simultaneamente, executa impressão de um gráfico traçado pelo equipamento (ver Figura 4.19). Para uma avaliação detalhada, o registro dos perfis foi transferido para formato eletrónico com recurso ao *software* DECOM (Walesch, 2015).

Durante a execução do ensaio garantiu-se a verticalidade do equipamento, a perfuração era executada em locais que não possuíssem defeitos superficiais como nós e fendas, por forma a não provocar alteração da trajetória da agulha ao longo da perfuração. No ensaio também se teve o cuidado de evitar movimentos do Resistograph® para não conduzir a erros nos resultados.

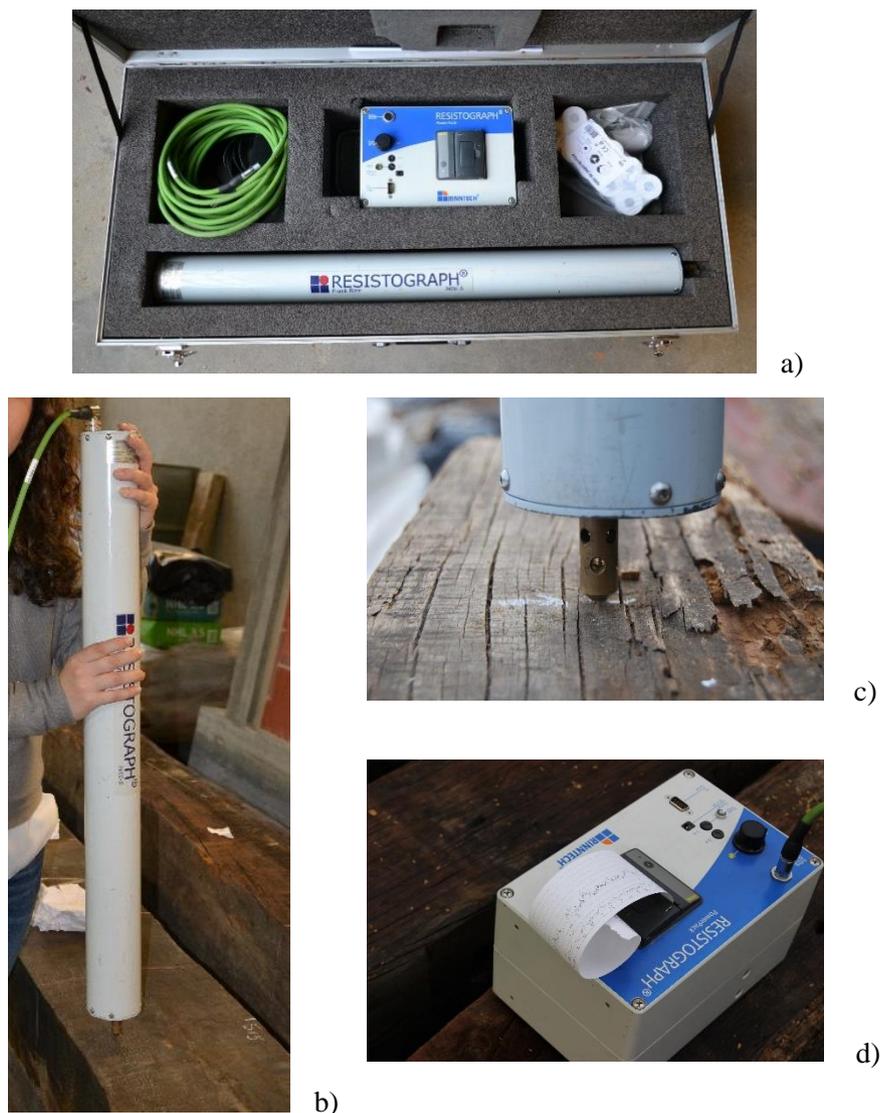


Figura 4.19 – Resistógrafo: a) equipamento; b) exemplo de utilização; c) perfuração da agulha; d) resistência

Tendo em consideração que um elemento de madeira apresenta defeitos internos (vazios, fendas, degradação biológica) que por vezes são invisíveis superficialmente, os ensaios de perfuração foram efetuados nas quatro faces das secções transversais definidas. Visto que a agulha perfura o elemento na sua totalidade, apenas são necessários ensaios em duas faces (superior/inferior e frontal/posterior), tal como se apresenta esquematicamente na Figura 4.20.

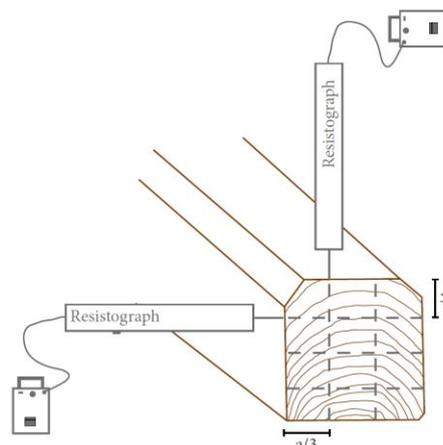


Figura 4.20 – Esquema representativo do ensaio de resistência à perfuração controlada

Como a largura do elemento corresponde sensivelmente a $2/3$ da altura, foram efetuados dois testes perpendicularmente às faces superior/inferior e três testes perpendicularmente às faces frontal/posterior, conforme apresentado na Figura 4.20 e Figura 4.21.

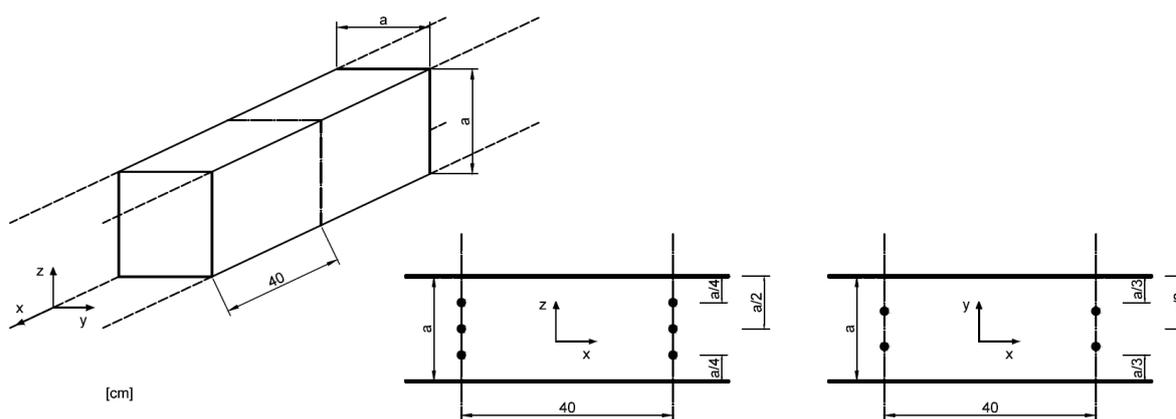


Figura 4.21 – Esquema das medições efetuadas no ensaio de perfuração controlada em dois segmentos consecutivos

É de referir que o ensaio de perfuração controlada apenas efetua medições na trajetória de perfuração da agulha do equipamento, o que tendo em consideração a pequena dimensão da agulha, garante um carácter local aos resultados obtidos. Adicionalmente, é preciso ter em conta que os elementos avaliados neste estudo possuem uma elevada espessura o que provoca uma diminuição da fiabilidade dos resultados pois, proporciona o aumento de atrito lateral da agulha e possível desvio da trajetória de perfuração. Contudo, o estado de degradação em profundidade da seção em análise pode ser aferido tendo por base a variação da resistência à perfuração, em que uma menor resistência à perfuração indica defeitos internos e uma maior resistência de perfuração corresponde a valores mais elevados da

densidade da madeira. A localização dos defeitos internos é facilmente detetada, porém não é possível prever as propriedades mecânicas de uma forma direta (Branco, 2008).

A degradação da secção foi estimada por sensibilidade do inspetor, tendo sido considerado como regra que na presença de uma quebra do valor da resistência à perfuração, aproximando-se de zero, esse intervalo foi considerado como degradado. Na parte inicial excluiu-se a medição efetuada até ao primeiro pico máximo pois corresponde à distância entre a zona saída da agulha e a face de madeira do elemento. Na medida final, aplicou-se o mesmo processo em que se considerou o término da secção no último pico máximo do perfil (ver Figura 4.22). Na Figura 4.22 apresenta-se um exemplo de um perfil de resistência à perfuração, na direção ortogonal às fibras, numa secção não deteriorada, em que o eixo horizontal mede o comprimento de perfuração e o eixo vertical demonstra a resistência à perfuração registada pelo Resistograph®.

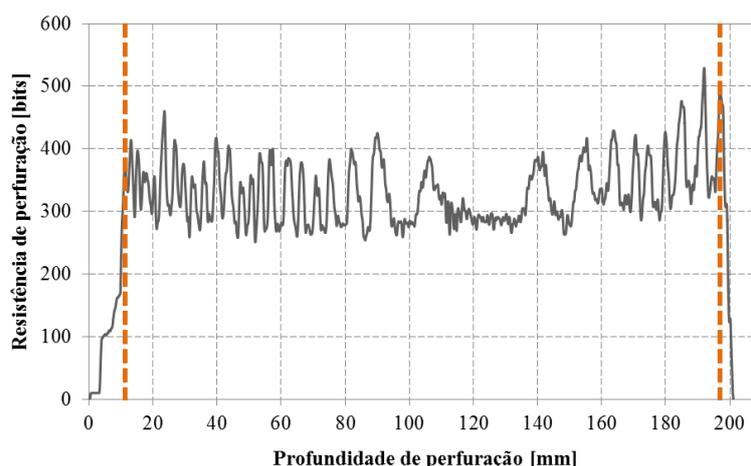


Figura 4.22 – Exemplo de perfil de resistência à perfuração numa secção não deteriorada

Na Figura 4.23 representa-se uma sobreposição do perfil de resistência à perfuração sob a imagem real da secção. Pode-se verificar a tracejado o caminho de perfuração da agulha e no perfil a resistência à perfuração encontrada pelo equipamento para atravessar a madeira com boa qualidade (picos altos de resistência) e uma zona degradada (baixa resistência).

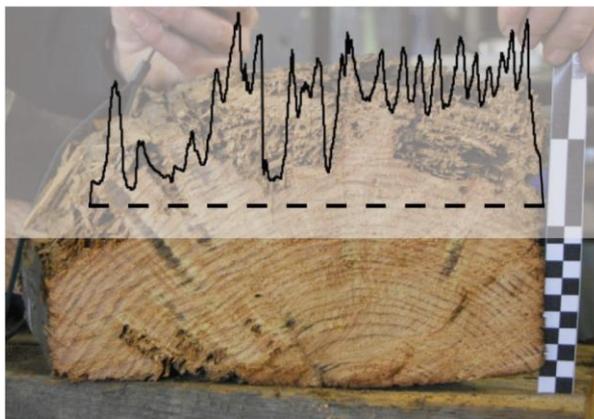


Figura 4.23 – Exemplo de perfil de resistência à perfuração numa secção deteriorada

A partir do perfil resistográfico é possível calcular a medida resistográfica (MR). Esta grandeza é aplicável apenas a madeira sã, pelo que devido à degradação superficial foram excluídas a medição inicial (entrada da agulha) e a última medição (saída da agulha) para a análise dos perfis obtidos no ensaio de resistência à perfuração (ver Figura 4.22). O valor da medida resistográfica (MR) exprime a resistência média por unidade de perfuração (A. O. Feio, 2005).

O valor da medida resistográfica foi calculado com recurso ao programa de cálculo *Microsoft Excel*.

A utilização do valor MR para estimar propriedades mecânicas é questionável (Lear, 2005). A área do perfil de resistência à perfuração depende de vários fatores, entre eles, o modelo e o uso em geral do equipamento. Por exemplo, mudanças na orientação da broca devida aos anéis de crescimento alteram o valor de RM de cada perfuração na medida em que a perfuração perpendicular à medula atravessa muitos anéis de crescimento enquanto fora da medula atravessa menos anéis de crescimento. Assim, é possível confirmar que o valor de MR pode ser altamente variável pelo que não se torna viável estimar as propriedades mecânicas a partir desta grandeza.

No entanto, a resistência à perfuração pode ser utilizada para estimar as propriedades mecânicas com base na quantificação da deterioração e baseando-se em informações fornecidas por outros ensaios não-destrutivos e semi-destrutivos. O objetivo principal da utilização do resistógrafo neste estudo não consistia em prever propriedades mecânicas mas, estimar a profundidade da camada degradada e os vazios existentes no interior dos elementos de madeira.

No Anexo 4 apresentam-se as secções residuais obtidas nos elementos da Asna 1.

Na Figura 4.24 apresenta-se o mapa de danos em relação à percentagem de perda de secção transversal efetiva tendo por base o ensaio de resistência à perfuração para a Asna 1.

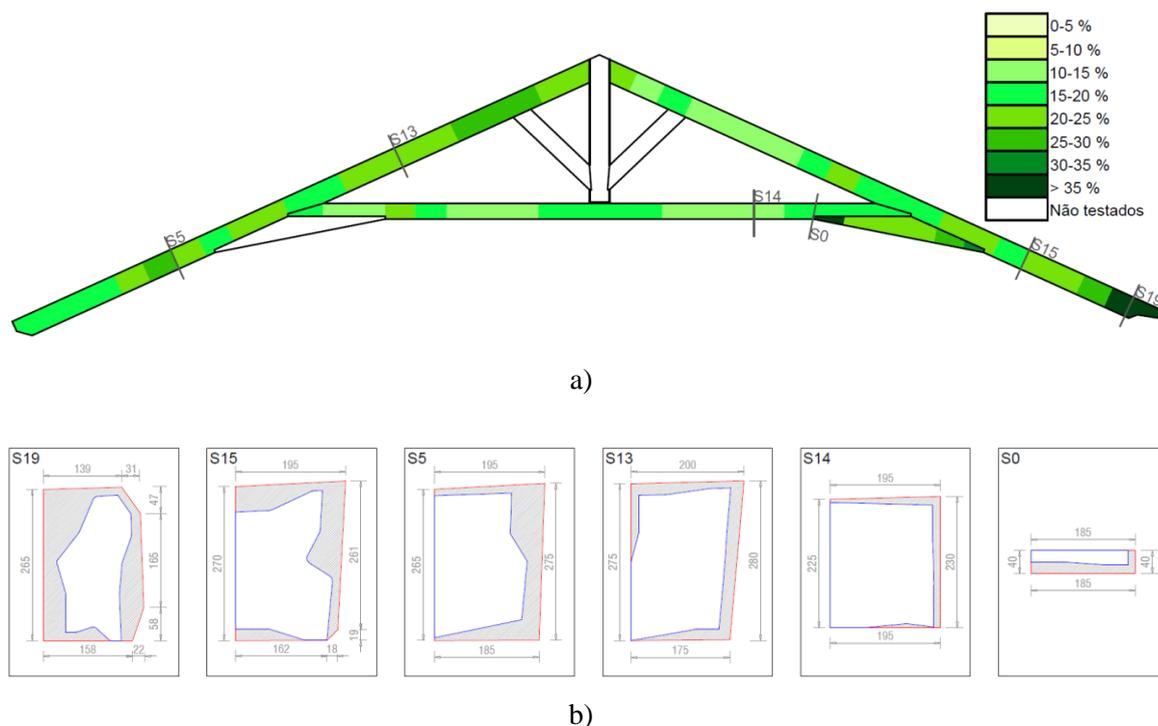


Figura 4.24 – Resultados do ensaio de resistência à perfuração: a) Mapa de danos com percentagem de perda de secção eficaz para a Asna 1; b) Exemplo de secções residuais nos diferentes elementos. Analisando a Figura 4.24a) é possível verificar que o elemento Perna Norte é o elemento que apresenta maior perda de secção eficaz, no qual 45% dos seus segmentos apresentam uma perda de secção superior a 20%. Observa-se também que os segmentos com maior perda de secção (superior a 35%) encontram-se no apoio (área de suporte em contacto com a parede de alvenaria). Tal situação deve-se possivelmente à falta de ventilação entre a área de contacto do apoio e a parede de alvenaria, o que aliado à presença de humidade elevada, potencia a degradação do elemento. Esta análise é suportada pela inspeção visual que indicava valores de degradação visível superior para a extremidade inferior da perna secções 15 a 19.

Denota-se que todos os segmentos constituintes dos elementos da asna apresentam uma perda de secção eficaz superior a 10%, o que indica degradação superficial dos elementos, possivelmente por ação do caruncho grande (*Hylotrupes bajulus*), principal agente de degradação existente nos elementos inspecionados. O elemento Linha é o elemento que na

sua globalidade apresenta uma menor perda de secção eficaz. Este elemento não se encontra em contacto direto com o telhado da cobertura ou das paredes de alvenaria e por isso, não se encontra num local propício a infiltrações de água.

Ressalva-se que os elementos Pendural, Diagonais e Reforço Perna-Linha Sul encontram-se a branco devido à falta de tempo para terminar os ensaios de perfuração controlada visto que a realização do ensaio de carga se enquadrava na *Training School* e a data definida não poderia ser adiada.

Na Figura 4.24b) apresentam-se exemplos das secções residuais para diferentes situações. As duas primeiras secções dizem respeito ao elemento Perna Norte que se encontram mais degradadas, nas quais, por conseguinte, se verifica uma maior perda de secção. As duas secções seguintes pertencem ao elemento Perna Sul e também apresentam estado de degradação. O elemento Linha encontra-se representado pela penúltima secção e apresenta uma pequena degradação superficial na face que se encontra a Norte (esta situação ocorre na globalidade do elemento). No elemento reforço verifica-se maioritariamente degradação na face inferior do elemento, contudo como a secção tem espessura reduzida, a degradação corresponde a sensivelmente metade da secção total.

Por fim, verifica-se que nos perfis de resistência à perfuração controlada analisados, não se encontraram vazios significativos nem lenho interno com resistência à perfuração inferior.

4.2.3. Ultrassons

O ensaio de ultrassons é um método dinâmico, não-destrutivo, que permite uma avaliação global do material, sobrepondo pequenos defeitos locais que poderiam reduzir a avaliação mecânica de toda a peça. O ensaio consiste na medição da velocidade de propagação de ondas sónicas através de um meio sólido (Branco & Sousa, 2014).

O equipamento utilizado na realização deste ensaio foi o Pundit Lab com precisão de 0,1 μ s e transdutores com 54 kHz de frequência de transmissão, Figura 4.25.

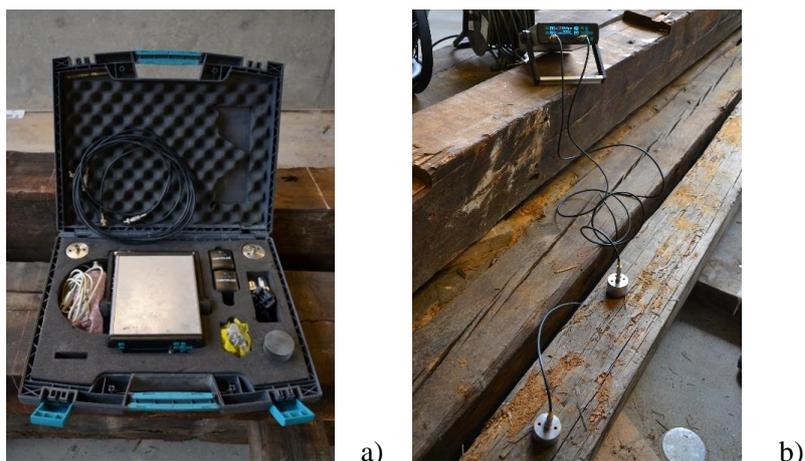


Figura 4.25 – Ultrassons: a) Equipamento; b) Exemplo de utilização

A medição da velocidade de propagação de onda é influenciada por vários fatores como a frequência de onda, o contacto entre transdutores e o elemento, a pressão aplicada pelo utilizador e a natureza do material de acoplamento. Consequentemente, o método de ultrassons apresenta uma elevada variabilidade nos resultados (Oliveira *et al.*, 2015). Os defeitos presentes na madeira são obstáculos à propagação das ondas ultrassónicas e como tal quanto maior a quantidade e significância desses defeitos, maior será a perda de intensidade, incerteza e dispersão nas medições.

Embora o método direto ou semi-direto permitam uma melhor transmissão de sinal entre os transdutores, os elementos de madeira foram avaliados aplicando o ensaio de ultrassons por método indireto (transmissão entre as fibras), uma vez que é particularmente útil para determinar a qualidade da camada de superfície (Sousa, 2013), Figura 4.26. Por falta de tempo devido ao agendamento do ensaio de carga, não foi possível avaliar os elementos de madeira pelo método direto.

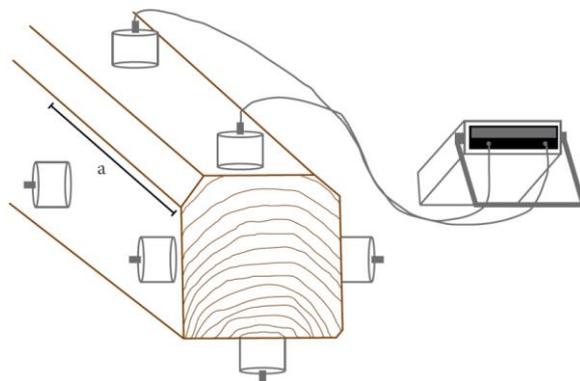


Figura 4.26 – Esquema representativo de aplicação do ensaio de ultrassons – método indireto

No que respeita ao acoplante a adotar, Oliveira et al., (2015) afirmam que no caso da madeira, uma camada fina de plasticina pode eficazmente substituir o habitual gel, com menores dificuldades de utilização e limpeza de resíduos de acoplante, bem como menores consumos de material.

Oliveira *et al.*, (2015) verificaram também que os transdutores de 24 kHz são capazes de melhor diferenciar entre diferentes tipos de nós, contudo as medições por transdutores de 54 kHz apresentaram menor variação nos resultados. Assim, com o propósito de minimizar a variação nos resultados, adotaram-se os transdutores de 54 kHz.

Os elementos foram avaliados em todas as faces com um afastamento de 40 cm entre transdutores, porém, a rugosidade da superfície e a degradação superficial dos elementos dificulta e, por vezes, impossibilita a transmissão das ondas. Nesta situação, os intervalos foram adaptados com o intuito de obter um máximo de resultados possível (ver Figura 4.26).

Para cada segmento foram efetuadas duas medições, considerando-se a média, mas que no caso destas medições diferissem mais do que 5%, procedia-se a uma terceira medição e a média era feita com os dois valores mais próximos.

A velocidade de propagação das ondas foi determinada aplicando a equação 3.2.

Na Figura 4.27 representa-se o mapa de danos do ensaio de ultrassons da Asna 1 em relação à média da velocidade de propagação das ondas, v_p , para as quatro faces de cada segmento. Tem como referência a face frontal para uma melhor leitura dos resultados. Salienta-se que os elementos Pendural, Diagonais e Reforços Perna-Linha não foram ensaiados por falta de tempo devido ao agendamento do ensaio de carga.

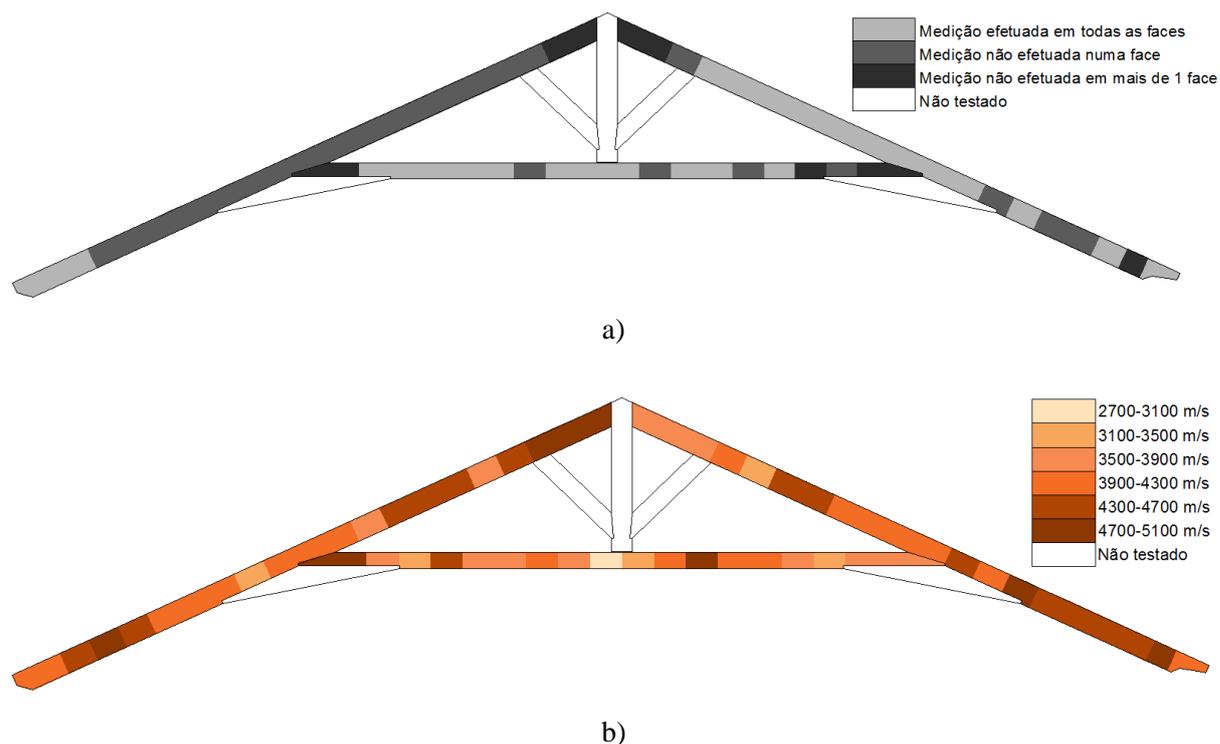


Figura 4.27 – Resultados do ensaio ultrassons para a Asna 1: a) Descrição das medições efetuadas nos segmentos; b) Média da velocidade para as quatro faces de cada segmento

A escala presente na Figura 4.27b) foi adotada perante a divisão equidistante entre o valor mínimo e o valor máximo obtido, sendo 2700 m/s e 5100 m/s, respetivamente.

A partir da inspeção visual é possível concluir que a velocidade de propagação da onda diminui na presença de defeitos, degradação ou vazios pois tal facto provoca o desvio da onda e o tempo de propagação aumenta. Velocidades baixas também poderão indicar zonas da madeira com baixa densidade ou rigidez.

Analisando a Figura 4.27 verifica-se que as velocidades de onda mais elevadas encontram-se maioritariamente na ligação Perna Sul – Pendural e na ligação Linha – Perna Sul. Por outro lado, os apoios da asna (ligação pernas com a parede de alvenaria) apresentam velocidades de propagação da onda mais baixos, pois, tal como verificado na inspeção visual, os apoios encontram-se degradados e, conseqüentemente, a onda é desviada e como o tempo de propagação aumenta, a velocidade diminui.

Os segmentos onde as medições não foram obtidos, devido à perda de sinal, corresponderam a segmentos com nós significativos, Classe III e NC, ou desalinhamento do fio, ou degradação superficial considerável.

4.3. Ensaaios à flexão simples

Os ensaios à flexão foram realizados de acordo com os procedimentos de ensaio preconizados na norma EN 408:2003 (EN, 2003). Esta norma descreve os métodos laboratoriais para a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira estrutural. No presente estudo, realizaram-se ensaios à flexão simples em 4 pontos para a quantificação dos valores locais e globais do módulo de elasticidade em flexão. Para o efeito ensaiaram-se três elementos - uma Perna e duas Linhas - de outras asnas integrantes da mesma cobertura. Assumiu-se assim, que mesmo não havendo a possibilidade de ensaiar os elementos constituintes da Asna em estudo, seria importante quantificar estas propriedades mecânicas em elementos, que sendo pertencentes à mesma estrutura, podem ser considerados como pertencentes à mesma amostra.

A norma utilizada dita que o comprimento do provete a ensaiar, a distância entre os apoios e as posições de carga, são proporcionais à altura da secção transversal do elemento a avaliar. Tendo em consideração as propriedades da madeira em flexão, a norma sugere a determinação de um módulo de elasticidade local, $E_{m,l}$, e um módulo de elasticidade global, $E_{m,g}$. A diferença entre estes módulos de elasticidade depende do comprimento da medição e das tensões que o elemento é sujeito dentro desse intervalo. O $E_{m,l}$ é medido numa distância de cinco vezes a altura da secção enquanto o $E_{m,g}$ é medido ao longo da extensão total do vão entre os apoios. Estes valores para os módulos de elasticidade são calculados de acordo com as equações (4.1) e (4.2), respetivamente:

$$E_{m,l} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot I \cdot (w_2 - w_1)} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot \Delta F}{16 \cdot I \cdot \Delta w} \quad (4.1)$$

$$E_{m,g} = \frac{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3}{2 \cdot b \cdot h \cdot \left(2 \cdot \frac{\Delta w}{\Delta F} - \frac{6 \cdot a}{5 \cdot G_v \cdot b \cdot h} \right)} \quad (4.2)$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \quad (4.3)$$

Em que ΔF é o incremento de força no regime elástico, em Newton, Δw é o incremento do deslocamento vertical corresponde a ΔF , em milímetros, b é a largura da secção transversal, em milímetros, h é a altura da secção transversal, em milímetros, a é a distância entre os pontos de aplicação da carga e o apoio, em milímetros, l é o vão em flexão, em milímetros,

l_1 é o comprimento do dispositivo para a determinação de $E_{m,l}$, em milímetros, ou seja 1150 mm, I é o momento de inércia, em milímetros elevados à quarta (4.3) e G_v é o módulo de corte, em Newton por milímetros quadrados. Se G_v for desconhecido considera-se infinito (CEN, 2010).

Devido à grande dimensão dos elementos ensaiados, foram realizados três ensaios de flexão sucessivos em cada elemento, em que cada um deles foi efetuado numa secção diferente. Os ensaios à flexão compreendem quatro pontos (dois pontos para a carga aplicada e dois para as reações apoios), sendo que a força é aplicada por apenas um atuador, onde se encontra a célula de carga. A força aplicada pelo atuador é distribuída pelos dois pontos de aplicação no elemento através de um elemento metálico de elevada rigidez, em que a ligação entre o elemento metálico e o provete é rotulada. O esquema de ensaio e as dimensões adotadas de acordo com a EN 408:2003 (EN, 2003) encontra-se representado na Figura 4.28.

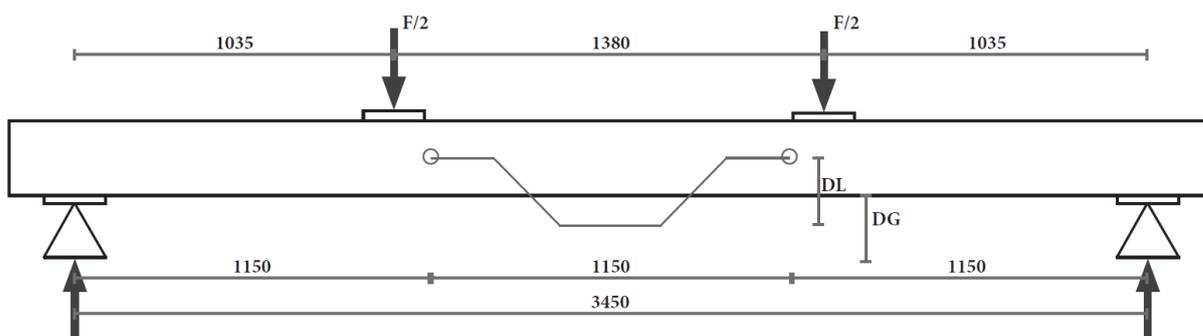


Figura 4.28 – Esquema de ensaio de flexão estática adotado de acordo com a EN 408:2003

Com a finalidade de minimizar a contribuição da degradação e consequente esmagamento das fibras de madeira perto dos apoios e dos pontos de carga, o carregamento aplicado foi dividido em três ciclos de carga, carregando e descarregando os elementos sucessivamente. O primeiro ciclo foi utilizado para ajustar, calibrar os atuadores com o modelo e para mitigar os efeitos de possível esmagamento, por conseguinte, os resultados obtidos no primeiro ciclo não são considerados. Os valores finais foram obtidos perante o valor médio dos resultados obtidos no segundo e terceiro ciclos de carregamento.

Os deslocamentos locais foram medidos na zona central do provete a partir de dois transdutores de deslocamentos colocados no eixo neutro das duas faces laterais (DL). O deslocamento global foi medido a partir de um transdutor de deslocamentos colocado a meio da distância entre os apoios (DG).

A norma utilizada dita que o teste de carga deve estar dentro do comportamento elástico do material. Para tal, é necessário assumir alguns pressupostos para estimar a resistência máxima do elemento. Os testes foram realizados com controlo de deslocamento e a taxa de deslocamento foi calculada de tal forma que a carga aplicada necessária para o cálculo do módulo de elasticidade (40% do da carga máxima estimada) fosse atingida no intervalo 300 ± 120 s, tal como preconizado pela norma.

4.4. Correlações

Com a finalidade de obter as propriedades da madeira dos elementos constituintes das asnas analisadas, para além da inspeção visual e correspondente classificação visual, foram realizados ensaios não-destrutivos (Pilodyn, Resistógrafo e Ultrassons) para além dos ensaios à flexão em elementos que podem ser considerados como pertencentes à mesma amostra. Importa assim, analisar não apenas individualmente os resultados de cada uma destas etapas, mas como procurar correlações entre os seus resultados.

Assim sendo, os resultados dos ensaios à flexão são apresentados na Figura 4.29 na qual são expostos os resultados da classificação visual, o valor do módulo de elasticidade (MoE) local e do módulo de elasticidade global.

Como os elementos estudados pertencem a uma cobertura histórica, verifica-se uma grande variação dos resultados e valores de MoE baixos devido ao estado de deterioração. Porém evidencia-se que para $E_{m,l}$ e $E_{m,g}$ os valores mais baixos correspondem a segmentos com menor classificação visual (III e NC) e aumentam em segmentos com classificação visual mais elevada (I e II).

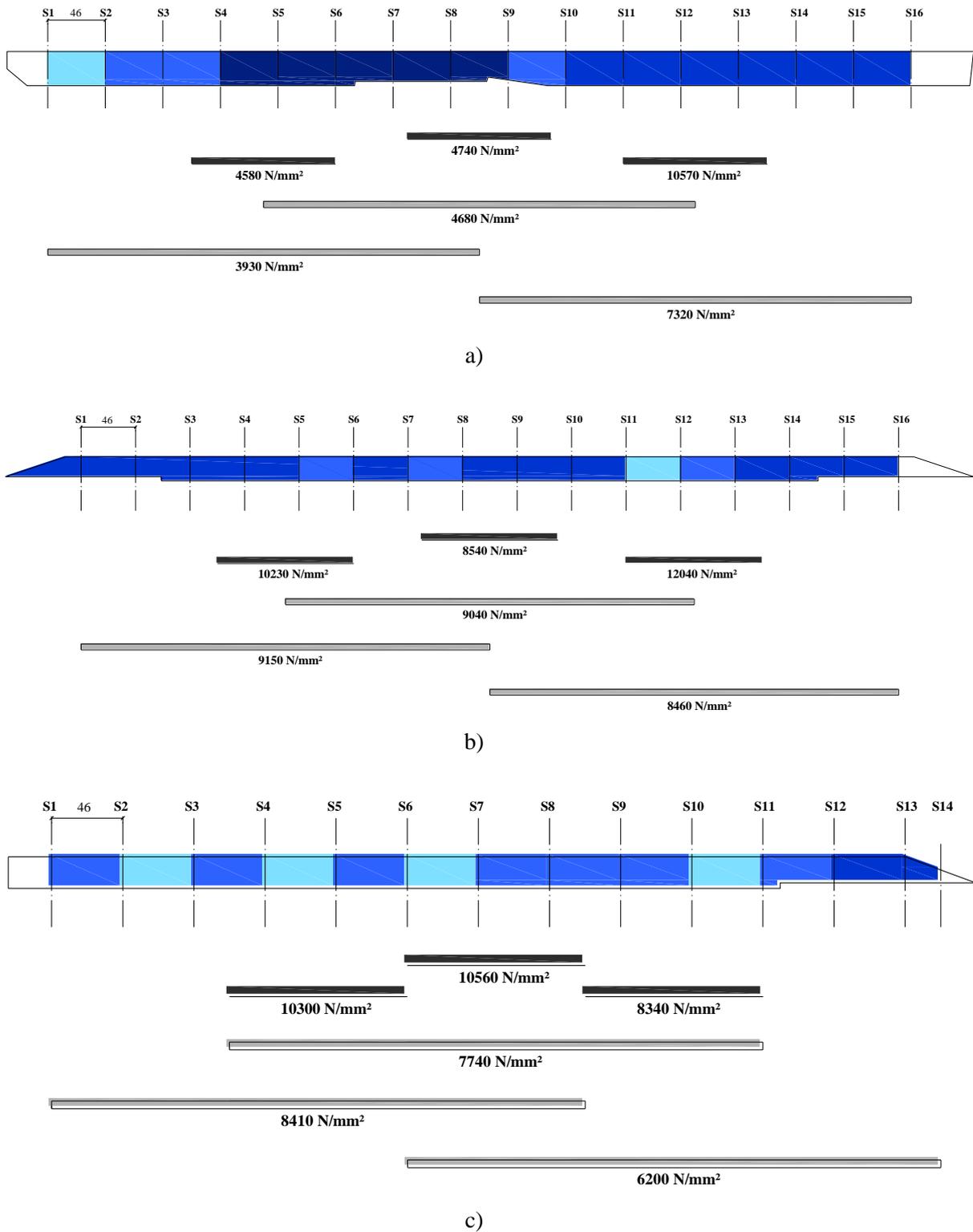


Figura 4.29 - Resultados da classificação visual de acordo com a UNI 11119:2004 (UNI, 2004), $E_{m,g}$ (N/mm²) e $E_{m,l}$ (N/mm²) nos elementos: a) Perna; b) Linha 2; c) Linha 3

Posto isto, os ensaios não-destrutivos foram realizados em pelo menos cinco segmentos de cada classe e, se possível, em um segmento de cada classe em cada elemento. Os mapas de

danos obtidos para o ensaio de penetração por impacto e o ensaio de resistência à perfuração controlada nos diferentes elementos à flexão ilustram-se na Figura 4.30 e na Figura 4.31, respectivamente.

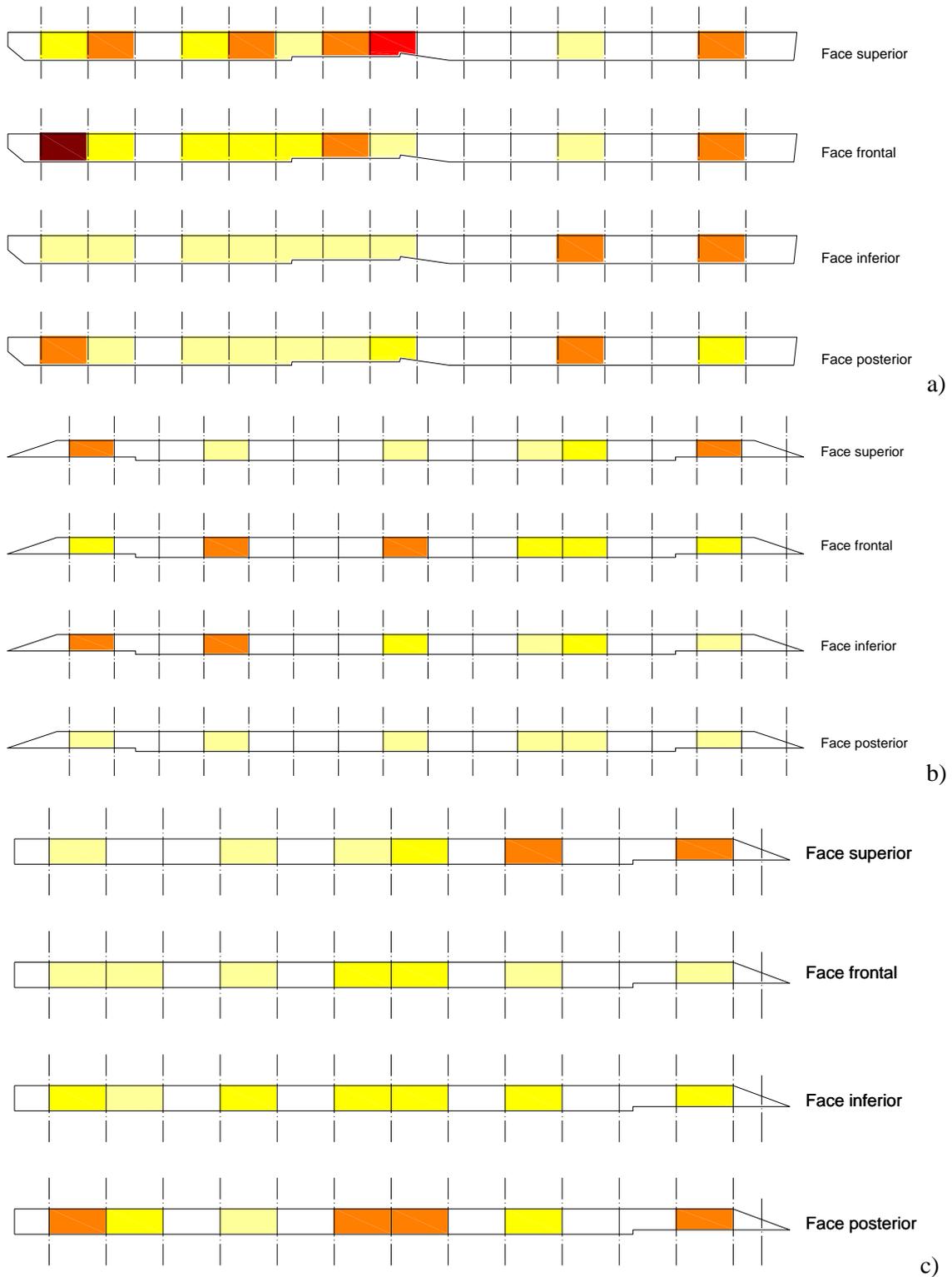


Figura 4.30 - Mapas do ensaio à resistência de penetração por impacto nas diferentes faces dos elementos: a) Perna; b) Linha 2; c) Linha 3

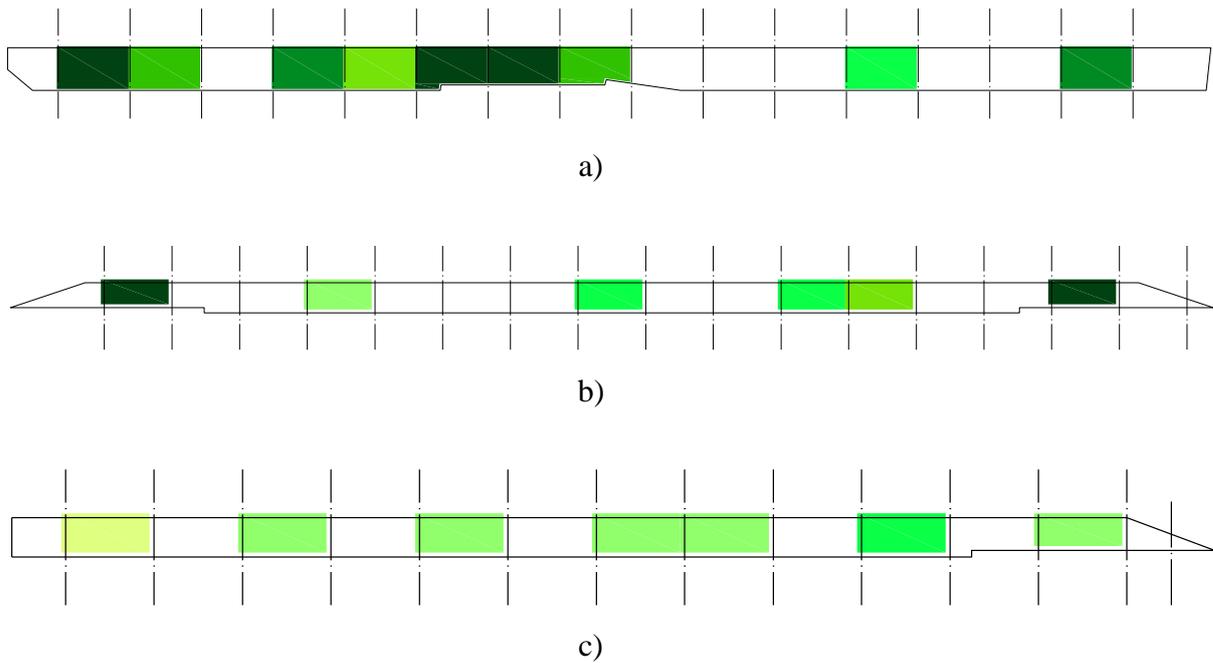


Figura 4.31 - Mapa de danos com percentagem de perda de secção eficaz para os elementos: a) Perna; b) Linha 2; c) Linha 3

Deste modo, no que respeita ao ensaio de resistência à penetração por impacto, a verificação de possíveis correlações é efetuada pela comparação da Tabela 4.7 com os mapas apresentados nas Figura 4.13, Figura 4.14, Figura 4.15, Figura 4.16. Neste contexto, efetuando a comparação conclui-se que para as diferentes classes impostas por inspeção visual, os segmentos com valores de penetração maiores correspondem, tal como previsto, a classes mais baixas (Classe III e NC), ou seja, segmentos com menor resistência. Contudo, é importante salientar que independentemente da classificação visual, as faces que correspondem ao cerne da madeira apresentam resistência mais elevada do que as faces que correspondem ao borne da madeira. Tal situação é verificada na face inferior dos segmentos não classificáveis possivelmente por esta face corresponder ao cerne da madeira.

Globalmente, observando a Tabela 4.7 é possível verificar que os elementos inspecionados apresentaram penetrações muito baixas, o que permite concluir que os elementos possuíam pouca degradação.

Tabela 4.7 – Resultados do valor médio e do coeficiente de variação do ensaio à resistência de penetração por impacto nos elementos ensaiados à flexão

		Frontal	Posterior	Superior	Inferior
Classe I	Média (mm)	4,3	7,4	4,4	5,0
	CoV (%)	70,3	68,6	49,8	28,3
Classe II	Média (mm)	4,8	5,4	7,4	5,6
	CoV (%)	49,7	77,0	52,9	41,1
Classe III	Média (mm)	8,6	5,0	8,4	7,7
	CoV (%)	55,5	69,3	67,8	50,0
NC	Média (mm)	6,4	3,4	9,8	1,6
	CoV (%)	34,2	39,5	48,1	83,9

Relativamente ao ensaio à resistência à perfuração controlada, por análise da Tabela 4.8, verifica-se que a maior perda de secção ocorre em segmentos classificados com classes mais baixas.

Efetuada a comparação do valor médio obtido em cada classe com a (figura 23), verifica-se que os segmentos com classificações mais elevadas (Classe I e Classe II) apresentam perdas de secção sensivelmente até 20% e os segmentos com classificações mais baixas (Classe III e NC) apresentam perdas de secção superiores a 20%, tal como já reportado nos elementos. Repara-se que o elemento reforço é a única exceção pois contém segmentos classificados como Classe I com uma perda de secção superior a 20%, tal situação deve-se ao facto de o elemento ser composto maioritariamente por segmentos com uma reduzida secção transversal, em que a degradação superficial corresponde a uma parte significativa da mesma secção.

Tabela 4.8 - Resultados do valor médio e do coeficiente de variação da perda de secção dos elementos ensaiados à flexão

	Média (%)	CoV (%)
Classe I	19,9	74,3
Classe II	17,5	36,2
Classe III	21,5	41,9
NC	31,9	24,1

Na Asna 2 foi efetuada a inspeção visual mas não foram realizados os ensaios não-destrutivos. Contudo, tendo em consideração a veracidade dos resultados obtidos nos elementos corresponderem aos resultados obtidos na Asna 1, é possível extrapolar os valores para a Asna 2. Portanto, os valores obtidos nos elementos nos ensaios não-destrutivos foram aplicados na Asna 2 de acordo com as diferentes classes impostas na classificação visual. O mapa de danos com percentagem de perda de secção eficaz para a Asna 2 apresenta-se na Figura 4.32.

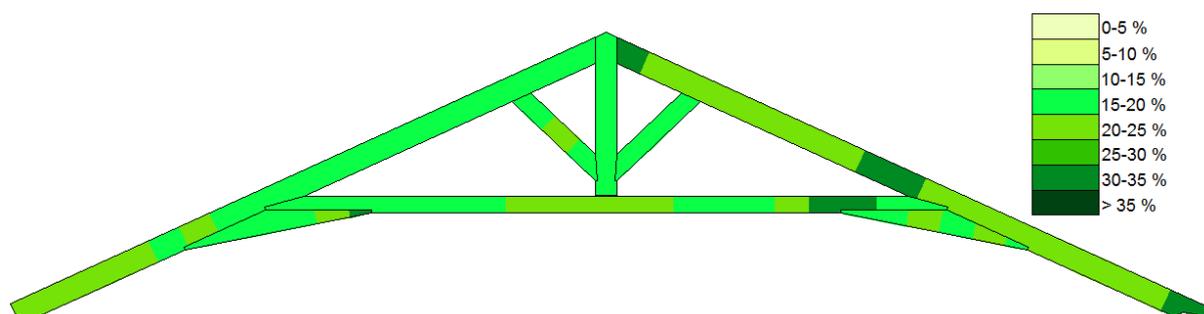


Figura 4.32 - Mapa de danos com percentagem de perda de secção eficaz para a Asna 2

Os ensaios à flexão foram realizados em elementos não constituintes das asnas, por isso, o valor do módulo de elasticidade global obtido perante a classificação obtida foi comparado com o módulo de elasticidade prescrito pela Norma UNI 11119:2004 (UNI, 2004). Os valores estabelecidos pela norma foram um pouco superiores aos valores obtidos. Desta forma determinou-se o erro médio e por fim, ao valor prescrito pela norma retirou-se o erro médio. Salienta-se que no elemento não classificável (NC), o valor do módulo de elasticidade obtido foi atribuído diretamente ao elemento. O valor do erro e dos módulos de elasticidade finais apresentam-se na Tabela 4.9.

O facto de os valores do módulo de elasticidade atribuídos pela norma serem superiores aos valores obtidos nos ensaios à flexão deve-se, possivelmente, ao estado de degradação avançada que os elementos apresentavam.

Tabela 4.9 – Valor do módulo de elasticidade para as diferentes classes

Erro (N/mm ²)	Módulo de Elasticidade final (N/mm ²)			
	Classe I	Classe II	Classe III	NC
2833	10167	9167	8167	5310

Posto isto, tendo em consideração a classificação dos elementos foi atribuído o valor do módulo de elasticidade obtido para cada Classe. O processo realizado para a obtenção do módulo de elasticidade encontra-se esquematizado na Figura 4.33.

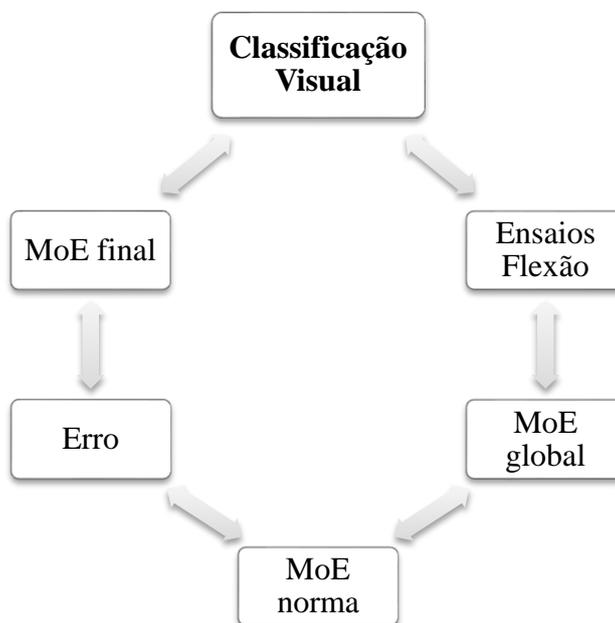


Figura 4.33 – Processo para atribuição do módulo de elasticidade aos elementos das asnas

Em suma, e tendo por base a classificação visual atribuída os elementos constituintes das asnas, os valores do módulo de elasticidade em flexão para cada elemento das asnas estudadas, são aqueles apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Módulo de elasticidade dos elementos das asnas

Módulo de Elasticidade (N/mm²)		
Elemento	Asna 1	Asna 2
Perna Sul	8167	8167
Perna Norte	8167	5310
Linha	8167	5310
Pendural	9167	9167
Diagonal Sul	9167	8167
Diagonal Norte	8167	9167
Reforço Perna – Linha Sul	5310	5310
Reforço Perna – Linha Norte	5310	8167

4.5. Conclusões

Esta campanha experimental tinha como objetivo concluir sobre a eficiência da inspeção visual e dos ensaios não-destrutivos na avaliação do estado de conservação dos elementos das asnas.

Os resultados obtidos na classificação visual e nos ensaios não-destrutivos das duas asnas permitiram identificar as secções frágeis e compreender o estado geral de conservação. Para isso, foram realizados e analisados mapas de danos considerando a classificação visual, a penetração impacto, a resistência à perfuração controlada e os resultados de ultrassom.

Nos ensaios à flexão foi possível concluir que os valores do módulo de elasticidade são inferiores para classificações mais baixas.

Capítulo 5

Ensaio de Carga

A cobertura do Laboratório de Chimico era constituída por quatro asnas, pela qual, duas dessas asnas foram reconstruídas no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho, tendo por base a sua configuração original.

Assim, procedeu-se ao ensaio à escala real de ambas as asnas sendo que a primeira asna a ser ensaiada foi a Asna 2. A estrutura original da Asna 2 foi ensaiada duas vezes, com apoio simples e com apoio duplo, com o intuito de aferir de que forma o tipo de apoio influencia o comportamento da asna. Posto isto, após a rotura, estudaram-se e aplicaram-se duas técnicas de reforço e a asna foi ensaiada novamente à escala real até à rotura.

Posteriormente, de forma análoga à Asna 2, a Asna 1 foi ensaiada até à rotura, no entanto, na configuração original apenas se ensaiou com os apoios duplos. Por fim, aplicou-se o reforço e a asna foi ensaiada novamente até à rotura.

Neste sentido, no presente capítulo, primeiramente descreve-se a reconstrução das asnas e a logística do ensaio. Por fim, procede-se à análise de resultados, em que particularmente na Asna 2, analisa-se de que forma o tipo de apoio, simples e duplo, influencia o comportamento da asna.

5.1. Reconstrução das asnas

As asnas aquando da remoção da cobertura original em 2005 (Figura 5.1 a)) foram desmontadas e mantidas em ambiente protegido na Universidade de Aveiro. Recentemente, foram transportadas para a Universidade do Minho para desenvolver o presente estudo (Figura 5.1 b)).



Figura 5.1 - Asnas: a) no local da construção; b) elementos desmontados nos laboratórios da Universidade do Minho

Após a receção dos elementos constituintes das asnas, efetuou-se uma avaliação dos elementos a fim de verificar quais os elementos recebidos, o seu estado de conservação e efetuou-se uma pré-montagem para testar o estado das ligações. Neste sentido verificou-se que as quatro asnas apresentavam todos os elementos, contudo, alguns elementos encontravam-se muito degradados ou partidos o que dificultaria a reconstrução das asnas. Assim, apenas a Asna 1 se encontrava apta para ser reconstruída com todos os elementos de origem (ver Figura 5.2). A Asna 2 apresentava apenas dois elementos que não se encontravam em condições (Pendural e Perna Sul), pelo que foram substituídos por elementos constituintes de outras asnas. Optou-se assim apenas por reconstruir duas asnas, a Asna 1 e a Asna 2.



Figura 5.2 – Pré-montagem Asna 1: a) Asna completa; b) Exemplos de ligações em bom estado de conservação

Posto isto, os elementos foram transportados para o interior das instalações do laboratório. Os elementos tiveram que ser transportados à mão devido à sua grande dimensão não permitir que equipamentos mecânicos efetuassem as manobras necessárias.

Para a montagem das asnas foi necessário recorrer a mão-de-obra especializada. Para tal, recorreu-se a um experiente carpinteiro da empresa A.O.F (Augusto Oliveira & Filhos, Lda) que com o auxílio de um grupo alargado de alunos envolvido no projeto, efetuou a montagem das duas asnas, tentando reproduzir a sua configuração original.

Analisando a configuração das asnas, em termos estruturais, verifica-se que os elementos pernas e diagonais estão submetidas à compressão, enquanto a linha e o pendural estão submetidos à tração. Os elementos pernas e a linha também se encontram sujeitas à flexão devido ao seu peso próprio.

5.1.1. Ligações das asnas

As ligações entre os vários elementos constituintes da asna são materializadas por entalhes, onde a transmissão de esforços é conseguida por atrito e compressão nas superfícies em contacto dos elementos a unir. A ligação tradicional mais utilizada nas asnas era a denominada por entalhe de dente simples com mecha e respiga (ver Figura 5.3). Nas ligações onde seria de prever uma maior concentração de esforços, era complementadas com

elementos metálicos a fim de prevenir possíveis inversões de esforços e para impedir o deslizamento lateral da peça.



Figura 5.3 – Exemplos de ligações por entalhes

Durante a reconstrução das asnas, verificou-se que os elementos metálicos originais encontravam-se muito corroídos pelo que foi necessário proceder à sua substituição por réplicas atuais. Porém, a maior diferença na reconstrução das asnas prende-se com a substituição das cavilhas originais (em aço) por parafusos auto-perfurantes. Assim, a ligação pendural-linha e as ligações perna-linha-reforço foram materializadas por entalhe de dente simples com mecha e respiga e foram reforçadas por uma braçadeira de 50 mm de largura e 5 mm de espessura, na direção normal à linha (Figura 5.4). Cada braçadeira encontra-se fixa através de 6 parafusos HBS 6×180 mm. O pendural encontra-se suspenso na linha com a finalidade de evitar esforços de flexão, uma vez que esta ligação deve ser articulada e deve impedir as deformações no plano ortogonal ao plano da asna.

As ligações perna-reforço foram executadas do mesmo modo que as ligações perna-linha-reforço, porém a braçadeira foi colocada na direção normal à perna.



Figura 5.4 – Exemplos de ligações por entalhes reforçadas com braçadeira

As ligações pernas-pendural foram executadas também por entalhe de dente simples com mecha e respiga e reforçadas por um esquadro metálico, materializado por duas chapas soldadas em forma de V invertido, na face frontal e outro igual na face posterior (Figura 5.5). Cada chapa tem uma largura de 50 mm e espessura de 5 mm. Cada esquadro foi fixo através de 7 parafusos HBS 6×160 mm.



Figura 5.5 – Exemplos de ligações por entalhe reforçadas por um esquadro metálico

As ligações diagonal-perna e diagonal-pendural foram executadas por (entalhe de dente simples com mecha e respiga) e reforçadas com 3 parafusos de HBS 6×200 mm colocados de baixo para cima, em cada ligação (ver Figura 5.6).

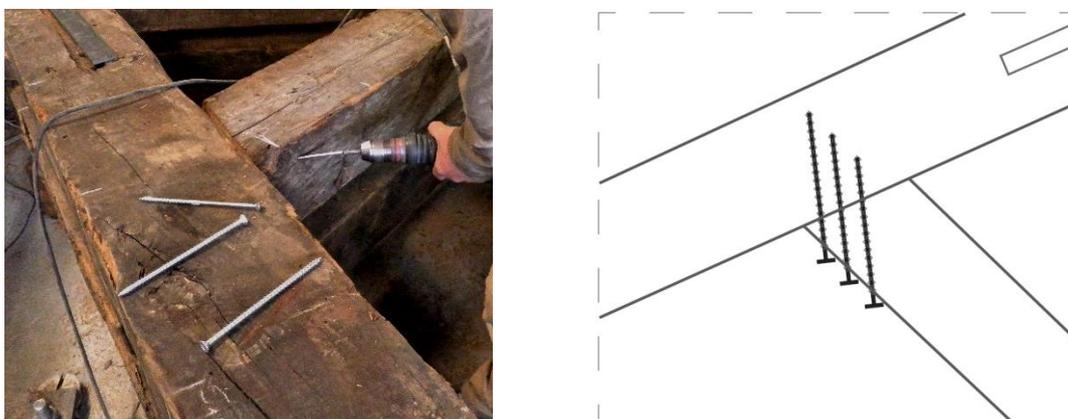


Figura 5.6 – Exemplo de ligações por entalhe reforçadas com parafusos – pormenor de aplicação

Devido ao facto dos pontos de carga aplicados apresentarem excentricidade em relação aos nós de ligação, executaram-se calços de madeira para evitar possível esmagamento dos elementos de madeira (Figura 5.7). Tal situação é admitida dada a reduzida área de ação da força concentrada.



Figura 5.7 – Calço de madeira para aplicação da carga

Finalmente para que as asnas sejam simétricas e para que os apoios se encontrem estáveis durante a realização do ensaio, dada a avançada deterioração nas extremidades, decidiu-se cortar sensivelmente 30 cm por peça (perna) e refazer os apoios com base nas dimensões e inclinações originais. O processo de intervenção dos apoios encontra-se ilustrado na Figura 5.8.



Figura 5.8 – Processo de intervenção dos apoios executada pelo carpinteiro

Todo o processo de montagem das asnas foi executado no pavimento do laboratório com as asnas na posição horizontal. Após o término da montagem levantaram-se as asnas e colocaram-se na posição para posteriormente serem ensaiadas (ver Figura 5.9). Como os ensaios foram executados à escala real, o maior condicionante, mais importante que o peso, foi a dimensão das asnas que tornava difícil qualquer movimento de translação ou rotação dos elementos.

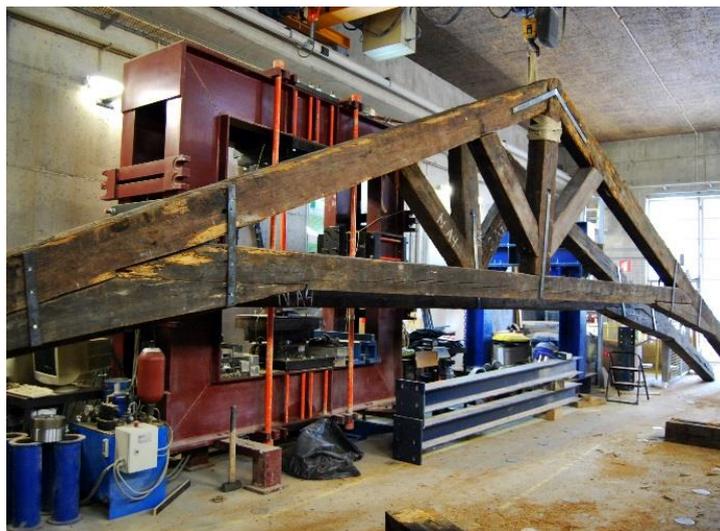


Figura 5.9 – Aspeto final das asnas montadas

5.2. Ensaio e instrumentação

O presente programa experimental foi realizado no Laboratório de Ensaio de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, e inclui ensaios de carga à escala real de duas asnas tradicionais de madeira.

O procedimento experimental teve como aspetos fundamentais a fixação dos apoios e o contraventamento das asnas durante o ensaio de carga. O mau funcionamento destes, não só originaria roturas indesejáveis para fora do plano da asna, como também poderia colocar em risco a segurança de pessoas que estivessem a assistir ao ensaio.

A solução adotada consiste em colocar a asna entre uma estrutura de pórticos metálicos conectados firmemente à laje de pavimento em betão armado do laboratório. Neste sentido, foram colocados 2 perfis metálicos, na face frontal e na face posterior, a meio vão e 2 perfis metálicos também correspondentes à face frontal e face posterior entre o ponto de atuação

da carga e o apoio. No total, a estrutura de contraventamento é composta por 6 perfis metálicos.

Em relação aos apoios, com a finalidade de simular de forma mais realista possível uma asna de madeira apoiada na parede de alvenaria, dois elementos de elementos de madeira foram colocados nos apoios, de forma a assim simularem a presença do frechal. Estes elementos de madeira foram fixos a perfis metálicos para impedir deslocamentos indesejados.

O sistema de carga aplicado foi um sistema com recurso a macacos hidráulicos. Para a realização do ensaio foram utilizados 2 macacos hidráulicos com capacidade de exercer uma força máxima de 500 kN e um deslocamento total de 150 mm, dispostos simetricamente e fixos à laje de pavimento. Durante o ensaio de carga, os atuadores exerciam uma força descendente, como se encontravam ligados aos calços de madeira por intermédio de varões roscados puxavam, em dois pontos concentrados, a estrutura para baixo.

Na Figura 5.10 ilustra-se o esquema de ensaio adotado nos ensaios de carga das asnas.

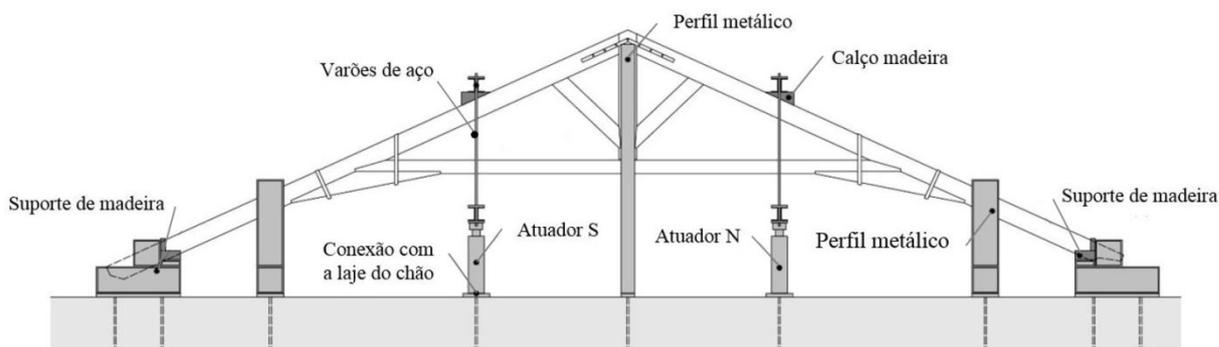


Figura 5.10 – Esquematização do ensaio realizado em laboratório, adaptado de Crivellari (2015)

Em termos de sistema de aquisição de dados, foram utilizados uma grande quantidade de transdutores de medição aplicados em vários pontos das asnas. A fim de gravar os deslocamentos absolutos e relativos ao longo dos ensaios realizados, 13 LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear) foram colocados em diferentes pontos das asnas.

Os atuadores, devido à natureza do procedimento de controlo de deslocamento adotado para a aplicação da carga, forneceram informação sobre o movimento nos pontos de carregamento, correspondentes à face superior das vigas. Como são pontos de carga localizados e como se encontram em constante tensão é expectável que suportem elevadas

deformações. Tal situação promoveu a colocação de LVDT junto dos atuadores, mas em contacto com a linha para averiguar os seus deslocamentos absolutos nesses locais.

Na Figura 5.11 demonstra-se o esquema com a disposição dos LVDT nos ensaios realizados.

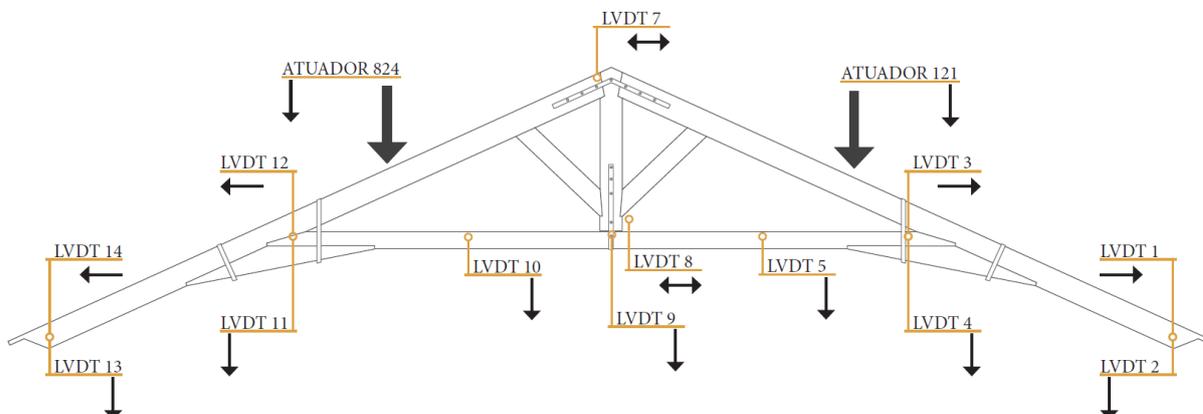


Figura 5.11 – Esquema com a disposição dos LVDT na realização dos ensaios

5.3. Metodologia do procedimento laboratorial

Na Asna 2 foram realizados dois ensaios com a estrutura original em que se alterou o tipo de apoio, simples e duplo, respetivamente no primeiro e segundo ensaio.

Previamente à realização do ensaio de carga total foi efetuado um pré-carregamento, de 20 kN em cada atuador, a fim de verificar a resposta inicial da estrutura. Além do mais, este ensaio prévio ajuda a fechar lacunas existentes nas ligações, assim impede movimentos livres por parte dos elementos aquando o ensaio de carga. Terminado este carregamento prévio ajustaram-se e apertaram-se alguns dispositivos de ensaio para se proceder ao carregamento total.

Posto isto, iniciou-se o ensaio com controlo do deslocamento, na estrutura original, a uma velocidade constante de 0,05 mm/s até ao máximo deslocamento permitido pelos atuadores, 150 mm.

Perante as diferentes roturas ocorridas, foram estudadas soluções de reforço com a finalidade de recuperar o máximo possível a capacidade suportada no primeiro ensaio. Neste sentido, baseando-se em Arriaga (2002) e Branco (2014) e dada a possibilidade oferecida pelo laboratório, foi possível aplicar três técnicas de reforço diferentes (uma técnica foi aplicada

na Asna 1 e duas técnicas foram aplicadas na Asna 2). A técnica de reforço aplicada na Asna 1 consiste em aplicar um cabo de pré-esforço e as técnicas de reforço aplicadas na Asna 2 consistem melhorar as zonas próximas da aplicação da carga utilizando peças de madeira lateralmente de um lado da asna e chapa metálica do outro lado.

Por fim, a asna foi novamente testada com o mesmo sistema estrutural e o mesmo modo de aplicação das cargas. Estes ensaios foram realizados apenas com apoio duplo devido a ter ocorrido rotura local da madeira junto ao apoio simples. Os ensaios realizados após a colocação do reforço não serão analisados porque não se encontram no âmbito desta dissertação. Para informações sobre os resultados obtidos na Asna 1 consultar Gomes *et al.* (2015).

Salienta-se que os ensaios de carga, na estrutura original e com o reforço, foram efetuados primeiramente na Asna 2, após a sua concretização a asna foi retirada e substituída pela Asna 1 que foi submetida ao mesmo processo: ensaios de carga na situação original e depois de reforçada. Na Figura 5.12 ilustra-se a realização do ensaio de carga na estrutura original da Asna 2.



Figura 5.12 – Realização do ensaio de carga na estrutura original da Asna 2

5.4. Análise de resultados

A madeira é um material natural e anisotrópico, por isso, é muito difícil durante a construção evitar a heterogeneidade das secções. Além disso, o processo de degradação dos elementos enfatiza a variabilidade das secções. Por conseguinte, o comportamento das asnas tradicionais, mesmo sob carregamento simétrico é não-simétrico. A resposta das asnas é

fortemente dependente das secções transversais dos elementos de madeira, propriedades do material, ligações, tipo de apoio e condições de carga (Branco, 2008).

5.4.1. Asna 2

Posto isto, no âmbito desta dissertação, afere-se a influência do tipo de apoio, simples e duplo, no comportamento da asna (ver Figura 5.13). Para isso serão analisados os gráficos força-deslocamento registados pelos LVDT em cada um dos ensaios, em que no eixo horizontal mede o deslocamento e o eixo vertical a carga aplicada na estrutura.



Figura 5.13 – Tipo de apoio ensaiado: a) apoio simples; b) apoio duplo

Analisando a Figura 5.14 conclui-se que a resposta da ligação a Sul em apoio duplo, para esforços de compressão, é uma resposta dúctil, que provoca apenas esmagamento da madeira na ligação. Pelo contrário, a resposta da ligação em apoio simples apresentou uma resposta frágil dada a separação das fibras da madeira da Perna, rotura por corte com tração paralela ao fio (ver Figura 5.16).

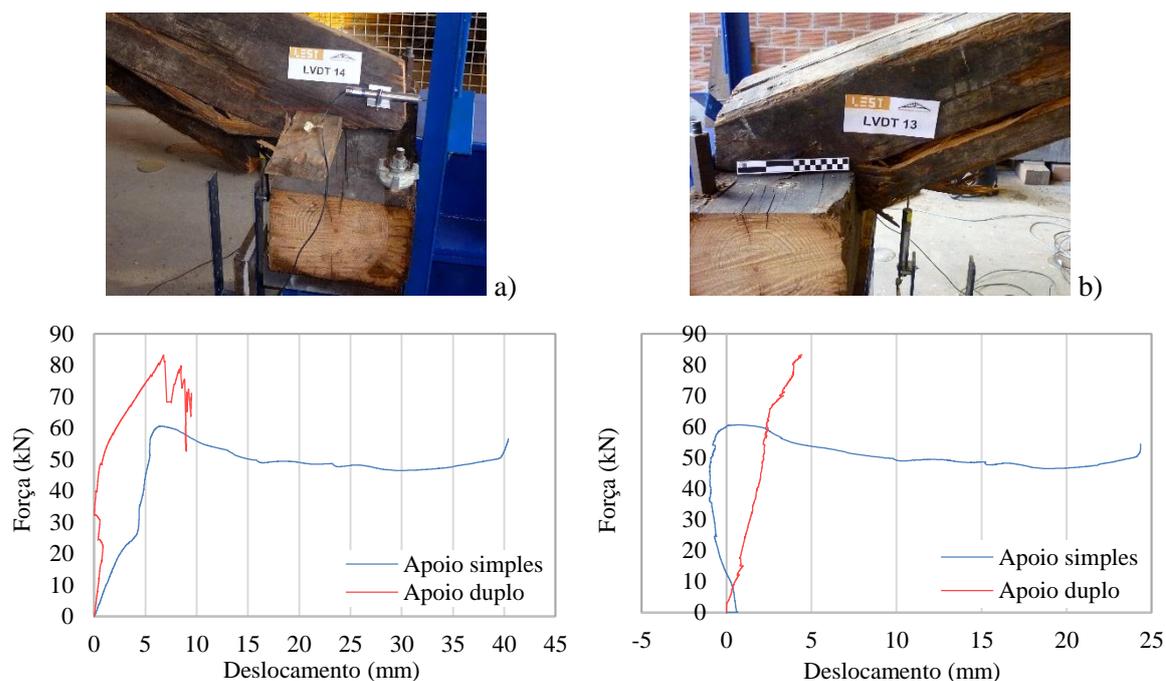
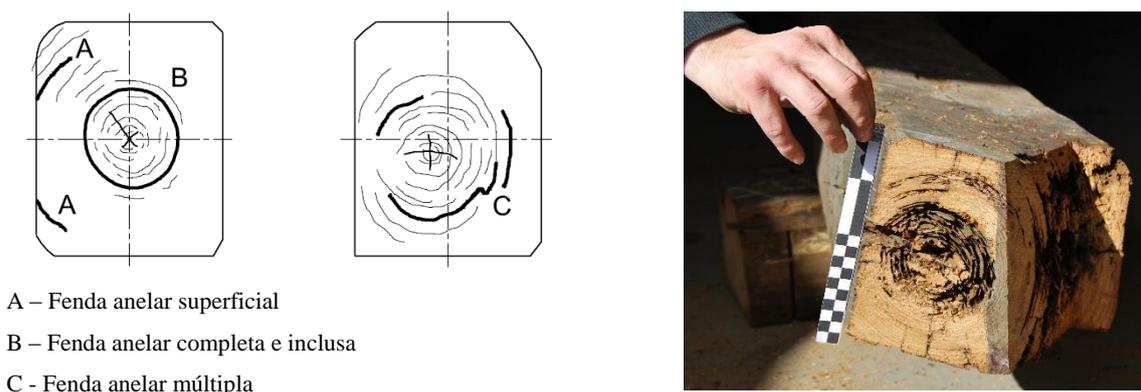


Figura 5.14 – Curvas força-deslocamento obtidas no Apoio Sul para os tipos de apoio considerados: a) na direção horizontal; b) na direção vertical

A antecipação da rotura de corte neste apoio deveu-se ao estado avançado de degradação presente neste apoio conjuntamente com uma anomalia na zona de entrega designada por fenda anelar ou “casca de cebola”. A degradação existente acentuou a ação das fendas anelares, ou seja, promoveu a separação do lenho morto (menos resistente) do lenho vivo, que reduz substancialmente a resistência ao corte dessa secção (Figura 5.15).



- A – Fenda anelar superficial
- B – Fenda anelar completa e inclusa
- C - Fenda anelar múltipla

Figura 5.15 – Identificação de fenda anelar segundo a norma UNI 11035-1:2003 (UNI, 2003a)

Como se pode observar na Figura 5.16, a ligação quase não sofreu dano devido ao esmagamento. Contudo, como a fenda anelar reduz substancialmente a resistência ao corte da madeira, a rotura ocorreu prematuramente. Na Figura 5.16 também é bastante visível o

afastamento das fibras de madeira menos resistentes das mais resistentes por tração perpendicular às fibras.



Figura 5.16 – Rotura local do apoio simples a Sul da asna

No apoio localizado a Norte, tal como se pode verificar na Figura 5.17, o deslocamento horizontal na ligação ocorreu para fora da asna. Deste modo, provocou esforços de compressão e consequente esmagamento da madeira no apoio e na Perna. Em relação ao deslocamento vertical, a resposta da ligação é antagónica, sendo que para o apoio simples a Perna afastou-se do apoio, enquanto que em apoio duplo a Perna exerce esforços de compressão e esmagamento da madeira na ligação. Constata-se que a entrega Norte pertence a uma classe mais baixa comparativamente com a entrega Sul, porém os deslocamentos ocorridos na entrega Norte são inferiores, tal situação é verificada devido à entrega Norte não apresentar fendas anelares.

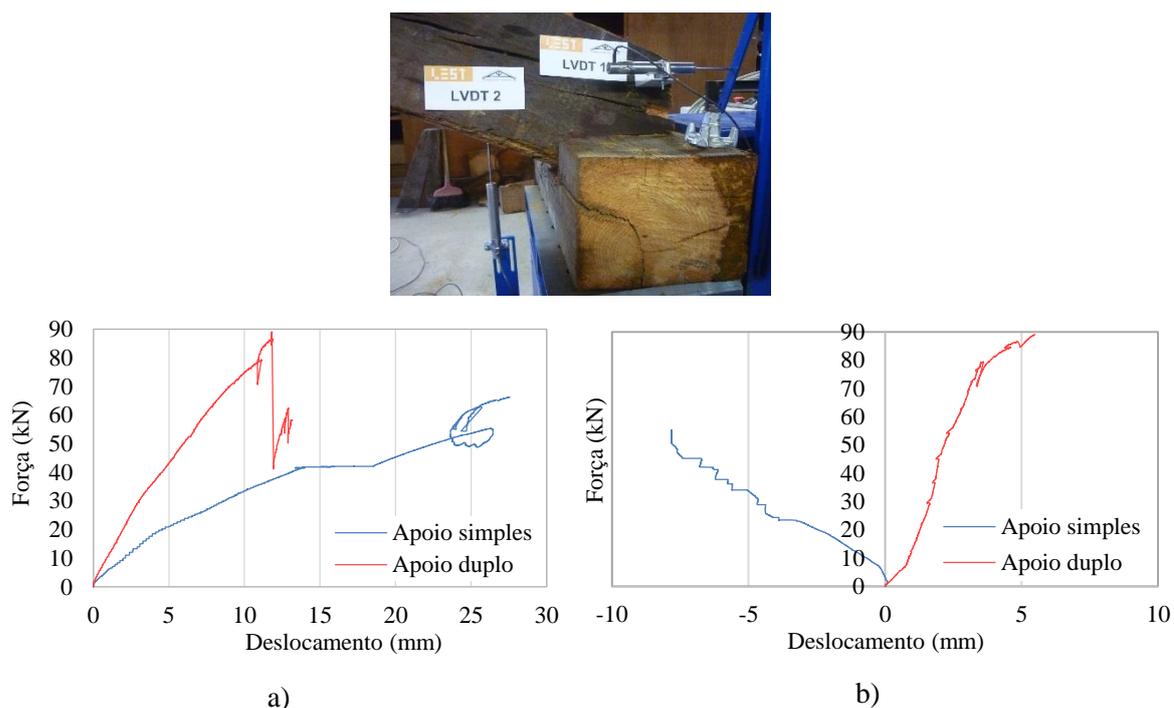


Figura 5.17 – Curvas força-deslocamento obtidas no Apoio Norte para os tipos de apoio considerados: a) na direção horizontal; b) na direção vertical

Observando o gráfico da Figura 5.18, denota-se que a resposta da asna perante o carregamento simétrico não é totalmente simétrica, visto que para ambos os tipos de apoio considerados, para condições de apoio simétricas, os deslocamentos verticais e a carga suportada em pontos de posições simétricas da asna diferem. Tal situação poderá dever-se pelo facto de o lado Norte da asna deter um maior nível de degradação que o lado Sul, condicionante no desempenho com o procedimento de carga aplicado, por conseguinte, apresenta uma maior deformação para uma menor capacidade de carga.

Esta evidência confirma os resultados obtidos na classificação visual em que uma maior percentagem de segmentos com classes mais baixas e um maior nível de degradação correspondia ao lado Norte da asna. Por comparação, para o apoio duplo respetivamente a Norte e a Sul, verificou-se uma diferença de aproximadamente 5 mm em relação ao deslocamento vertical e uma diferença de 10 kN relativamente ao nível de carga suportado.

Denota-se também que o apoio duplo proporciona uma maior rigidez à estrutura.

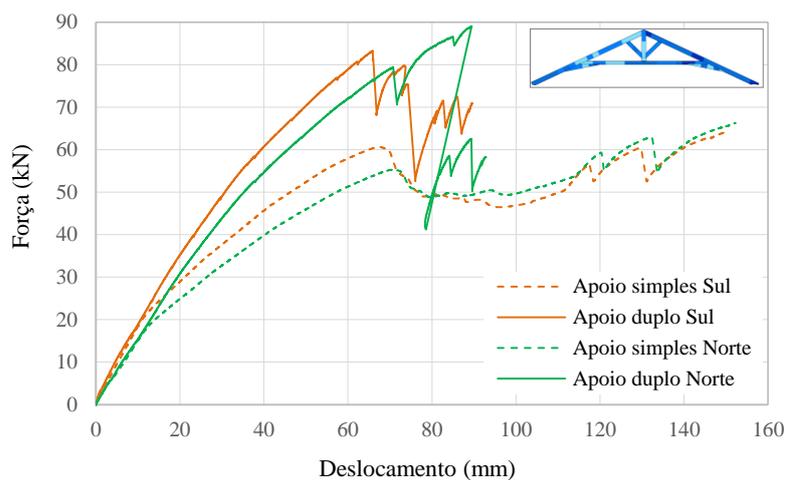


Figura 5.18 - Curvas força-deslocamento obtidas na linha, a Sul (LVDT 10) e a Norte (LVDT 5) para os tipos de apoio considerados

Em todas as circunstâncias, o comportamento da ligação da Perna-Linha, como esperado não se deslocou verticalmente e apenas se moveu num máximo de 4 mm horizontalmente no sentido de fechar a ligação (Figura 5.19).

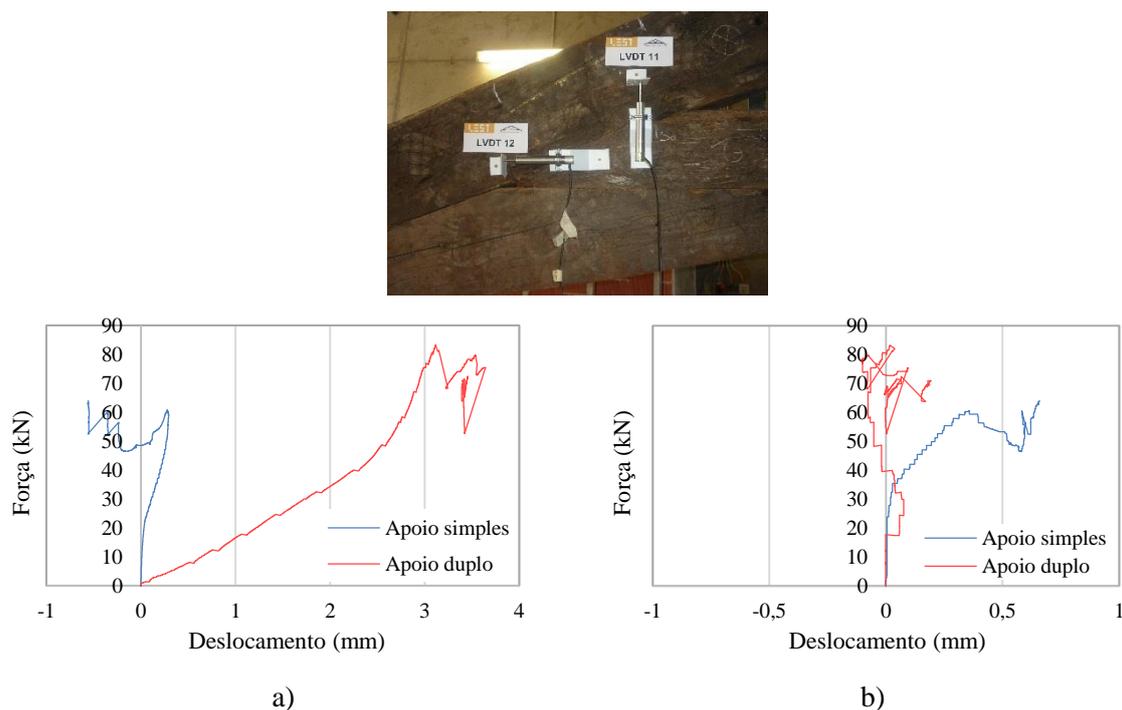


Figura 5.19 – Curvas força-deslocamento obtidas na ligação Perna - Linha para os tipos de apoio considerados: a) na direção horizontal; b) na direção vertical

A ligação das Pernas – Pendural, executada por entalhe e reforçada por um esquadro de 50 mm de largura e 5 mm de espessura, revelou-se bastante eficaz na medida em que não se

verificaram deslocamentos em apoio simples e apenas um deslocamento máximo de 6 mm para os níveis de carga máximos que a asna conseguiu suportar (Figura 5.20).

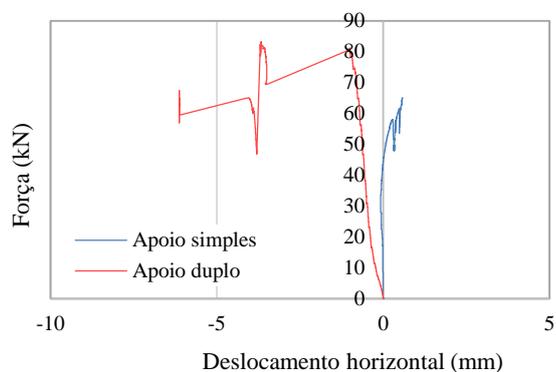


Figura 5.20 - Curvas força-deslocamento obtidas na ligação Pernas - Pendural para os tipos de apoio considerados, na direção horizontal

A ligação Pendural-Linha, materializada por entalhe e reforçada por uma braçadeira de 50 mm de largura e 5 mm de espessura, na direção normal à linha funcionou corretamente. Assim, verificou-se que a ligação foi eficiente na medida em que possibilitou a suspensão da Linha no pendural, mas permitindo que o Pendural se aproxime da linha sem a introdução de esforços indesejáveis.

O elemento Linha em apoio simples, devido ao afastamento dos apoios e à redistribuição de esforços, desceu verticalmente. Em apoio duplo, a Linha também desceu verticalmente devido à redistribuição de esforços.

De um modo geral verificou-se que o reforço das ligações exibiu uma maior capacidade resistente e de rigidez e uma melhoria substancial na ductilidade.

As deformadas verificadas para ambos os apoios ilustram-se nas Figura 5.21 e Figura 5.22. Analisando ambos os comportamentos é possível verificar diretamente que todos os deslocamentos ocorridos na asna são maiores quando os apoios são simples.

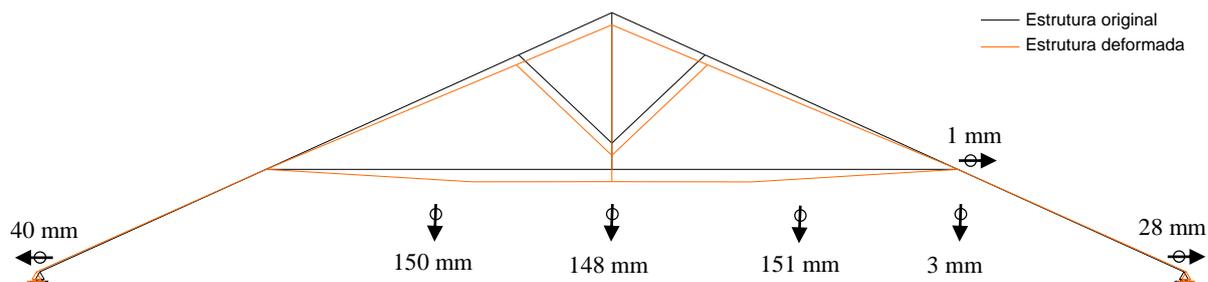


Figura 5.21 – Deformada da Asna 2 com apoios simples

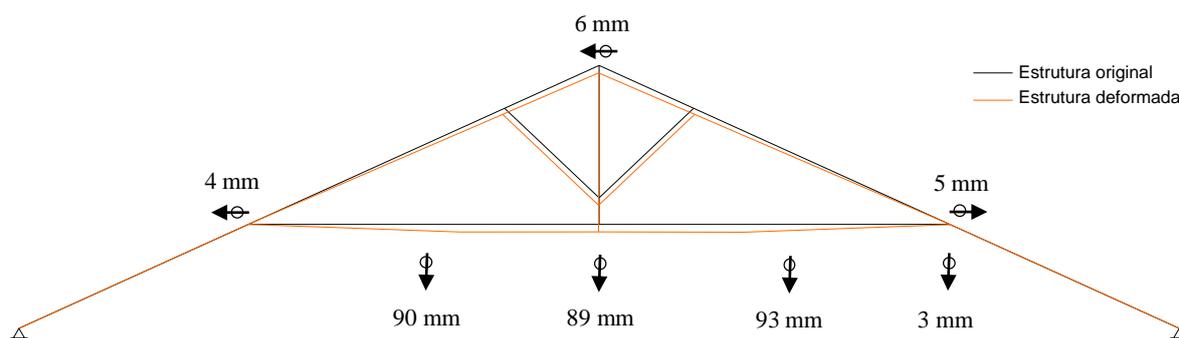


Figura 5.22 - Deformada da Asna 2 com apoios duplos

Em todas as curvas força-deslocamento analisadas verifica-se uma certa oscilação do registo da carga aplicada, devido ao facto da madeira ser um material fibroso e, por isso, com perda gradual da resistência evidenciando que a madeira resiste melhor às ações instantâneas. Além do mais, as ligações dos elementos da asna vão cedendo.

5.4.1.1. Danos ocorridos em Apoio simples

Tal como descrito no ponto anterior, a rotura em apoio simples ocorreu no apoio Sul para um deslocamento horizontal de 40 mm numa força de 54,44 kN. É importante referir que as pernas da asna, principalmente a Perna Sul, apresentavam uma ligeira distorção e durante os ensaios essa distorção acentuou-se (Figura 5.23).



Figura 5.23 – Distorção da Perna Sul

Nas ligações perna-linha verificou-se esmagamento e falta de resistência ao corte do dente (Figura 5.24 a)) e a ligação linha-reforço ficou desligada (Figura 5.24 b)).

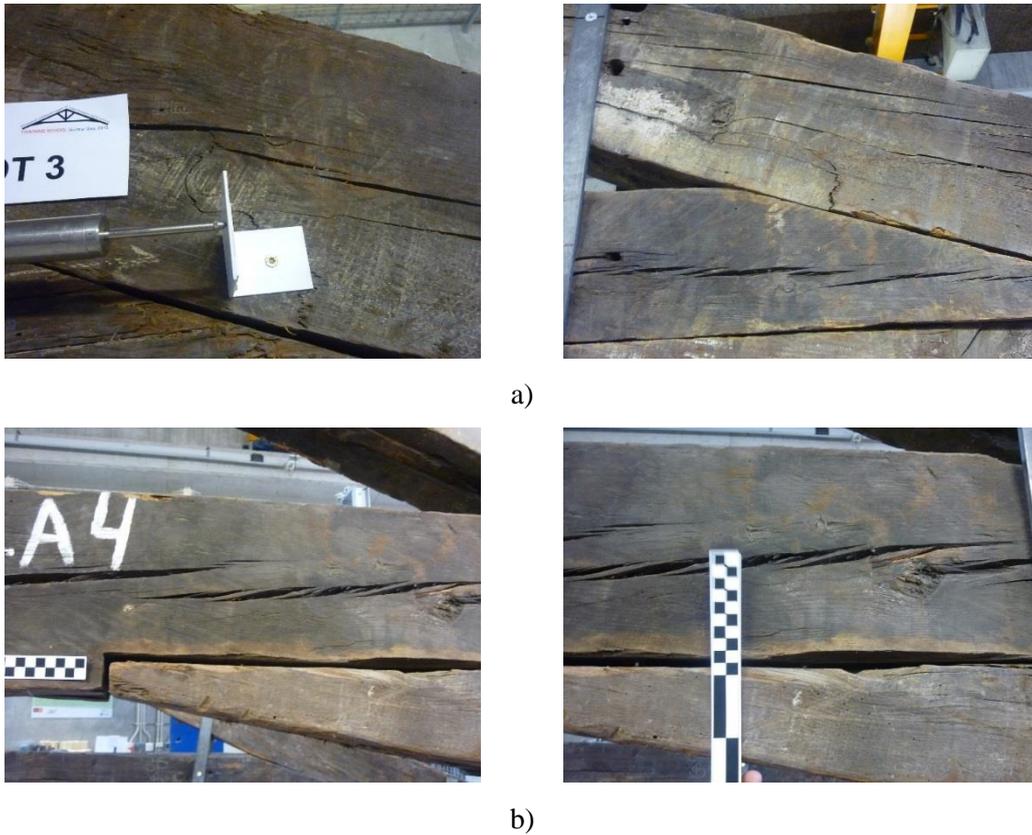


Figura 5.24 – Rotura Asna 2 em apoio simples: a) rotura por corte do dente da ligação perna-linha; b) dessolidarização da ligação linha-reforço

5.4.1.2. Danos ocorridos em Apoio duplo

No ensaio em que se procedeu à materialização dos apoios duplos da asna, a asna apresentou um comportamento estável até à rotura. A asna rompeu junto dos locais de aplicação da carga para uma capacidade de carga na Perna Sul e na Perna Norte de 80 kN e 90 kN, respetivamente.

Tal como se pode visualizar na Figura 5.25, ambas as pernas romperam na face inferior e em segmentos próximos da ligação perna-linha devido à presença de defeitos. A ligação Perna Norte – Pendural também se verificou insuficiente apesar de se ter colocado o esquadro dado que a madeira neste local se encontrava bastante degradada e o elemento de reforço não foi capaz de manter a integridade da ligação. Também se pode verificar que a rotura dos elementos ocorreu em segmentos que foram inicialmente considerados como possíveis segmentos frágeis devido à presença de uma classificação visual baixa.

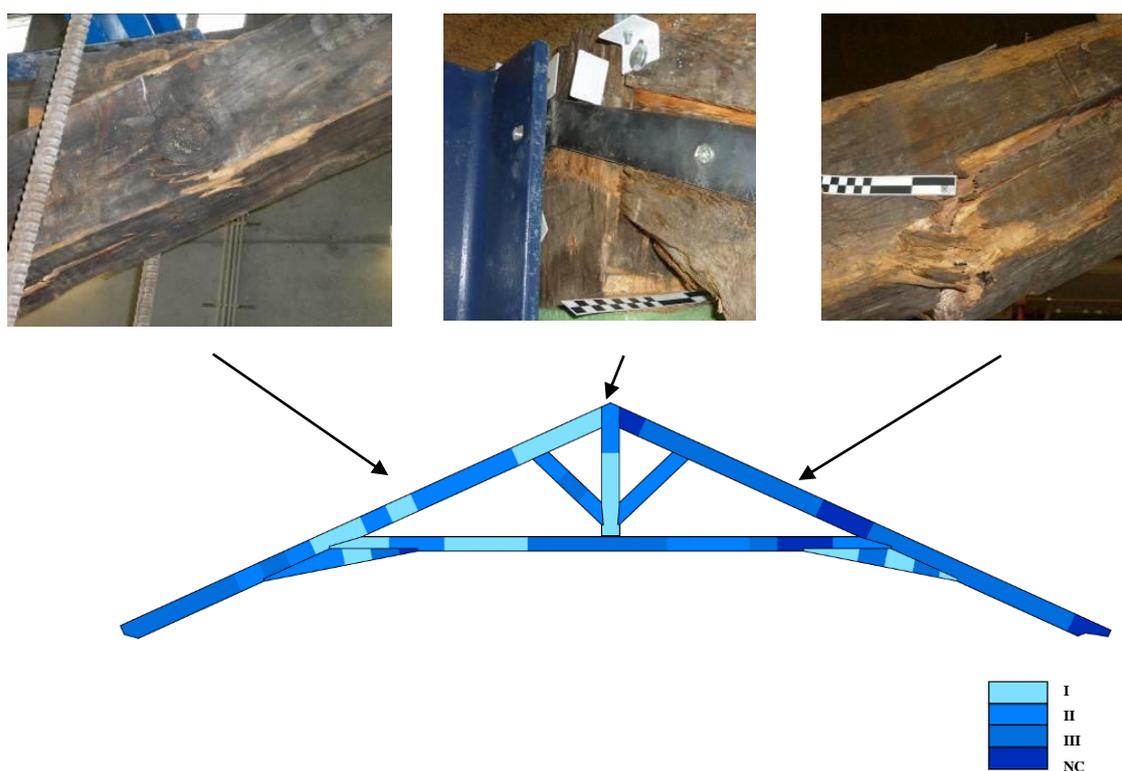


Figura 5.25 – Classificação visual da Asna 2 com detalhes das roturas das pernas e da ligação Pendural - Pernas

5.4.2. Asna 1

A Asna 1 rompeu para uma capacidade de carga na Perna Sul e na Perna Norte de 125 kN e 140 kN, respetivamente. Na Perna Sul, tal como se pode visualizar na Figura 5.26 a rotura ocorreu na face inferior da Perna Sul e na ligação da diagonal com a perna devido à resistência insuficiente dessa ligação. A Perna Norte rompeu por corte na zona de aplicação da carga devido à presença de defeitos.

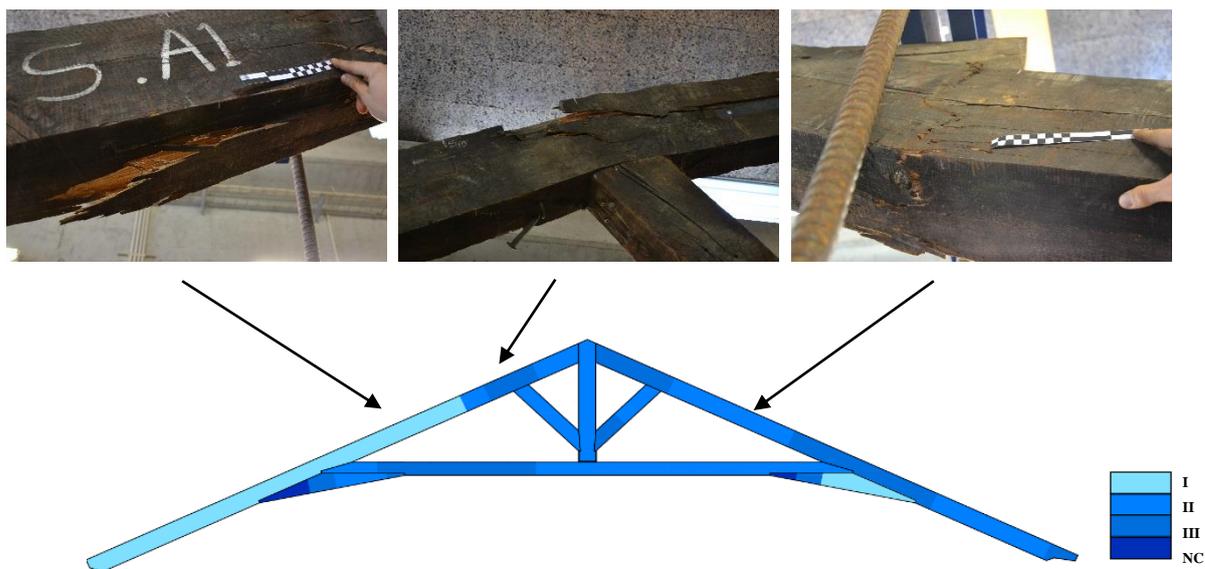


Figura 5.26 – Classificação visual da Asna 1 com detalhes das roturas das pernas e da ligação Diagonal - Perna

5.5. Análise comparativa das asnas

Na Figura 5.27 apresentam-se os resultados dos ensaios de carga das asnas, considerando os gráficos de força-deslocamento. Nos gráficos da Figura 5.27 é possível verificar diretamente que a Asna 1 suportou um nível de carga superior ao da Asna 2. Tal facto é sustentado pelos resultados da inspeção visual que demonstram globalmente uma classificação visual superior por parte da Asna 1. Deste modo, é possível comprovar a fiabilidade da inspeção e respetiva classificação visual efetuada aos elementos integrantes das asnas.

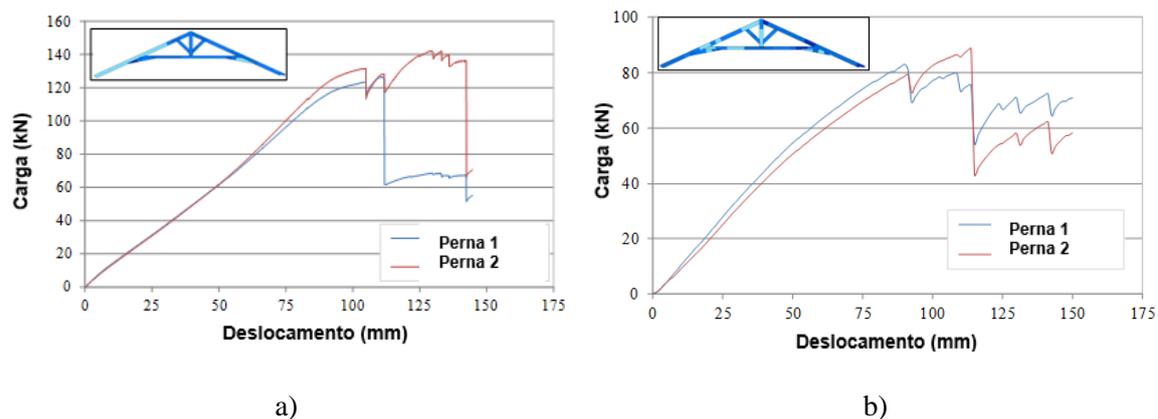


Figura 5.27 – Resultados do ensaio de carga à escala real das asnas: a) Asna 1; b) Asna 2 (Gomes et al., 2015)

5.6. Conclusões

A Asna 1 e a Asna 2 pertenciam à mesma cobertura, pelo que se pode afirmar que o material é o mesmo e apresenta as mesmas propriedades. Como a Asna 1 conseguiu suportar um nível de carga superior ao verificado na Asna 2, conclui-se que os defeitos reduzem a resistência da madeira. Também foi possível verificar que as roturas ocorreram em zonas que apresentam defeitos. Particularmente na Asna 2 também se verificou a insuficiência de uma ligação, ligação Perna-Diagonal, o que originou rotura por corte.

Relativamente ao tipo de apoio, foi possível concluir que as asnas apresentam um melhor comportamento quando apoiadas em apoio duplo comparativamente com o apoio simples pois, o apoio duplo concede uma maior rigidez à estrutura e, conseqüentemente permite uma melhor integridade das ligação e os deslocamentos são menores.

Capítulo 6

Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros

Ao longo dos tempos, a madeira como material leve, abundante, adaptável e de fácil manuseamento, tem sido utilizada nas mais diversas aplicações estruturais, com particular relevo, nas coberturas. As coberturas tradicionais de madeira possuem na sua estrutura principal asnas. A configuração das asnas foi projetada tendo em consideração a evolução da construção, em que para cobrir vãos maiores, aumentou-se a complexidade da geometria das asnas.

As asnas simples caracterizam-se por apresentar um elemento horizontal, a linha, duas pernas inclinadas de modo a formar as pendentes do telhado e pelo pendural, elemento vertical ligado da linha à ligação das pernas que suporta as pernas no pendural. Esta asna funciona como um sistema articulado plano, ou seja, encontra-se sujeita essencialmente a esforços axiais. No entanto, devido ao peso próprio dos seus elementos e da atuação de ações assimétricas originam esforços de flexão. A linha deve estar suspensa no pendural de modo a reduzir as deformações devidas ao peso próprio e a ligação deve ser articulada e impedir as deformações no plano ortogonal ao plano da asna.

As ligações tradicionais, materializadas por entalhe de dente simples ou duplo, os esforços são transmitidos por compressão e/ou atrito. Estas ligações podem incluir recurso a mecha e respiga, para assegurar a perfeita conexão entre as peças e prevenir ao mesmo tempo deslizamentos laterais das mesmas, por intermédio de penetração. Além disso, de forma a melhorar o contacto entre os elementos ligados são normalmente adicionados elementos metálicos. Os elementos metálicos garantem a estabilidade das ligações perante causas acidentais e diminuem os defeitos resultantes das ligações por entalhe. As soluções de reforço mais aplicadas em ligações tradicionais de madeira são esquadros, braçadeiras e varões metálicos.

Os principais problemas de instabilidade, em estruturas de madeira, surgem nas ligações entre os elementos estruturais sendo, por este motivo o aspeto mais crítico numa estrutura de madeira. As ligações entre elementos estruturais estão sujeitas a esforços e tensões localizadas, por isso, quando mal concebidas resultam na redução da resistência global da estrutura. O comportamento global da asna é dependente da rigidez das ligações. As ligações perna-linha são as mais condicionantes, não apenas pelos esforços que aí se concentram mas por serem zonas onde a degradação biológica é mais frequente.

Pelo facto de a madeira ser um material natural, as suas propriedades mecânicas relevantes em termos estruturais, sofrem alterações ao longo do tempo. Essas alterações resultam principalmente da degradação biológica e da degradação causada por agentes atmosféricos. A estabilidade local e global da estrutura é também comprometida por conceções estruturais incorretas.

Para verificação do estado de conservação dos elementos deve-se proceder a um diagnóstico preciso e profundo complementado com diferentes ensaios não-destrutivos aplicados. O facto de ser necessário efetuar diferentes ensaios não-destrutivos deve-se, por vezes, à natureza dos resultados obtidos, que é somente qualitativa. Os ensaios deverão ser o menos invasivos possível para manter a integridade da estrutura.

A inspeção visual permite a atribuição de valores das propriedades do material e a sua correlação com outras propriedades para a caracterização mecânica do material. Existem poucas normas para classificação visual de elementos integrantes de coberturas existentes de madeira, de entre as quais se destacam as normas italianas UNI 11035-1:2003, UNI

11035-2:2003 e 11119:2004. Dentro destas, os parâmetros aplicados na inspeção e classificação visual deste projeto foram os preconizados pela norma UNI 11119.

A inspeção e diagnóstico permite identificar as secções com classificações mais baixas e, assim, aferir sobre quais as secções críticas dos elementos através da análise dos mapas de danos da classificação visual, penetração por impacto, resistência à perfuração controlada e ultrassons.

A aplicação das cargas durante os ensaios não foi realizada nos nós das asnas, o que implica uma redução significativa da resistência dos elementos e compromete a segurança global das asnas, Figura 6.1.

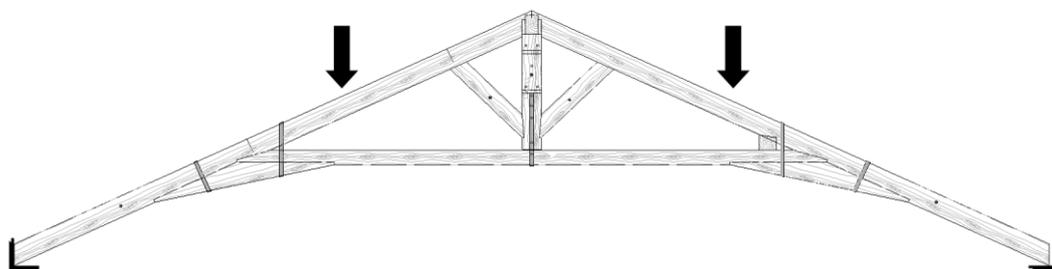


Figura 6.1 – Aplicação das cargas com excentricidade em relação aos nós (Gomes *et al.*, 2015)

Posto isto, após a realização do ensaio de carga foi possível verificar a concordância dos resultados obtidos na inspeção e diagnóstico das asnas, ou seja, verificar se as roturas ocorreram em secções consideradas como críticas.

Na Asna 2 aferiu-se de que forma o tipo de apoio, simples e duplo, influenciava o comportamento da estrutura. Assim, verificou-se que na presença de apoio simples, ocorreram roturas prematuras devido a grandes deslocamentos, principalmente nos apoios colocando em causa a integridade da estrutura. Nas ligações também se verificou um maior afastamento destas comparativamente ao afastamento das ligações em apoio duplo. Nos apoios, para o sistema estrutural em apoio duplo, apenas se verificou o esmagamento destes.

Assim, neste trabalho foi possível comprovar que a resposta das asnas é fortemente dependente do tipo de apoio, na medida em que se verifica uma redução significativa dos deslocamentos para apoio duplo, bem como, uma maior redistribuição dos esforços e, por conseguinte, uma maior rigidez da estrutura.

Tal como verificado visualmente, a Asna 2 apresentava mais defeitos e uma maior degradação, ou seja, segmentos com classificações mais baixas que a Asna 1. O ensaio

comprovou tal conclusão retirada na inspeção visual, pois a Asna 1 suportou uma capacidade de carga superior à Asna 2.

Contudo, por inspeção visual da Asna 2, a Perna Sul apresentava uma melhor classificação em comparação com a Perna Norte, o que leva a concluir que a Perna Sul apresenta uma maior resistência. Porém, no ensaio de carga não se verifica (80 kN a Perna Sul e 90 kN a Perna Norte), ou seja, a Perna Sul apesar de ser classificada por classes de maior resistência, suportou um nível de carga inferior ao da Perna Norte. Tal situação ocorreu devido ao apoio da Perna Sul apresentar um nível de degradação avançado conjuntamente com a presença de fendas anelares, por este motivo, ocorreu uma redução da resistência do apoio. As fendas anelares provocam o afastamento das fibras e, por conseguinte, diminuem significativamente a resistência dos segmentos.

Em relação às roturas ocorridas em ambas as asnas verificou-se que estas ocorreram em zonas que apresentam defeitos. Nos apoios ocorreram roturas por esmagamento. Particularmente na Asna 1 ocorreu uma rotura por insuficiência da ligação Perna-Diagonal e na Asna 2 devido à presença de degradação na ligação Pernas-Pendural, a integridade da ligação ficou comprometida verificando-se uma rotura junto desta ligação.

O facto de o Pendural se encontrar suspenso na Linha levou a concluir que esta ligação foi eficiente na medida em que não se introduziram esforços de flexão indesejáveis.

Devido à heterogeneidade das secções e do processo de degradação, o comportamento das asnas sob carregamento simétrico demonstrou-se não simétrico.

Comparando os resultados da inspeção e diagnóstico com os resultados dos ensaios de carga, observou-se que a classificação visual aliada com os resultados dos ensaios não-destrutivos podem identificar eficientemente possíveis secções frágeis.

Por fim, verificou-se que as asnas submetidas a ensaio de carga suportaram uma carga aproximadamente oito vezes superior à carga de serviço, confirmando a elevada resistência residual que este tipo de estrutura/material pode possuir, embora aparentemente possa parecer deteriorada.

6.1. Desenvolvimentos futuros

Na presente dissertação foram determinados todos os parâmetros para a caracterização dos elementos constituintes das asnas tradicionais e foi executado o ensaio de carga até à rotura. Ou seja, após cumprida esta importante tarefa, sugere-se para um trabalho futuro a modelação numérica dos ensaios de carga realizados.

Outra sugestão de trabalho futuro é a realização de diferentes ensaios não-destrutivos, tais como a termografia e/ou raios X. Seria uma forma de avaliar as potencialidades de outros ensaios não-destrutivos, já que os efetuados neste trabalho são os mais correntes neste tipo de análise.

Referências Bibliográficas

- Amaral, I., Amaral, L., & Gama, M. G. (2012). *As redes sociais e a cor dos seus logótipos*. Paper presented at the VI World Congress on Communication and Arts, Austrália.
- Appleton, J. (2003). *Reabilitação de edifícios antigos. Patologias e tecnologias da intervenção*: Edições Orion.
- Arnheim, R. (2011). *Arte & Percepção Visual: uma psicologia da visão criadora*. São Paulo: Cengage.
- Arriaga, F. (2002). *Intervención en estructuras de madera*. Madrid: AITIM.
- Baldassino, N., Piazza, M., & Zanon, P. (1996). In situ evaluation of the mechanical properties of timber structural elements. Proceedings de Internacional symposium on nondestructive testing of wood (pp. 369-377)
- Branco, F., & Brito, J. d. (2012). *Diagnóstico e patologia de construções em madeira*. Lisboa: Instituto Superior Técnico (IST).
- Branco, J., Cruz, P., & Piazza, M. (2006). Asnas de madeira: A importância da rigidez das ligações. In LNEC (Ed.), *Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas* (4ª ed.). Lisboa.
- Branco, J., Cruz, P., Varum, H., & Piazza, M. (2005). Portuguese traditional timber trusses: static and dynamic behaviour (19/05 ed., pp. 50): Universidade do Minho.
- Branco, J., Santos, A., & Cruz, P. (2008). Asnas Tradicionais de Madeira: Evolução, Comportamento e Reforço com Materiais Compósitos. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 5-18.
- Branco, J. M. (2008). *Influence of the joints stiffness in the monotonic and cyclic behaviour of traditional timber trusses. Assessment of the efficacy of different strengthening techniques*. (Tese de Doutoramento), Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Branco, J. M. (2014). Reforço de elementos existentes de madeira *Seminário Intervir em construções existentes de madeira* (pp. 71-86). Guimarães.
- Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2014). Coberturas tradicionais de madeira : caracterização, inspeção e classificação.
- Branco, J. M., Piazza, M., & Cruz, P. J. (2010). Structural analysis of two King-post timber trusses: Non-destructive evaluation and load-carrying tests. *Construction and Building Materials*(3), 371-383.

- Branco, J. M., Piazza, M., & Cruz, P. J. S. (2011). Experimental evaluation of different strengthening techniques of traditional timber connections *Engineering Structures* (Vol. 33, pp. 2259–2270).
- Branco, J. M., & Sousa, H. S. (2014). *Métodos de Inspeção e Classificação Visual de Elementos de Madeira* Guimarães, Portugal: Chapa 5.
- Brites, R. (2011). *Avaliação de segurança das estruturas antigas de madeira*. (Tese Doutoramento), Universidade do Minho, Guimarães.
- Brites, R. D., Neves, L. C., Machado, J. S., Lourenço, P. B., & Sousa, H. S. (2013). Reliability analysis of a timber truss system subjected to decay *Engineering Structures* (Vol. 46, pp. 184-192).
- Bucur, V., & Böhnke, I. (1994). Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. *Ultrasonics*, 32(5), 385-390.
- Cavalli, A., & Togni, M. (2011). Combining NDT and visual strength grading to assess ancient timber beams stiffness to evaluate strengthening interventions suitability *17th International Nondestructive testing and evaluation of wood symposium* (pp. (2)593-601).
- Ceccotti, A., & Uzielli, L. (1989). *Sul grado di affidabilità strutturale sulle strutture in legno antiche* Paper presented at the 2 Congresso Nazionale sul Restauro del Legno, Florença, Itália.
- CEN. (2010). EN 408:2010 - Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. Brussels: European Committee for Standardization.
- Costa, F. P. (1955). *Asnas de madeira* (P. Editora Ed. Vol. 1): Enciclopédia prática da construção civil.
- Crivellari, G. (2015). *Prestressing system for retrofitting a historical timber truss* (Dissertação de Mestrado), Universidade do Minho, Portugal.
- Cruz, H. (2001). Patologia, avaliação e conservação de estruturas de madeira (II Curso Livre Internacional de Património ed.). Santarém: Associação Portuguesa dos Municípios com centro histórico; Fórum UNESCO Portugal
- Cruz, H. (2011). *Inspeção a linguagem das anomalias*. Lisboa: LNEC.

- Cruz, H., & Palma, P. (2004). *Ligações em estruturas de Madeira: Para além dos pregos quadrados* Lisboa: LNEC.
- Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., . . . Lourenço, P. B. (2013). Guidelines for the on-site assessment of historic timber structures. *International Journal of Architectural Heritage*. doi:10.1080/15583058.2013.774070
- Dias, A., Cruz, H., Machado, J., S.Custódio, J. E. P., & Palma, P. M. C. (2009). *Avaliação, conservação e reforço de estruturas de madeira* (V. José Saporiti Machado Ed.). Lisboa: Dashöfer Edições Profissionais Lda.
- Dias, T. (2008). *Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnóstico e intervenção estrutural*. (Dissertação de Mestrado), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Porto.
- EN. (2003). EN 408:2003. Timber structures – Structural timber and glued laminated timber – Determination of some physical and mechanical properties: CEN.
- Farina, M., Perez, C., & Bastos, D. (2006). *Psicodinâmica das cores em comunicação*. São Paulo: Editora Edgard Blücher.
- Feio, A. (2007). *Ensaio não destrutivos em estruturas de madeira - Métodos globais de ensaio Engenharia e Vida*.
- Feio, A., & Lourenço, P. B. (2005a). *Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos*. Braga, Universidade do Minho.
- Feio, A., & Lourenço, P. B. (2005b). *Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos - Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres-Bem utilizar a madeira*. Braga, Universidade do Minho.
- Feio, A. O. (2005). *Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour*. (Tese de Doutoramento), Universidade do Minho.
- Fernandes, V. (2014). *Verificação da segurança da cobertura de um edifício histórico*. (Dissertação de Mestrado), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

- Freitas, V. (2012). *Manual de Apoio ao Projecto de Reabilitação de Edifícios Antigos*. Porto: Ordem dos Engenheiros da Região Norte.
- Gantz, C. H. (2002). *Evaluating the efficiency of the Resistograph® to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species*. (Dissertação de Mestrado), Raleigh: University of North, Carolina State.
- Gomes, I., D., Kondis, F., Sousa, H. S., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2015). *Assessment and diagnosis of two collar timber trusses by means of visual grading and non-destructive tests*. Paper presented at the Historic Earthquake-Resistant Timber Frames in the Mediterranean Region, Lisboa.
- Görlacher, R. (1987). Non destructive testing of wood: an in-situ method for determination of density (Vol. 45, pp. 273-278). *Holz as Roh-und Werkstoff*.
- Görlacher, V. R., & Hättich, R. (1990). Untersuchung von altem Konstruktionsholz: Die Bohrenwiderstandsmessung. *Sondernausdruck aus Bauen mit Holz*: 6(90): 6.
- Houssayne, J. (2000). *Le triangle pédagogique - Théorie et pratiques de l'éducation scolaire* (Vol. 1): Editions Peter Lang.
- ICOMOS. (1999). Principles for the preservation of historic timber structures: International Council on Monuments and Sites.
- Kasal, B. (2010). In Situ Assessment of Structural Timber: State-of-the-Art, Challenges and Future Directions *Advanced Materials Research* (Vol. 133, pp. 43-52).
- Kasal, B., & Anthony, R. W. (2004). Advances in *in situ* evaluation of timber structures *Progress in Structural Engineering and Materials* (Vol. 6, pp. 94-103).
- Kasal, B., & Tannert, T. (2010). In situ assessment of structural timber: RILEM.
- Lear, G. C. (2005). *Improving the assessment of in situ timber members with the use of non-destructive and semi-destructive testing techniques*. (Tese de Mestrado), Universidade Estadual da Carolina do Norte, Raleigh.
- Lourenço, P. B. (2012). Metodologia para conservação de estruturas de madeira: Teoria e prática In P. B. Lourenço & J. M. Branco (Eds.), *Coberturas de Madeira* (pp. 103-117).

- Lourenço, P. B., Sousa, H. S., Brites, R. D., & Neves, L. C. (2013). In situ measured cross section geometry of old timber structures and its influence on structural safety *Materials and Structures* (Vol. 46, pp. 1193–1208).
- Machado, J., & Cruz, H. (1997). Avaliação do estado de conservação de estruturas de madeira. Determinação do perfil densidade por métodos não destrutivos. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 15-18.
- Machado, J. S., Dias, A., Cruz, H., Custódio, J., & Palma, P. (2009). *Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira* (V. Dashöfer Ed. 1ª ed.). Portugal.
- Madsen, B. (1998). Reliable timber connections *Progress in Structural Engineering and Materials* (Vol. I, pp. 245-252). Peterborough (Reino Unido) Construction Research Communications Limited.
- Martins, S. (2009). *MARTINS, Sérgio – Estruturas de Madeira – Inspeção e Diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo*. (Dissertação de Mestrado), Universidade do Minho, Guimarães.
- Medeiros, P., Sousa, H. S., Lourenço, P. B., & Ferreira, F. (2010). Plano de reconhecimento e inspeção do futuro Centro Interpretativo do Tapete de Arraiolos - Arraiolos. Relatório 10- DEC/E-17 (pp. 95). Universidade do Minho.
- Munafò, P. (2002). Analisi evolutiva delle capriate lignee in Italia. In Alínea (Ed.), *Le capriate lignee antiche per i tetti a bassa pendenza. Evoluzione, dissesti, tecniche di intervento* (pp. 21-72).
- NP. (1995). NP 4305:1995 – Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação Visual. Lisboa: IPQ.
- Oliveira, M., Sousa, H. S., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2015). Análise comparativa do desempenho de ultrassons na avaliação não destrutiva da madeira de Castanho. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, II, 31-43.
- Pala, H. (2007). Constituição e mecanismos de degradação biológica de um material orgânico: a madeira *Construção Magazine* (pp. 54-62). Leiria: Publindústria.
- Palaia, L. (2007). Structural Failure Analysis of timber Floors and Roofs in Ancient Buildings at Valencia (Spain) *ICOMOS IWC - XVI International Symposium*. Florença (Itália).

- Parisi, M. A., & Cordié, C. (2010). Mechanical behavior of double-step timber joints *Construction and Building Materials* (Vol. 24, pp. 1364–1371).
- Piazza, M., & Senno, M. (2001). Proposals and criteria for the preliminary evaluation, design and execution of works on ancient load-bearing timber structures. In Elsevier (Ed.), *Wooden handwork/ Wooden carpentry: European Restoration Sites* (pp. 263-277).
- Porteous, J., & Kermani, A. (2007). *Structural timber design to Eurocode 5*. Oxford (Reino Unido): Blackwell Publishing Ltd.
- Rinn, F., Schweingruber, F., & Schär, E. (1996). Resistograph and x-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and x-ray density charts of different wood species. *International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 50(4). doi:10.1515/hfsg.1996.50.4.303
- Rodrigues, R. M. S. (2004). *Construções Antigas de Madeira: experiência de obra e reforço estrutural*. (Dissertação de Mestrado), Universidade do Minho, Guimarães.
- Ronca, P., & Gubana, A. (1998). Mechanical characterisation of wooden structures by means of an in-situ penetration test *Construction and Building Materials* (Vol. 12, pp. 233-243).
- Segurado, J. E. S. (1975). *Trabalhos de Carpinteiro Civil* (L. Bertrand Ed.). Lisboa.
- Sevegnani, K. B., Ghelfi Filho, H., & Silva, I. J. O. d. (1994). Comparação de vários materiais de cobertura através de índices de conforto térmico *Sci. agric* (Vol. 51, pp. 1-7). Piracicaba (Brasil).
- Silva, B. (1997). Educação e Comunicação: uma análise das implicações do discurso audiovisual em contexto pedagógico *Tese de Doutoramento*. Braga, Braga, Portugal: Universidade do Minho.
- Sousa, H. S. (2013). *Methodology for safety evaluation of existing timber elements* (Tese de Doutoramento), Universidade do Minho, Guimarães.
- Sousa, H. S., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2012). Assessment of strength and stiffness variation within old timber beams *8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions*. Wroclaw Polónia: SAHC.
- Sousa, H. S., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2013). Effectiveness and subjectivity of visual inspection as a method to assess bending stiffness and strength of chestnut

- elements *Advanced Materials Research* (Vol. 778, pp. 175-182): Trans Tech Publications
- Sousa, H. S., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2014). Characterization of cross sections from old chestnut beams weakened by decay *International Journal of Architectural Heritage*, 8(3), 436-451.
- Sousa, H. S., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2014). Da inspeção à avaliação de segurança na reabilitação de estruturas de madeira. Seminário: Intervir em construções existentes (pp. 57-70). Guimarães, Portugal.
- Sousa, H. S., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2014). Prediction of global bending stiffness of timber beams by local sampling data and visual inspection *European Journal of Wood and Wood Products* (Vol. 72, pp. 453–461).
- Sousa, H. S., Machado, J. S., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2015). Onsite assessment of structural timber members by means of hierarchical models and probabilistic methods *Construction and Building Materials* (pp. 1-9).
- Sousa, H. S., Lourenço, P., & Neves, L. (2010). Avaliação de segurança de estruturas de madeira através de análise probabilística *Reabilitar - Encontro Nacional Conservação e Reabilitação de Estruturas*. Lisboa.
- Sousa, H. S., Sørensen, J. D., Kirkegaard, P. H., Branco, J. M., & Lourenço, P. B. (2013). On the use of NDT data for reliability-based assessment of existing timber structures *Engineering Structures* (Vol. 56, pp. 298-311).
- Tampone, G. (1996a). *Il restauro delle strutture di legno*. Milão, Itália: Ulrico Hoepli.
- Tampone, G. (1996b). *Timber structure rehabilitation* (1 ed.). Milão, Itália: Ulrico Hoepli.
- UNI. (2003a). UNI 11035-1, Structural timber - Visual strength grading for Italian structural timbers: terminology and measurement of features. *Ente Nazionale Italiano di Unificazione*. Milão (Itália).
- UNI. (2003b). UNI 11035-2, Visual Strength Grading Rules and Characteristic Values for Italian Structural Timber Population. *Ente Nazionale Italiano di Unificazione*. Milão (Itália).

- UNI. (2004). UNI 11119, Cultural Heritage - Wooden artifacts - Load-bearing structures - On site inspections for the diagnosis of timber members. *Ente Nazionale Italiano di Unificazione*. Milão (Itália).
- Uzielli, L. (1992). *Valutazione della capacità portante degli elementi strutturali lignei* (Vol. 12): L'Edilizia.
- Walesch, C. (2015). DECOM™: <http://www.rinntech.de/content/view/15/46/lang,english/> (accedido a 20/04/2015)

Anexo 1 – Inspeção Visual

Inclinação Fio Asna 1

Elemento	Frente	Baixo	Cima	Trás	Classe
Perna Sul	3%	0%			I
Perna Norte	3%	12%		1%	II
Linha			11,5%	0%	II
Pendural	4%	12%	0%		II
Diagonal Sul	14%	2%			II
Diagonal Norte		17%		5%	II
Reforço Perna-Linha Sul	4,4%			13%	II
Reforço Perna-Linha Norte	7,1%	1%			I

Inclinação do Fio Asna 2

Elemento	Frente	Baixo	Cima	Trás	Classe
Perna Sul	3%	0%			II
Perna Norte	3%	12%		1%	II
Linha			11,5%	0%	II
Pendural	4%	12%	0%		I
Diagonal Sul	14%	2%			I
Diagonal Norte		17%		5%	I
Reforço Perna-Linha Sul	4,4%			13%	II
Reforço Perna-Linha Norte	7,1%	1%			I

Descaio Elementos

	Linha 3				Linha 2				Perna			
	k [mm]	h [mm]	sw	Classe	k [mm]	h [mm]	sw	Classe	k [mm]	h [mm]	sw	Classe
S0-S1												
S1-S2					59,8	220	0,278	III	47,7	220	0,217	III
S2-S3					61,1	210	0,291	III	49,4	255	0,194	II
S3-S4					61,2	220	0,278	III	49,4	255	0,194	II
S4-S5					61,2	220	0,278	III	88,6	235	0,377	NC
S5-S6					39,9	230	0,173	II	89,7	230	0,390	NC
S6-S7					40	230	0,174	II	89,7	230	0,390	NC
S7-S8					40	230	0,174	II	89,2	230	0,388	NC
S8-S9					50,5	225	0,224	III	88,7	250	0,355	NC
S9-S10					50,8	220	0,231	III	44,5	235	0,189	II
S10-S11					50,8	220	0,231	III	48,7	240	0,203	III
S11-S12									48,7	240	0,203	III
S12-S13					25,6	200	0,128	II	48,1	240	0,200	III
S13-S14					64,3	220	0,292	III	49,9	230	0,217	III
S14-S15					65	195	0,333	III	54,7	230	0,238	III
S15-S16					65	195	0,333	III	54,7	230	0,238	III

Inclinação Fio Elementos

Elemento	Frente	Baixo	Cima	Trás	Classe
Linha 3	15%		0%		II
Linha 2			14%	0%	II
Perna					I

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - PERNA NORTE

FACE FRONTAL

FACE INFERIOR

LIGAÇÕES



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - PERNA NORTE

FACE POSTERIOR

FACE SUPERIOR



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - PERNA SUL

FACE FRONTAL

FACE INFERIOR

LIGAÇÕES



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - PERNA SUL

FACE POSTERIOR

FACE SUPERIOR



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - LINHA

FACE FRONTAL



FACE INFERIOR



LIGAÇÕES



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - LINHA

FACE POSTERIOR

FACE SUPERIOR



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - PENDURAL

FACE FRONTAL



FACE INFERIOR



FACE POSTERIOR



FACE SUPERIOR



LIGAÇÕES



Legenda:

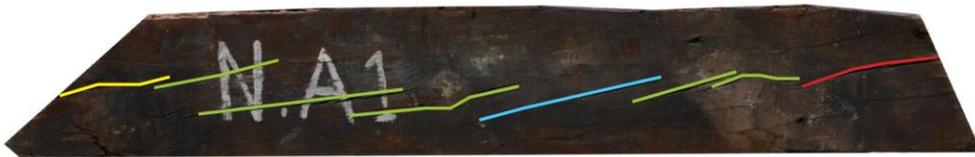
	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - DIAGONAL NORTE

FACE FRONTAL



FACE INFERIOR



FACE POSTERIOR



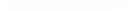
FACE SUPERIOR



LIGAÇÕES



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - DIAGONAL SUL

FACE FRONTAL



FACE INFERIOR



FACE POSTERIOR



FACE SUPERIOR



LIGAÇÕES



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - REFORÇO NORTE

FACE FRONTAL



FACE INFERIOR



FACE POSTERIOR



FACE SUPERIOR



LIGAÇÕES



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

MAPEAMENTO DE FENDAS

ASNA 1

ELEMENTO INSPECIONADO - REFORÇO SUL

FACE FRONTAL



FACE INFERIOR



FACE POSTERIOR



FACE SUPERIOR



LIGAÇÕES



Legenda:

	5 mm - 20 mm
	21 mm - 40 mm
	41 mm - 60 mm
	61 mm - 80 mm
	> 80 mm

**Anexo 2 – Ensaio de penetração por
impacto**

Pilodyn Perna

		Profundidade medida (mm)				Média profundidade medida (mm)				Profundidade de degradação (mm)				Desvio-padrão	Média	CoV (%)
		Cima	Frente	Baixo	Trás	Cima	Frente	Baixo	Trás	Cima	Frente	Baixo	Trás			
Segmento 1-2	1 (11 cm)	18	17	15,5	40	16	29	12	22	8	21	4	14	7,304869	11,58333	63,1
	2 (23 cm)	12	35	12	15											
	3 (35 cm)	19	34	7,5	10											
Segmento 2-3	1 (11 cm)	18	12	7,5	7,5	19	14	10	8	11	6	2	0	4,942962	4,791667	103,2
	2 (23 cm)	20,5	17	11	8											
	3 (35 cm)	18,5	14	11,5	8											
Segmento 4-5	1 (11 cm)	12	22	7	11	16	15	9	12	8	7	1	4	3,204092	4,875	65,7
	2 (23 cm)	18	11,5	10	10,5											
	3 (35 cm)	17,5	11	9	15											
Segmento 5-6	1 (11 cm)	17,5	14	10,5	8,5	18	14	9	10	10	6	1	2	4,097199	4,75	86,3
	2 (23 cm)	25	9,5	8	10,5											
	3 (35 cm)	11	19	7,5	12											
Segmento 6-7	1 (11 cm)	12	15	10	12	12	15	9	12	4	7	1	4	2,390181	4,083333	58,5
	2 (23 cm)	10	11,5	9	13,5											
	3 (35 cm)	14	19	9	10											
Segmento 7-8	1 (11 cm)	15	23,5	7,5	7,5	18	17	9	10	10	9	1	2	4,463847	5,5	81,2
	2 (23 cm)	15	12	10,5	8											
	3 (35 cm)	23,5	15	9,5	15											
Segmento 8-9	1 (11 cm)	22	8,5	5	12	25	11	12	13	17	3	4	5	6,79665	7,25	93,7
	2 (23 cm)	29	9	11	14,5											
	3 (35 cm)	25	14	21	12											
Segmento 12-13	1 (11 cm)	8	10	15	18,5	10	12	19	18	2	4	11	10	4,546061	6,833333	66,5
	2 (23 cm)	11	10,5	22,5	18,5											
	3 (35 cm)	10,5	16	20	17,5											
Segmento 15-16	1 (11 cm)	15,5	14	14,5	15,5	23	21	19	14	15	13	11	6	4,058313	11,20833	36,2
	2 (23 cm)	16,5	27	16,5	15,5											
	3 (35 cm)	38	20,5	27	10											
Média CoV por Segmento (%)															72,7	

Pilodyn Linha 2

	Profundidade medida (mm)				Média profundidade medida (mm)				Profundidade de degradação (mm)				Desvio-padrão	Média	CoV (%)
	Cima	Frente	Baixo	Trás	Cima	Frente	Baixo	Trás	Cima	Frente	Baixo	Trás			
Segmento 1-2	29	16,5	31	11,5	22	16	19	12	14	8	11	4	4,518224	9,291667	48,6
	18	17	12	12,5											
	20	15	14	11											
Segmento 4-5	7	20,5	16	8,5	11	18	17	10	3	10	9	2	4,182193	5,75	72,7
	16	22	17	7											
	9,5	10,5	18	13											
Segmento 8-9	11	20	12	8	11	24	14	11	3	16	6	3	6,068094	6,708333	90,5
	10,5	21	19	14											
	10,5	29,5	11	10											
Segmento 11-12	16,5	10	11	9,5	12	16	12	9	4	8	4	1	3,031853	4,291667	70,6
	10,5	24	10	10											
	9,5	15	14	7,5											
Segmento 12-13	10,5	18	8	8	14	16	13	11	6	8	5	3	1,921492	5,458333	35,2
	17,5	19,5	16	16											
	15	9,5	13,5	10											
Segmento 15-16	24,5	14	9,5	8	21	14	9	9	13	6	1	1	5,861638	5,041667	116,3
	18	12	9	9											
	21	14,5	8	9											
													Média CoV por Segmento (%)		72,3

Pilodyn Linha 3

		Profundidade medida (mm)				Média profundidade medida (mm)				Profundidade de degradação (mm)				Desvio-padrão	Média	CoV (%)
		Cima	Frente	Baixo	Trás	Cima	Frente	Baixo	Trás	Cima	Frente	Baixo	Trás			
Segmento 1-2	1 (11 cm)	15	7	14,5	31	11	10	15	18	3	2	7	10	3,647361	5,458333	66,8
	2 (23 cm)	8,5	11	15	12											
	3 (35 cm)	10	11,5	15,5	10,5											
Segmento 2-3	1 (11 cm)	17	9,5	11	18	12	9	12	16	4	1	4	8	2,926175	4,375	66,9
	2 (23 cm)	10,5	7	14	19											
	3 (35 cm)	9,5	11,5	9,5	12											
Segmento 4-5	1 (11 cm)	14,5	10,5	14	5	12	11	14	12	4	3	6	4	0,907785	4,25	21,4
	2 (23 cm)	13	11,5	12,5	13											
	3 (35 cm)	9	12	14	18											
Segmento 6-7	1 (11 cm)	11	15,5	10	17	10	13	15	18	2	5	7	10	3,617089	6,083333	59,5
	2 (23 cm)	7,5	9	24	28											
	3 (35 cm)	11	14	12	10											
Segmento 7-8	1 (11 cm)	13,5	13,5	15	15	13	13	16	17	5	5	8	9	1,870829	6,666667	28,1
	2 (23 cm)	12	15	18	23											
	3 (35 cm)	14,5	10	14,5	12											
Segmento 9-10	1 (11 cm)	25	13,5	12	15	20	11	14	13	12	3	6	5	3,752777	6,25	60,0
	2 (23 cm)	22	10	11	9,5											
	3 (35 cm)	12	10	18	13											
Segmento 12-13	1 (11 cm)	11,5	8,5	11,5	20,5	17	11	13	17	9	3	5	9	3,088209	6,333333	48,8
	2 (23 cm)	17	10	9	15											
	3 (35 cm)	21,5	13	19	15,5											
														Média CoV por Segmento (%)	50,2	

Pilodyn

Perna Norte

Secção	Profundidade medida [mm]				Profundidade de degradação [mm]				Desvio padrão	Média	COV	
	Cima	Esquerda	Baixo	Direita	Cima	Esquerda	Baixo	Direita				
0	14	10	15	20	6	2	7	12	4,11	6,75	60,9	
1	16	10	12	18	8	2	4	10	3,65	6	60,9	
2	18	10	9	18	10	2	1	10	4,92	5,75	85,6	
3	14	9	10	15	6	1	2	7	2,94	4	73,6	
4	15	10	12	15	7	2	4	7	2,45	5	49,0	
5	12	9	13	16	4	1	5	8	2,89	4,5	64,2	
6	14	10	11	16	6	2	3	8	2,75	4,75	58,0	
7	14	10	12	18	6	2	4	10	3,42	5,5	62,1	
8	12	11	17	17	4	3	9	9	3,20	6,25	51,2	
9	13	10	11	18	5	2	3	10	3,56	5	71,2	
10	12	10	10	19	4	2	2	11	4,27	4,75	89,9	
11	14	10	10	19	6	2	2	11	4,27	5,25	81,4	
12	15	10	10	25	7	2	2	17	7,07	7	101,0	
13	30	11	11	22	22	3	3	14	9,26	10,5	88,1	
14	27	11	11	23	19	3	3	15	8,25	10	82,5	
15	28	16	16	30	20	8	8	22	7,55	14,5	52,1	
16	22	23	23	35	14	15	15	27	6,18	17,75	34,8	
17	27	12	12	32	19	4	4	24	10,31	12,75	80,8	
18	15	25	25	33	7	17	17	25	7,37	16,5	44,7	
19	12	20	20	33	4	12	12	25	8,69	13,25	65,6	
					Desvio Padrão	6,02	4,75	4,52	6,75	Média CoV por secção (%)		67,9
					Média	9,2	4,35	5,5	14,1			
					COV	65,5	109,2	82,3	47,9	Média CoV por face (%)		76,2

Perna Sul

Secção	Profundidade medida [mm]				Profundidade de degradação [mm]				Desvio padrão	Média	COV	
	Cima	Esquerda	Baixo	Direita	Cima	Esquerda	Baixo	Direita				
0	9	9	8	9	1	1	0	1	0,500	0,75	66,67	
1	10	9	8	9	2	1	0	1	0,816	1	81,65	
2	11	10	9	10	3	2	1	2	0,816	2	40,82	
3	9	10	9	16	1	2	1	8	3,367	3	112,22	
4	8	11	10	20	0	3	2	12	5,315	4,25	125,06	
5	9	10	10	24	1	2	2	16	7,182	5,25	136,80	
6	9	10	10	24	1	2	2	16	7,182	5,25	136,80	
7	11	11	10	28	3	3	2	20	8,679	7	123,99	
8	10	11	9	25	2	3	1	17	7,544	5,75	131,21	
9	10	11	10	25	2	3	2	17	7,348	6	122,47	
10	11	11	11	19	3	3	3	11	4,000	5	80,00	
11	13	10	12	19	5	2	4	11	3,873	5,5	70,42	
12	14	10	13	18	6	2	5	10	3,304	5,75	57,46	
13	20	11	12	18	12	3	4	10	4,425	7,25	61,04	
14	13	11	12	17	5	3	4	9	2,630	5,25	50,09	
15	13	11	14	21	5	3	6	13	4,349	6,75	64,43	
16	18	10	13	20	10	2	5	12	4,573	7,25	63,08	
17	13	10	16	31	5	2	8	23	9,327	9,5	98,18	
18	13	10	16	17	5	2	8	9	3,162	6	52,70	
19	7	10	17	25	0	2	9	17	7,703	7	110,04	
					Desvio Padrão	3,15	0,66	2,68	5,97	Média CoV por secção (%)		89,3
					Média	3,6	2,3	3,45	11,75			
					COV	87,6	28,6	77,8	50,8	Média CoV por face (%)	61,2	

Linha

Secção	Profundidade medida [mm]				Profundidade de degradação [mm]				Desvio padrão	Média	COV	
	Cima	Esquerda	Baixo	Direita	Cima	Esquerda	Baixo	Direita				
0	10	13	10	11	2	5	2	3	1,414	3	47,14	
1	11	10	10	12	3	2	2	4	0,957	2,75	34,82	
2	12	10	12	10	4	2	4	2	1,155	3	38,49	
3	16	12	10	12	8	4	2	4	2,517	4,5	55,92	
4	16	14	12	10	8	6	4	2	2,582	5	51,64	
5	13	13	12	8	5	5	4	0	2,380	3,5	68,01	
6	12	11	12	9	4	3	4	1	1,414	3	47,14	
7	12	12	12	10	4	4	4	2	1,000	3,5	28,57	
8	12	13	12	9	4	5	4	1	1,732	3,5	49,49	
9	16	12	14	10	8	4	6	2	2,582	5	51,64	
10	21	13	12	12	13	5	4	4	4,359	6,5	67,06	
11	12	9	12	11	4	1	4	3	1,414	3	47,14	
12	9	10	11	9	1	2	3	1	0,957	1,75	54,71	
13	11	10	11	10	3	2	3	2	0,577	2,5	23,09	
14	11	10	10	9	3	2	2	1	0,816	2	40,82	
15	15	11	9	12	7	3	1	4	2,500	3,75	66,67	
16	14	8	8	20	6	0	0	12	5,745	4,5	127,66	
17	20	8	9	33	12	0	1	25	11,676	9,5	122,91	
18	12	8	7	35	4	0	0	27	12,971	7,75	167,37	
					Desvio Padrão	3,20	1,88	1,61	7,74	Média CoV por secção (%)		62,6
					Média	5,421053	2,894737	2,842105	5,263158			
					COV	59,1	65,0	56,6	147,0	Média CoV por face (%)		81,9

Pendural

Secção	Profundidade medida [mm]				Profundidade de degradação [mm]				Desvio padrão	Média	COV	
	Cima	Esquerda	Baixo	Direita	Cima	Esquerda	Baixo	Direita				
0	20	8	11	11	12	0	3	3	5,196	4,5	115,47	
1	19	10	11	11	11	2	3	3	4,193	4,75	88,28	
2	18	12	12	11	10	4	4	3	3,202	5,25	60,98	
3	15	14	17	13	7	6	9	5	1,708	6,75	25,30	
4	13	13	15	13	5	5	7	5	1,000	5,5	18,18	
5	0	9	0	11	0	1	0	3	1,414	1	141,42	
					Desvio Padrão	4,51	2,37	3,20	1,03	Média CoV por secção (%)		74,9
					Média	7,5	3	4,333333	3,666667			
					COV	60,1	78,9	73,9	28,2	Média CoV por face (%)		60,3

Diagonal Norte

Secção	Profundidade medida [mm]				Profundidade de degradação [mm]				Desvio padrão	Média	COV	
	Cima	Esquerda	Baixo	Direita	Cima	Esquerda	Baixo	Direita				
0	12	10	9	8	4	2	1	0	1,708	1,75	97,59	
1	12	9	8	11	4	1	0	3	1,826	2	91,29	
2	15	11	12	12	7	3	4	4	1,732	4,5	38,49	
3	15	10	10	8	7	2	2	0	2,986	2,75	108,58	
					Desvio Padrão	1,73	0,82	1,71	2,06	Média CoV por secção (%)		84,0
					Média	5,5	2	1,75	1,75			
					COV	31,5	40,8	97,6	117,8	Média CoV por face (%)		71,9

Diagonal Sul

Secção	Profundidade medida [mm]				Profundidade de degradação [mm]				Desvio padrão	Média	COV	
	Cima	Esquerda	Baixo	Direita	Cima	Esquerda	Baixo	Direita				
0	13	9	9	10	5	1	1	2	1,893	2,25	84,13	
1	8	8	7	8	0	0	0	0	0,000	0	0,00	
2	10	8	8	8	2	0	0	0	1,000	0,5	200,00	
3	6	8	8	9	0	0	0	1	0,500	0,25	200,00	
					Desvio Padrão	2,36	0,50	0,50	0,96	Média CoV por secção (%)		121,0
					Média	1,75	0,25	0,25	0,75			
					COV	135,0	200,0	200,0	127,7	Média CoV por face (%)		165,7

Média CoV por secção (%)	83,3
Média CoV por face (%)	86,2

Anexo 3 – Ensaio de Ultrassons

Ultrasonic test

Perna Norte - Face cima					
Secção	Tempo (μ s)		Tempo (μ s) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	-	-	-	-	-
1-2	-	-	-	-	-
2-3	-	-	-	-	-
3-4	95,7	96,4	96,05	0,41	4268,61
4-5	79,9	80,1	80	0,4	5000,00
5-6	81,4	81,4	81,4	0,41	5036,86
6-7	83,1	80,4	81,75	0,405	4954,13
7-8	93,1	90,6	91,85	0,4	4354,93
8-9	82,1	82,4	82,25	0,43	5227,96
9-10	80,4	80,1	80,25	0,41	5109,03
10-11	101,9	101,9	101,9	0,41	4023,55
11-12	91,9	91,9	91,9	0,44	4787,81
12-13	85,9	85,9	85,9	0,405	4714,78
13-14	86,9	87,9	87,4	0,415	4748,28
14-15	75,9	76,4	76,15	0,4	5252,79
15-16	-	-	-	-	-
16-17	-	-	-	-	-
17-18	75,9	77,9	76,9	0,4	5201,56
18-19	39,9	39,9	39,9	0,2	5012,53

Perna Norte - Face Frente					
Secção	Tempo (µs)		Tempo (µs) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	92,7	92,9	92,8	0,405	4364,22
1-2	87,5	87,1	87,3	0,415	4753,72
2-3	103,1	102,9	103,0	0,405	3932,04
3-4	74,9	74,4	74,65	0,4	5358,34
4-5	87,1	86,5	86,8	0,4	4608,29
5-6	85,7	86,2	85,95	0,4	4653,87
6-7	86,1	86,0	86,05	0,41	4764,67
7-8	96,7	96,7	96,7	0,42	4343,33
8-9	93,3	93,4	93,35	0,405	4338,51
9-10	101,5	101,4	101,45	0,41	4041,40
10-11	95,7	95,2	95,45	0,41	4295,44
11-12	83,2	83,6	83,4	0,4	4796,16
12-13	83,7	83,7	83,7	0,4	4778,97
13-14	75,1	75	75,05	0,41	5463,02
14-15	84,2	84,3	84,25	0,42	4985,16
15-16	82,7	82,7	82,7	0,41	4957,68
16-17	69,9	70,3	70,1	0,39	5563,48
17-18	75,2	74,7	74,95	0,405	5403,60
18-19	79	78,9	78,95	0,415	5256,49

Perna Norte - Face trás					
Secção	Tempo (µs)		Tempo (µs) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	-	-	-	-	-
1-2	-	-	-	-	-
2-3	102,0	102,6	102,3	0,36	3519,06
3-4	135,9	136,6	136,25	0,405	2972,48
4-5	453	458	455,5	0,42	922,06
5-6	82,5	82,7	82,6	0,28	3389,83
6-7	98,2	98,4	98,3	0,4	4069,18
7-8	141,7	141,4	141,55	0,415	2931,83
8-9	84,6	84,1	84,35	0,28	3319,50
9-10	124	123,8	123,9	0,372	3002,42
10-11	96,6	95,9	96,25	0,315	3272,73
11-12	137,4	137,6	137,5	0,415	3018,18
12-13	110,4	110,1	110,25	0,36	3265,31
13-14	-	-	-	-	-
14-15	90,1	89	89,55	0,2	2233,39
15-16	65,5	65,3	65,4	0,27	4128,44
16-17	78,2	78,7	78,45	0,275	3505,42
17-18	113,4	113,2	113,3	0,315	2780,23
18-19	-	-	-	-	-

Perna Norte - Face Baixo					
Secção	Tempo (µs)		Tempo (µs) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	113,4	113,3	113,35	0,375	3308,34
1-2	146,5	148,2	147,35	0,41	2782,49
2-3	107,3	106,9	107,1	0,415	3874,88
3-4	88,8	89,5	89,15	0,375	4206,39
4-5	133,5	133,5	133,5	0,405	3033,71
5-6	91,5	91,8	91,65	0,41	4473,54
6-7	90,3	89,8	90,05	0,41	4553,03
7-8	93,1	93,1	93,1	0,415	4457,57
8-9	110,9	111,4	111,15	0,4	3598,74
9-10	101,7	100,5	101,1	0,41	4055,39
10-11	79,5	79,5	79,5	0,405	5094,34
11-12	71	70,6	70,8	0,4	5649,72
12-13	120,6	119	119,8	0,41	3422,37
13-14	89,8	89,4	89,6	0,41	4575,89
14-15	82,7	84,8	83,75	0,41	4895,52
15-16	92,7	92,1	92,4	0,41	4437,23
16-17	86,7	86,2	86,45	0,405	4684,79
17-18	83,6	84	83,8	0,4	4773,27
18-19	-	-	-	-	-

Perna Sul - Face Frente					
Secção	Tempo (µs)		Tempo (µs) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	85,4	85,5	85,45	0,4	4681,10
1-2	92	92,2	92,1	0,4	4343,11
2-3	78,2	77,8	78	0,385	4935,90
3-4	98,3	98,3	98,3	0,425	4323,50
4-5	100,8	101,1	100,95	0,43	4259,53
5-6	97,8	98,2	98	0,41	4183,67
6-7	106,5	106	106,25	0,42	3952,94
7-8	197	197	197	0,41	2081,22
8-9	98,2	98,5	98,35	0,41	4168,78
9-10	101	101,5	101,25	0,405	4000,00
10-11	92,8	93,4	93,1	0,415	4457,57
11-12	104,6	104,1	104,35	0,395	3785,34
12-13	87,5	87,3	87,4	0,41	4691,08
13-14	96,1	95,8	95,95	0,405	4220,95
14-15	105,8	106,2	106	0,42	3962,26
15-16	109,9	110,4	110,15	0,405	3676,80
16-17	101,4	101,3	101,35	0,41	4045,39
17-18	85,7	85,4	85,55	0,405	4734,07
18-19	-	-	-	-	-

Perna Sul - Face Trás					
Secção	Tempo (μ s)		Tempo (μ s) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	104,8	104,8	104,8	0,405	3864,50
1-2	89,8	89	89,4	0,4	4474,27
2-3	-	-	-	-	-
3-4	-	-	-	-	-
4-5	-	-	-	-	-
5-6	-	-	-	-	-
6-7	-	-	-	-	-
7-8	-	-	-	-	-
8-9	-	-	-	-	-
9-10	-	-	-	-	-
10-11	-	-	-	-	-
11-12	-	-	-	-	-
12-13	-	-	-	-	-
13-14	-	-	-	-	-
14-15	-	-	-	-	-
15-16	-	-	-	-	-
16-17	-	-	-	-	-
17-18	-	-	-	-	-
18-19	-	-	-	-	-

Perna Sul - Face Baixo					
Secção	Tempo (μ s)		Tempo (μ s) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	94,9	94,4	94,65	0,4	4226,10
1-2	94,6	94,4	94,5	0,4	4232,80
2-3	71,9	70,9	71,4	0,33	4621,85
3-4	89,9	89,4	89,65	0,408	4551,03
4-5	99,4	99,4	99,4	0,405	4074,45
5-6	90,9	89,9	90,4	0,4	4424,78
6-7	95,9	95,4	95,65	0,4	4181,91
7-8	93,7	93,9	93,8	0,4	4264,39
8-9	95,4	95,9	95,65	0,4	4181,91
9-10	99,6	99,9	99,75	0,403	4040,10
10-11	95,4	96,1	95,75	0,4	4177,55
11-12	100	99,9	99,95	0,405	4052,03
12-13	95,4	95,9	95,65	0,4	4181,91
13-14	83,9	83,4	83,65	0,4	4781,83
14-15	84,7	84,4	84,55	0,405	4790,07
15-16	100,9	100,9	100,9	0,41	4063,43
16-17	79,9	80,4	80,15	0,41	5115,41
17-18	83,9	83,4	83,65	0,415	4961,15
18-19	84,9	84,4	84,65	0,405	4784,41

Linha - Face Cima					
Secção	Tempo (µs)		Tempo (µs) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	69,5	69,5	69,5	0,375	5395,68
1-2	92,7	92,6	92,65	0,405	4371,29
2-3	201	203	202	0,4	1980,20
3-4	92,7	92,8	92,75	0,4	4312,67
4-5	209	206	207,5	0,425	2048,19
5-6	115,1	114,8	114,95	0,415	3610,27
6-7	136,5	135,7	136,1	0,41	3012,49
7-8	110,5	110	110,25	0,42	3809,52
8-9	326	326	326	0,385	1180,98
9-10	204	204	204	0,38	1862,75
10-11	138,3	137,9	138,1	0,435	3149,89
11-12	102,2	102,9	102,55	0,41	3998,05
12-13	142,6	142,7	142,65	0,4	2804,07
13-14	114,1	113,7	113,9	0,42	3687,45
14-15	134,7	133,8	134,25	0,4	2979,52
15-16	-	-	-	-	-
16-17	96,7	96,4	96,55	0,34	3521,49
17-18	-	-	-	-	-
18-19	-	-	-	-	-

Linha - Face Frente					
Secção	Tempo (μ s)		Tempo (μ s) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	102,3	102,6	102,45	0,45	4392,39
1-2	141,6	141,7	141,65	0,425	3000,35
2-3	179,1	179,4	179,25	0,39	2175,73
3-4	115,7	117,5	116,6	0,415	3559,18
4-5	105,2	105,6	105,4	0,415	3937,38
5-6	138	137,4	137,7	0,405	2941,18
6-7	86,2	86,5	86,35	0,405	4690,21
7-8	94,4	94,4	94,4	0,42	4449,15
8-9	180,2	179,7	179,95	0,4	2222,84
9-10	110	110,5	110,25	0,4	3628,12
10-11	93,3	93,5	93,4	0,395	4229,12
11-12	79,9	80	79,95	0,42	5253,28
12-13	74,2	74,3	74,25	0,4	5387,21
13-14	106,2	106,9	106,55	0,4	3754,11
14-15	84,2	84,1	84,15	0,41	4872,25
15-16	147	147	147	0,415	2823,13
16-17	104,7	103,7	104,2	0,365	3502,88
17-18	88,3	88,6	88,45	0,315	3561,33
18-19	-	-	-	-	-

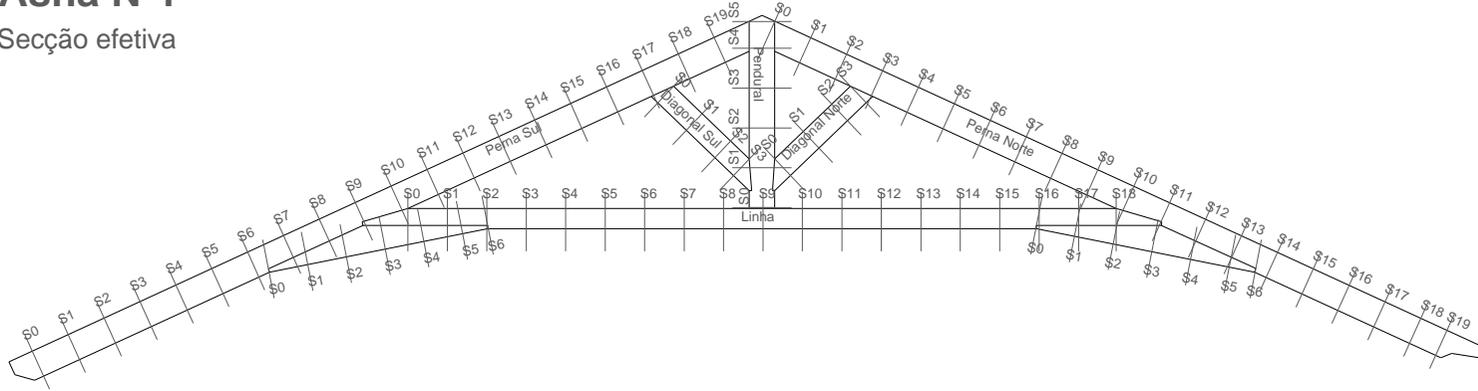
Linha - Face Trás					
Secção	Tempo (μ s)		Tempo (μ s) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	-	-	-	-	-
1-2	81,4	80,9	81,15	0,375	4621,07
2-3	94,4	93,9	94,15	0,38	4036,11
3-4	93,4	93,4	93,4	0,415	4443,25
4-5	121,1	121,4	121,25	0,365	3010,31
5-6	98,9	100,1	99,5	0,395	3969,85
6-7	-	-	-	-	-
7-8	100,9	99,9	100,4	0,4	3984,06
8-9	79,9	79,2	79,55	0,34	4274,04
9-10	99,9	98,6	99,25	0,405	4080,60
10-11	-	-	-	-	-
11-12	72,2	71,4	71,8	0,35	4874,65
12-13	86,9	86,4	86,65	0,36	4154,65
13-14	-	-	-	-	-
14-15	60,1	62,4	61,25	0,23	3755,10
15-16	-	-	-	-	-
16-17	-	-	-	-	-
17-18	-	-	-	-	-
18-19	-	-	-	-	-

Linha - Face Baixo					
Secção	Tempo (μ s)		Tempo (μ s) média	Distância (m)	Velocidade (m/s)
0-1	76,4	76,4	76,4	0,41	5366,49
1-2	186,5	186,7	186,6	0,4	2143,62
2-3	69,9	69,6	69,75	0,405	5806,45
3-4	68,8	68,5	68,65	0,4	5826,66
4-5	74,5	74,1	74,3	0,405	5450,87
5-6	80,5	80,6	80,55	0,4	4965,86
6-7	90,6	91,1	90,85	0,4	4402,86
7-8	135,1	134,2	134,65	0,41	3044,93
8-9	129,2	129,2	129,2	0,41	3173,37
9-10	110,1	110,5	110,3	0,4	3626,47
10-11	83,8	83,4	83,6	0,41	4904,31
11-12	70,8	70,0	70,4	0,41	5823,86
12-13	87,6	87,3	87,45	0,41	4688,39
13-14	88,6	88,3	88,45	0,42	4748,45
14-15	99,1	99,9	99,5	0,405	4070,35
15-16	113	112,7	112,85	0,41	3633,14
16-17	101,3	101,8	101,55	0,4	3938,95
17-18	106,7	107,3	107	0,4	3738,32
18-19	-	-	-	-	-

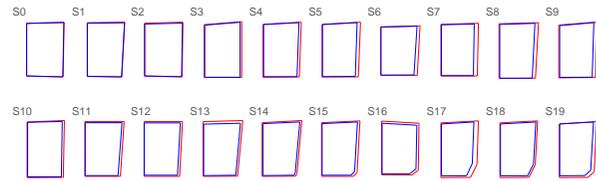
Anexo 4 – Geometria das asnas

Asna Nº1

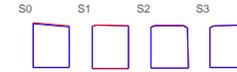
Secção efetiva



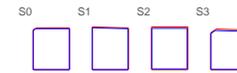
Elemento - Perna Sul



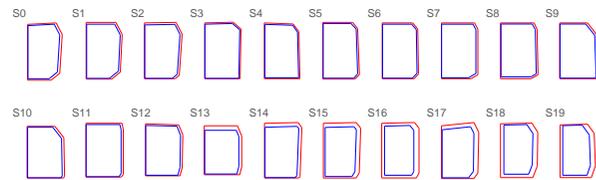
Elemento - Diagonal Sul



Elemento - Diagonal Norte



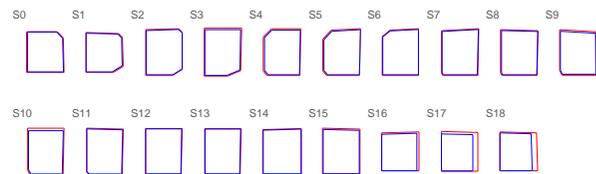
Elemento - Perna Norte



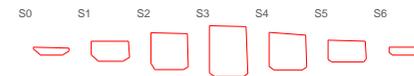
Elemento - Pendural



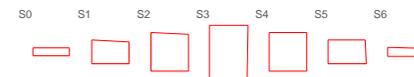
Elemento - Linha



Elemento - Reforço Perna-Linha Sul



Elemento - Reforço Perna-Linha Norte

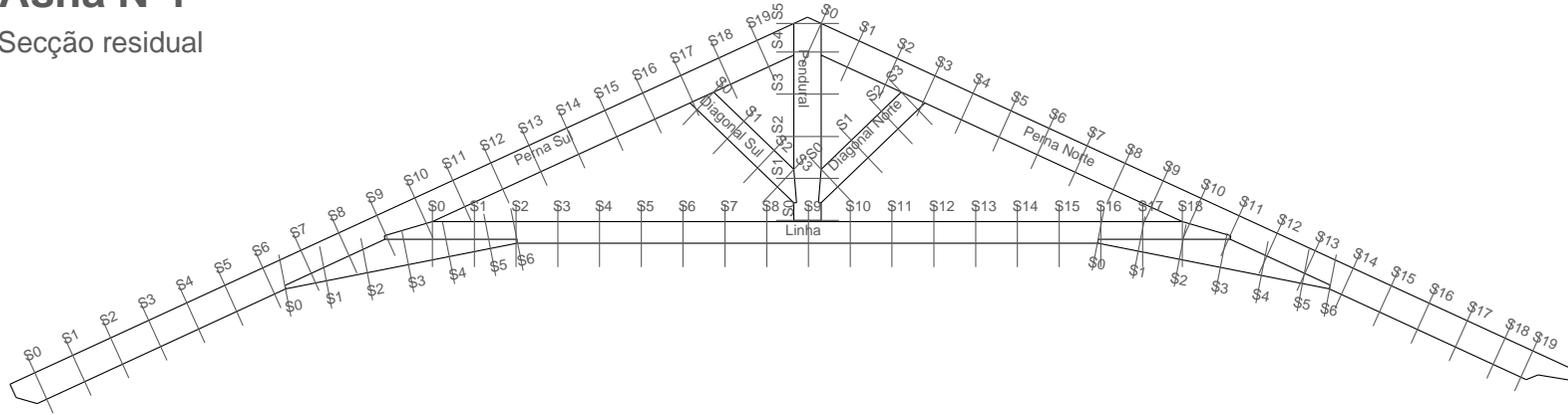


Legenda:

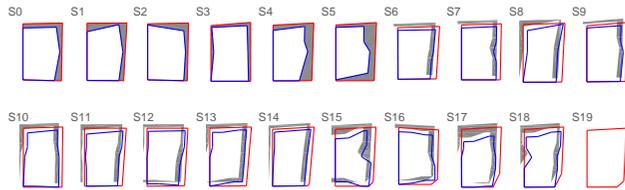
- Secção
- Secção Efetiva

Asna N°1

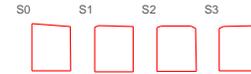
Secção residual



Elemento - Perna Sul



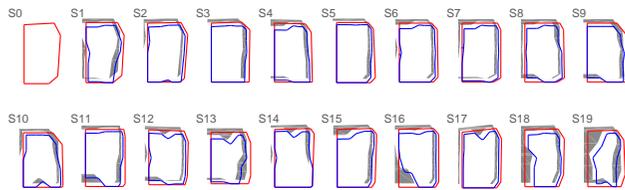
Elemento - Diagonal Sul



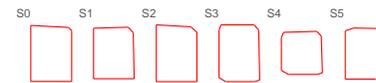
Elemento - Diagonal Norte



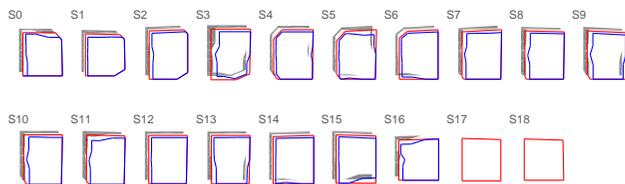
Elemento - Perna Norte



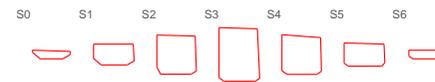
Elemento - Pendural



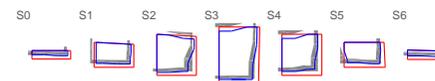
Elemento - Linha



Elemento - Reforço Perna-Linha Sul



Elemento - Reforço Perna-Linha Norte

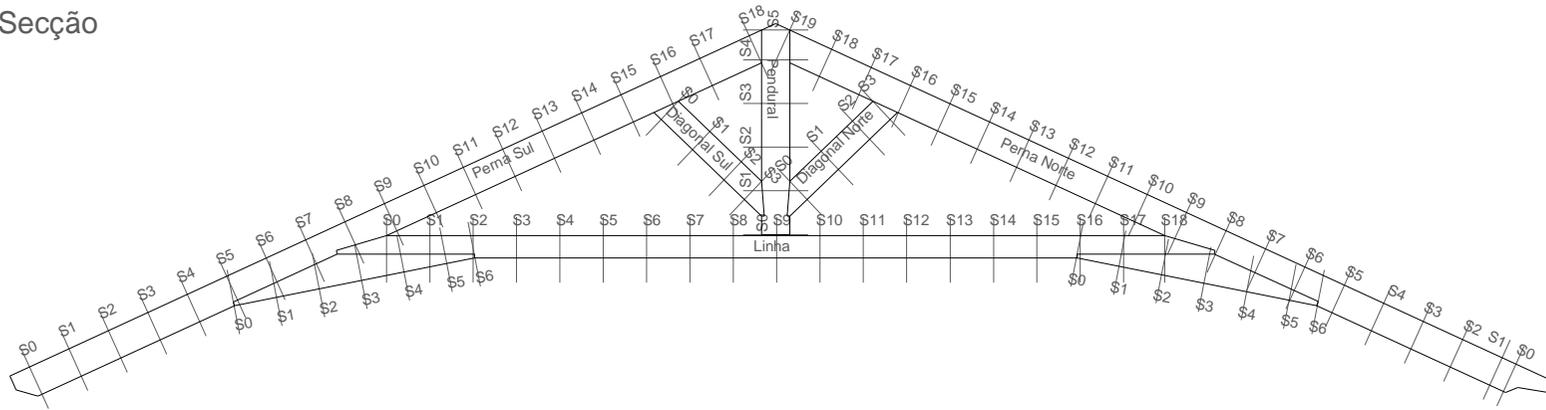


Legenda:

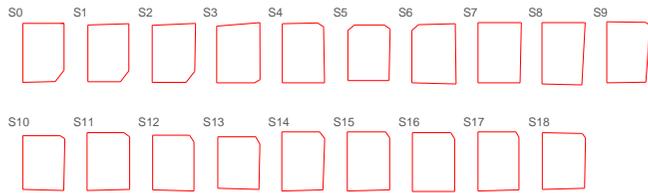
- Secção
- Secção Efetiva

Asna Nº2

Secção



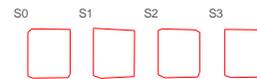
Elemento - Perna Sul



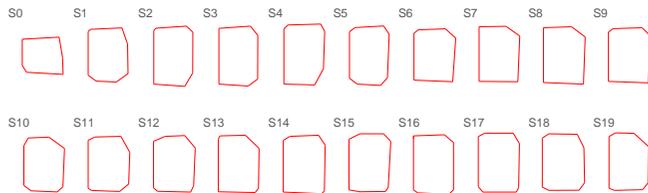
Elemento - Diagonal Sul



Elemento - Diagonal Norte



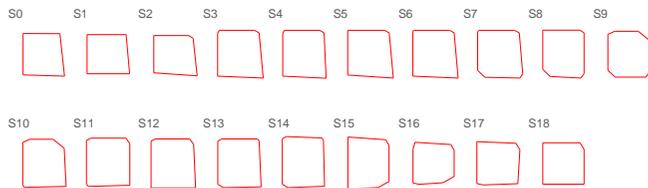
Elemento - Perna Norte



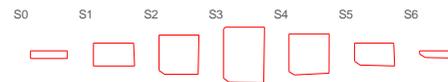
Elemento - Pendural



Elemento - Linha



Elemento - Reforço Perna-Linha Sul



Elemento - Reforço Perna-Linha Norte



Legenda:
□ Secção