



**IVO MANUEL  
ALMEIDA SANTOS**

**REFORÇO DE ASNAS TRADICIONAIS DE MADEIRA**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil  
2012

**IVO MANUEL  
ALMEIDA SANTOS**

## **REFORÇO DE ASNAS TRADICIONAIS DE MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Dr. Humberto Salazar Amorim Varum, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Professor Dr. Jorge Manuel Gonçalves Branco, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho

Depois de muitos anos de sacrifício, qualquer agradecimento será insuficiente para todos aqueles que me ajudaram e acreditaram no meu trabalho.

Agradeço ao Professor Doutor Humberto Varum, toda a disponibilidade, conhecimentos e amizade, por ter compartilhado toda a sua experiência que foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Não menos importante, quero agradecer também ao Professor Doutor Jorge Branco, pela orientação e conhecimentos, material fornecido, disponibilidade e amizade pois sem a sua ajuda seria impossível terminar e efetuar este trabalho.

Ao Engenheiro António José Pereira De Figueiredo, quero agradecer toda a disponibilidade e apoio fornecido, pois sem a sua experiência e dedicação tanto a nível de laboratório como informático seria difícil a sua conclusão.

Ao Professor Edgar V. Mantilla Carrasco, o meu agradecimento pelo trabalho realizado.

Ao colega e amigo Bruno Lobo quero agradecer todo o apoio prestado nos ensaios.

À ROTHO BLAAS – Empresa do Alto Adige, por todo o material gentilmente cedido, pois sem o qual seria impossível efetuar os ensaios.

À AOF – Augusto de Oliveira Ferreira & Ca Lda, pela ajuda prestada e pelos recursos disponibilizados.

Quero agradecer também à minha Família (Victor Santos, Dulce Santos, Marco Paulo, Carlos Filipe, Bruno Santos e respetivas esposas e sobrinhos) todo o apoio que me deram durante todos estes anos, obrigado por acreditarem.

Quero deixar um agradecimento especial à Marta José e ao João Pedro, por tudo o que me deram e os sacrifícios que fizeram, para finalizar mais esta etapa da minha vida.

A todos eles o meu sincero obrigado!

## **o júri**

presidente

**Carlos Daniel Borges Coelho**  
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

**João Paulo Sousa Costa de Miranda Guedes**  
Professor Auxiliar, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Humberto Salazar Amorim Varum**  
Professor Associado, Universidade de Aveiro

**Jorge Manuel Gonçalves Branco**  
Professor Auxiliar, Universidade do Minho



**palavras-chave**

Estruturas tradicionais de cobertura, asnas de madeira, reforço, avaliação do comportamento, ensaios destrutivos

**resumo**

Procurou-se com este trabalho experimental avaliar o desempenho de duas soluções de reforço aplicadas em asnas tradicionais de madeira. Neste estudo, foram realizados dois ensaios cíclicos destrutivos sobre asnas com 12,6 metros de vão reforçadas recuperadas de um edifício fabril. As soluções de reforço aplicadas foram definidas e pormenorizadas com base nos resultados de um ensaio preliminar realizado por outro autor sobre uma asna idêntica, mas sem reforço. Com o presente trabalho, pretendeu-se produzir um conjunto de resultados experimentais que permitam caracterizar o desempenho das soluções de reforço estudadas e, assim, contribuam para a escolha mais racional e para o dimensionamento mais rigoroso destas soluções de reforço em intervenções em estruturas de cobertura de edifícios antigos.

**keywords**

Structures traditional coverage, wood trusses, reinforcement, behavior assessment, destructive tests.

**abstract**

We tried to work with this experimental evaluate the performance of two reinforcement solutions applied in traditional wooden trusses. In this study, two assays were conducted on destructive cyclical trusses with 12.6 meter span reinforced recovered in a factory building. The solutions were applied reinforcing defined and detailed based on the results of a preliminary test performed by another author on a truss identical but unreinforced. The present work, we sought to produce a set of experimental results which allow characterizing the performance of the solutions studied reinforcement and thus contribute to more rational choice for sizing and stricter these solutions reinforcement interventions roof structures old buildings.

# Índice de texto

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 - Enquadramento.....	1
1.2 - Objetivos.....	3
<b>CAPÍTULO 2 - ASNAS DE MADEIRA .....</b>	<b>4</b>
2.1 - Ligações em estruturas de madeira .....	5
2.1.1 - Evolução das ligações.....	5
2.2 - Técnicas de reforço.....	11
2.2.1 - Ligação tipo cavilha.....	13
2.2.2 - Ligações tipo superfície (CONNECTORES) .....	13
2.3 - Qualidade das ligações.....	18
<b>CAPÍTULO 3 - REFORÇO DE ASNAS TRADICIONAIS .....</b>	<b>20</b>
3.1 - Avaliação das asnas .....	22
3.1.1 - Inspeção visual .....	22
3.2 - Reforço das ligações com parafusos auto-perfurantes .....	26
3.2.1 - Medidas aplicadas para o reforço efetuado das ligações .....	27
3.2.2 - Ensaio de carga .....	30
3.2.3 - Instrumentação .....	33
3.2.4 - Principais resultados.....	35
3.2.5 - Rotura da asna. ....	40
3.3 - Reforço das ligações com esquadros metálicos .....	41
3.3.1 - Instrumentação .....	44
3.3.2 - Resultados globais:.....	47
3.4 - Eficácia do reforço das ligações.....	52
3.4.1 - Relação força-deslocamento com e sem reforço.....	53
3.5 - Recomendações de reforço de asnas tradicionais.....	54
<b>CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES GERAIS E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS .....</b>	<b>55</b>
4.1 - Concretização dos objetivos .....	55
4.2 - Futuros desenvolvimentos.....	56
ANEXO – A .....	58





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Tradicional cobertura de madeira Portuguesa com asna simples ou de Palládio (Costa, 1955). .....	4
Ligações clássicas (Figura 2 e Figura 3). .....	6
Figura 3 - Ligações por fibras vegetais (Mendes, 1994a). .....	6
Figura 4 - Ligações por entalhes, troncos (Mendes, 1994a). .....	6
Figura 5 - Ligação tradicionais por entalhes (Costa, 1955). .....	7
Figura 6 - Ligações tradicionais. ....	8
Figura 7 - Anéis metálicos abertos A2 (Mendes, 1994a). .....	8
Figura 8 - Ligação colada (Mendes, 1994a). .....	8
Figura 9 - Mecanismo de resistência de ligação de uma asna tradicional (Branco, Santos, & Cruz, 2008). .....	9
Figura 10 - Três tipos de soluções de reforço. ....	10
Figura 11 - Método tradicional. ....	11
Figura 12 - Método mecânico. ....	11
Figura 13 - Método adesivo. ....	12
Figura 14 - Ligações tipo cavilha (Mendes, 1994b). .....	13
Figura 15 - Ligadores de superfície (Cruz & Palma, 2006). .....	14
Figura 16 - Esquema tradicional das ferragens de asnas de madeira (Costa, 1955). .....	14
Figura 17 - Asna ensaiada. ....	20
Figura 18 - Asna original (ligação linha-perna). .....	21
Figura 19 - Rotura devido ao esforço de corte. ....	21
Figura 20 - Orifícios de saída provocados por insetos xilófagos no pendural 3. ....	23
Figura 21 - Pilodyn. ....	24
Figura 22 - Profundidades atingidas no ensaio pilodyn na asna 2. ....	25
Figura 23 - Profundidades atingidas no ensaio pilodyn na asna 3. ....	25
Figura 24 - Parafusos auto-perfurantes. ....	26
Figura 25 - As asnas a reforçar. ....	26
Figura 26 - Esquema da asna. ....	27
Figura 27 - Anomalias encontradas. ....	27
Figura 28 - Reforço ligação perna-linha. ....	28
Figura 29 - Ligação perna-linha aparafusada (ligação 1 e 12). ....	28
Figura 30 - Reabilitação da escora (ligação 4 e 9). ....	29
Figura 31 - Reabilitação efetuada escora e pendural (Ligação 5 e 8). ....	29
Figura 32 - Reabilitação da escora (ligação 7). ....	29
Figura 33 - Chapas aparafusadas com parafusos HBS 10x60. ....	29
Figura 34 - Asna a ensaiar com o esquema dos atuadores. ....	30
Figura 35 - Excentricidade aplicada. ....	31
Figura 36 - Instrumentação efetuada na asna 2. ....	33
Figura 37 - Potenciómetro de fio aplicado na perna. ....	33
Figura 38 - Potenciómetros eletrónicos aplicados na ligação linha-perna. ....	33
Figura 39 - Potenciómetros aplicados entre o pendural-linha. ....	34
Figura 40 - Potenciómetros perna-pendural principal. ....	34
Figura 41 - Potenciómetro aplicado no montante e a linha. ....	34
Figura 42 - Potenciómetro de fio aplicado à linha. ....	34
Figura 43 - Células de carga. ....	34
Figura 44 - Esquema dos pontos de medição na asna. ....	37
Figura 45 - Rotura da ligação Linha-Perna. ....	40
Figura 46 - Rotura da asna. ....	40
Figura 47 - Esquadros metálicos. ....	41
Figura 48 - Ligação superior pendural-perna. ....	41
Figura 49 - Ligação inferior pendural-escora. ....	41



Figura 50 - Intervenção efetuada na asna. ....	42
Figura 51 - Intervenção com entalhe de madeira. ....	42
Figura 52 - Esquema de intervenção da perna direita. ....	43
Figura 53 - Instrumentação aplicada na asna 3. ....	44
Figura 54 - Potenciómetro de fio aplicado à perna. ....	44
Figura 55 - Ligação perna-linha. ....	44
Figura 56 - Potenciómetro de fio. ....	45
Figura 57 - Potenciómetro aplicado entre pendural-linha. ....	45
Figura 58 - Potenciómetros aplicados pendural -perna e pendural-linha. ....	45
Figura 59 - Potenciómetros aplicados na linha. ....	46
Figura 60 - Esquema de pontos das medições efetuadas na asna 3. ....	49
Figura 61 - Plastificação da chapa metálica na ligação Linha-Perna. ....	51
Figura 62 - Plastificação da chapa metálica. ....	51
Figura 63 - Rotura das asnas de madeira. ....	53
Figura 64 - Ligação de peças com secção circular. ....	54



**ÍNDICE DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Procedimento de carga. ....	32
Gráfico 2 - Deformação global da linha.....	35
Gráfico 3 - Deformação da perna esquerda.....	36
Gráfico 4 - Deformação da perna direita.....	36
Gráfico 5 - Relação força-deslocamento (LF04).....	38
Gráfico 6 - Relação Força-Deslocamento (LF07/LF14).....	39
Gráfico 7 - Relação Força-Deslocamento (LF01/LF12).....	39
Gráfico 8 - Procedimento de carga. ....	46
Gráfico 9 - Deformação global da linha.....	47
Gráfico 10 - Comportamento global da perna esquerda.....	48
Gráfico 11 - Deformação da perna direita.....	48
Gráfico 12 - Relação força-deslocamento potenciómetro LF04. ....	49
Gráfico 13 - Relação Força-Deslocamento (B03/B04).....	50
Gráfico 14.-Relação Força-Deslocamento (F01/B02).....	50



**ARQUIVO FOTOGRÁFICO**

Arquivo fotográfico 1 - Armazenamento das asnas a ensaiar. ....	58
Arquivo fotográfico 2 - Atuadores aplicados na laje de ensaio. ....	58
Arquivo fotográfico 3 – Ligações aos atuadores. ....	59
Arquivo fotográfico 4 - Bomba hidráulica. ....	59
Arquivo fotográfico 5 - Momento em carga. ....	60
Arquivo fotográfico 6 - Rotura total, ligação linha-perna. ....	60
Arquivo fotográfico 7 – Intervenção na perna. ....	61
Arquivo fotográfico 8 - Esmagamento perna-linha. ....	61
Arquivo fotográfico 9 - Momento de paragem do ensaio, encurvadura da chapa metálica. ....	62





# CAPÍTULO 1 - Introdução

## 1.1 - Enquadramento

Portugal, como é do conhecimento geral, é um País com uma vasta floresta; mais de um terço do território é coberto por floresta, sendo a espécie de maior representação o Pinho bravo.

O Pinho bravo concentra-se nas regiões Norte e Centro, em especial no litoral, sendo influenciado a qualidade deste material, pelo meio ambiente onde a árvore cresce.

Deste modo, o pinho originário das Beiras altas e Litoral é mais denso e mais resistentes que o pinho das restantes regiões de Portugal (Farinha & dos Reis, 1998).

A madeira como material de construção é um material flexível, de baixa densidade, e que tem ganho importância pela sua agradável estética em termos arquitetónicos, associado à sua fácil laboração.

Em alguns setores, a tecnologia da madeira parece ainda resumir-se aos conhecimentos antigos, o dimensionamento objetivo é substituído por imitação do que existia ou deixado ao critério do carpinteiro, as ligações estruturais estão limitadas ao uso do prego quadrado e ignorando a grande diversidade de produtos de madeira e respetivas utilizações.

Para isto tem contribuído grandemente a falta de divulgação dos conhecimentos relativos ao comportamento estrutural da madeira e às propriedades da mesma, às soluções disponíveis em termos de derivados de madeira, o desconhecimento de ligadores e regras de cálculo, a nível académico, industrial e comercial

Com a entrada em vigor do Eurocódigo 5 (ENV, 1995), referente ao cálculo de estruturas de madeira, essa situação tem vindo a ser alterada progressivamente, e é neste momento uma área de grande crescimento e aplicação.

Em Portugal, a construção tradicional contempla coberturas e pavimentos de madeira e, em certos casos, paredes de alvenaria reforçadas com madeira (Cruz & Palma, 2006). Um grande número destas construções requerem hoje ações de manutenção, reparação e/ou reforço. Entre estas, as coberturas assumem especial importância.

O comportamento global duma estrutura de cobertura em madeira, normalmente composta por asnas, tem uma distribuição dos esforços internos pelos vários elementos estruturais que depende diretamente da rigidez das ligações sob ações assimétricas e acidentais. Nestas condições, as ligações são, frequentemente, submetidas a tensões que ultrapassam o limite elástico, com a conseqüente introdução de fenómenos não-lineares.

O desconhecimento do comportamento das ligações conduz frequentemente à substituição de asnas antigas de madeira, impedindo que se promova o seu reforço, de forma a restituir os necessários níveis de segurança.

O dimensionamento das ligações nas estruturas de madeira, tal como nas de aço, assume uma grande importância, pois estas têm uma reconhecida influência na durabilidade e no comportamento estrutural, dominando uma parcela significativa do custo da estrutura. Como tal, são fundamentais no desempenho estrutural de toda a estrutura, sendo crucial garantir ligações compatíveis com as solicitações mecânicas impostas, oferecendo resistência, rigidez e durabilidade.

## 1.2 - Objetivos

A maioria dos edifícios antigos contempla a estrutura da cobertura recorrendo a asnas de madeira. Um número significativo destes edifícios continua em uso, mesmo tendo sofrido significativas alterações, e carece de reabilitação.

Com vista a preservar o valor histórico e cultural do nosso património construído, nesta dissertação são estudadas técnicas de reforço habitualmente utilizadas em asnas de madeira. Só com o aumento do conhecimento sobre técnicas fiáveis de reforço das estruturas existentes se poderá impedir a destruição deste património pela sua substituição por estruturas novas.

O principal objetivo desta dissertação consiste na análise do reforço de duas asnas de madeira com ligações tradicionais, utilizando elementos metálicos de fácil aplicação, como são os parafusos auto-perfurantes e os esquadros metálicos. Para o efeito, realizaram-se ensaios de carga, com ciclos quasi-estáticos, em asnas de madeira à escala real recolhidas de uma demolição.

Os resultados experimentais das duas asnas são posteriormente comparados com os resultados obtidos por Santos (2009) no ensaio de uma asna sem reforço, de forma a concluir sobre a eficiência do reforço analisado.

## CAPÍTULO 2 - Asnas de Madeira

A típica cobertura de madeira Portuguesa apresenta asnas como principal elemento estrutural. Na verdade, uma das grandes aplicações das asnas corresponde à sua utilização nas estruturas de suporte de telhados das edificações, que além de garantir uma boa estabilidade e integridade, deve apresentar uma cobertura que permita um rápido e eficiente escoamento das águas pluviais, além da finalidade de cobrir e proteger.

Estas estruturas em Portugal, têm uma pendente variável entre os 20° e os 30°, sendo materializada por telhas cerâmicas apoiadas sobre as varas espaçadas de 40-50 cm, que repousam por sua vez sobre a cumeeira, as madres e o frechal. Normalmente, as coberturas de madeira são constituídas por asnas simples (ou de Palládio) de vãos médios entre 6 e 7 metros. Esta geometria de asnas de madeira caracteriza-se por apresentar um elemento horizontal, a linha, duas pernas inclinadas de modo a formar as pendentes do telhado e ligadas na sua base à linha, um elemento vertical ao centro na ligação entre as duas pernas, o pendural, e duas escoras inclinadas, suportando as pernas no pendural (Figura 1) (Costa, 1955).

As ligações das asnas são normalmente materializadas por entalhes de dente simples ou duplo e prevendo ou não respiga e mecha. Nestas ligações, ditas tradicionais, os esforços são transmitidos por compressão e/ou atrito. De forma a melhorar o contacto entre os elementos ligados são normalmente adicionados elementos metálicos. O uso destes elementos metálicos, para além de prevenir as deformações no plano ortogonal à estrutura, tem o objetivo de garantir a estabilidade da ligação frente a forças cíclicas (inversão de esforços). Braçadeiras, esquadros e varões metálicos representam as soluções de reforço mais vulgares em ligações tradicionais de madeira.

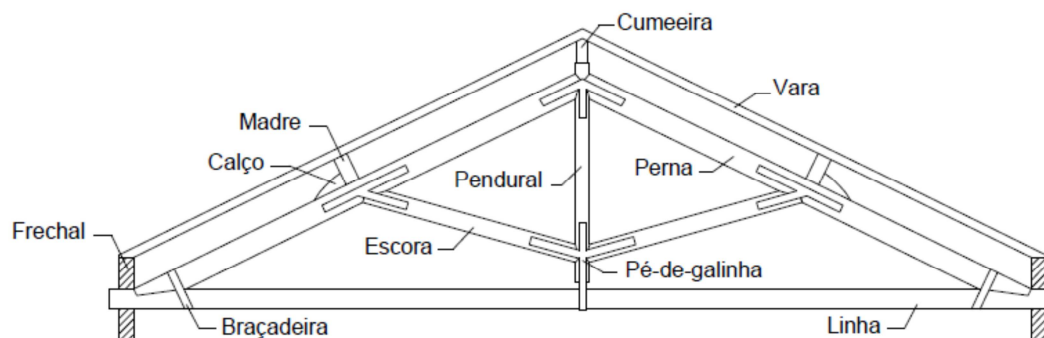


Figura 1 - Tradicional cobertura de madeira Portuguesa com asna simples ou de Palládio (Costa, 1955).

## 2.1 - Ligações em estruturas de madeira

As ligações de uma estrutura de madeira são as zonas mais fracas já que estão sujeitas a esforços e tensões localizadas.

Estas zonas críticas devem ter uma atenção cuidada, de modo a não ser colocada em causa a estabilidade global da estrutura.

Foram desenvolvidas algumas técnicas de ligação de madeiras, no entanto existem ainda lacunas na descrição do comportamento das ligações quando sujeitas a ações de longa duração. Por este motivo, não se consegue atualmente estabelecer com verdadeiro rigor a capacidade resistente das ligações, e isto pode conduzir a um aumento do custo e da ineficiência das estruturas.

### 2.1.1 - Evolução das ligações

Desde sempre que a madeira é utilizada pelo Homem como material estrutural, e desde logo surgiu a necessidade de ligar os diversos elementos de madeira, para a construção.

Surgem portanto as ligações em madeira, absolutamente necessárias para garantir a estabilidade das construções deste tipo, que no nosso País ainda é de domínio pouco explorado. As estruturas adquiriram uma maior complexidade e novas técnicas de ligação foram desenvolvidas de modo a garantir a adequada transferência de esforços entre os elementos de madeira, ou também como parte integrante de sistemas estruturais, como por exemplo as treliças.

Durante o período de ouro das coberturas de madeira, entre os séculos XIII e XIX, as ligações entre os diversos elementos eram feitas por entalhes ou, em geral, por articulações de madeira com o objetivo de preparar as conexões entre dois ou mais elementos (J. M. G. Branco, 2008).

No século XX, a necessidade de construção em massa (grande escala de produção, pré-fabricação de qualidade, etc.) e a ampla aplicação de elementos metálicos, como pregos, parafusos, a profissão de carpinteiro quase que deixou de existir. Como consequência, houve menos trabalho de carpintaria do que era necessário e os

elementos metálicos tornaram-se essenciais para corrigir e melhorar o contato entre os membros conectados. Em qualquer caso, a concepção e execução das juntas sempre foi a tarefa mais complexa para o projetista. De fato, as mais frequentes patologias ou falhas de estruturas de telhados de madeira são causadas por juntas ineficientes, mal projetadas e/ou mal executadas.

Os vários tipos de ligações podem ser classificados relativamente a diversos aspetos.

No que diz respeito ao fator tempo, podemos fazer duas distinções:

Ligações clássicas (Figura 2 e Figura 3).

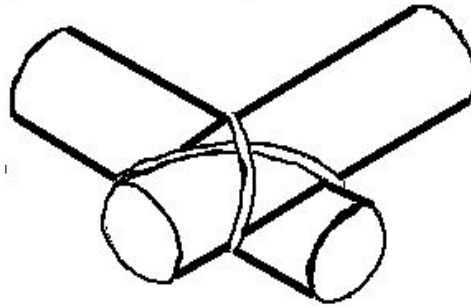


Figura 2 - Ligações por fibras vegetais (Mendes, 1994a).

As ligações clássicas mais usuais são efetuadas por entalhes, que poderão resultar em ligações mais frágeis,

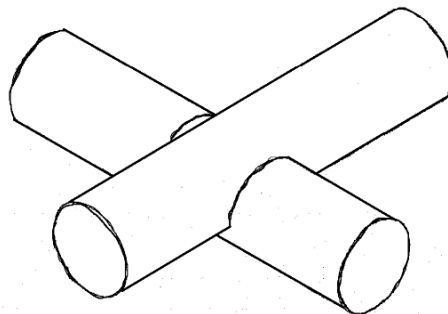


Figura 3 - Ligações por entalhes, troncos (Mendes, 1994a).

Sendo as ligações mais recentes ou modernas, efetuadas através de uma preparação e modulação da madeira.

Ligações modernas ( Figura 4)

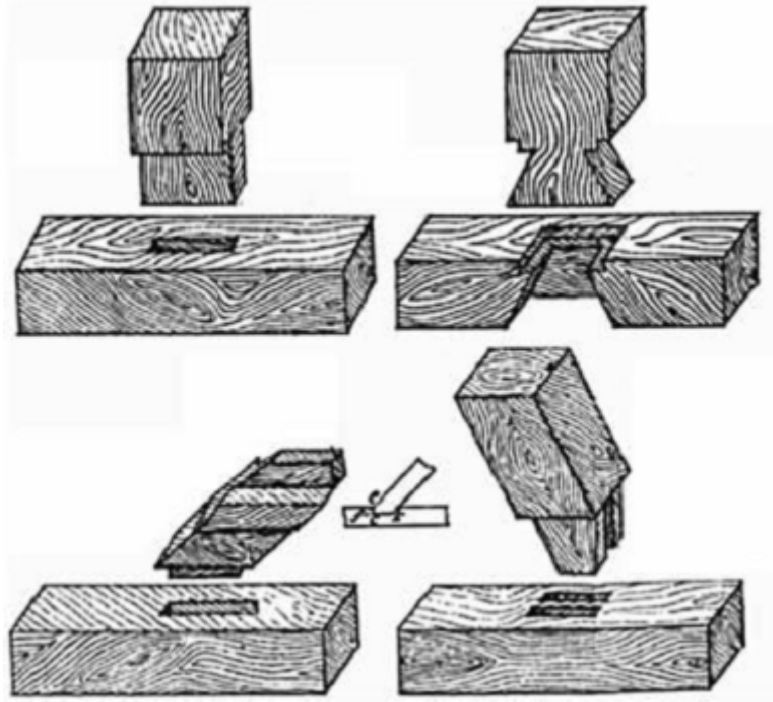


Figura 4 - Ligação tradicionais por entalhes (Costa, 1955).

Quanto ao tipo de tecnologia empregue, pode-se ter:

- Ligações por entalhe (ligações tradicionais) (Figura 4 - Ligação tradicionais por entalhes (Costa, 1955).;
- Ligações mecânicas (que recorrem a elementos metálicos para a junção dos elementos) (Figura 6);
- Ligações coladas, através do recurso a compostos químicos (Figura 7).



Ligações por entalhe.

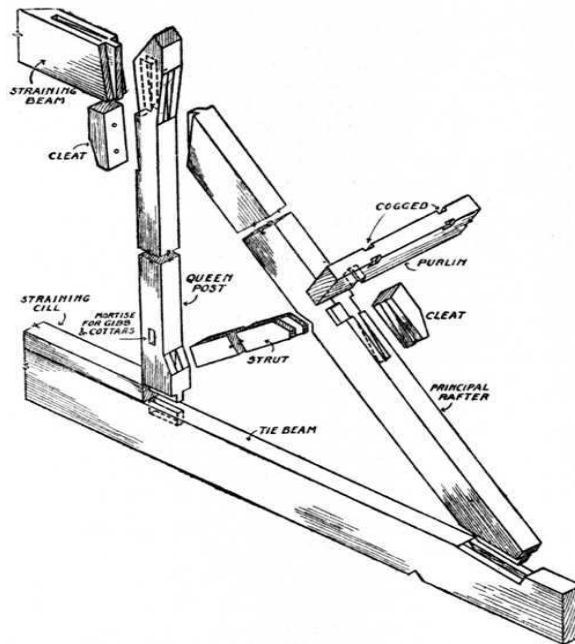


Figura 5 - Ligações tradicionais.

Ligações mecânicas.

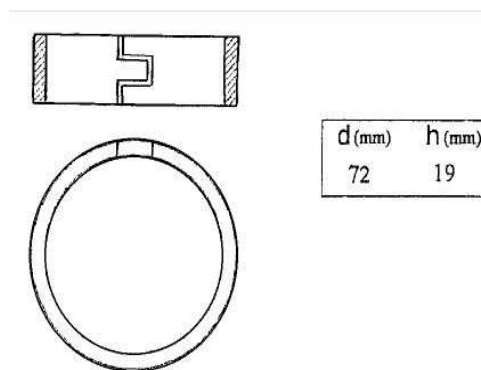


Figura 6 - Anéis metálicos abertos A2 (Mendes, 1994a).

Ligações coladas.

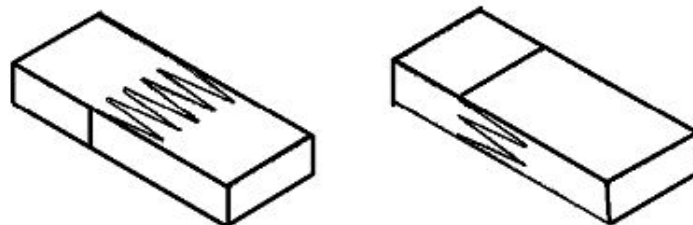


Figura 7 - Ligação colada (Mendes, 1994a).

Os materiais constituintes de uma ligação em madeira são: o aço, os derivados de madeira, e naturalmente a madeira maciça. A evolução das ligações tradicionais de madeira-madeira para o uso de outros materiais deveu-se principalmente à necessidade de aligeiramento das estruturas e ao mesmo tempo de garantir uma boa transmissão de esforços e uma melhor estabilidade da ligação.

De realçar, que a tecnologia de estruturas de madeira, exige uma mão-de-obra especializada e com características difíceis de encontrar nos nossos dias.

Em estruturas tradicionais de madeira as ligações, nomeadamente nas asnas (Figura 8), são normalmente materializadas por ligações tipo entalhe. No caso representativo da ligação perna-linha, a ligação absorve a componente horizontal do esforço axial da perna, através da compressão do dente frontal e pelas tensões tangenciais na superfície de contacto (Palma & Cruz, 2006); em geral as forças de atrito e as imperfeições geométricas não são consideradas na resistência dessas ligações, sendo assim a força axial é facilmente decomposta em duas forças  $F_1$  e  $F_2$  perpendiculares à superfície do entalhe.

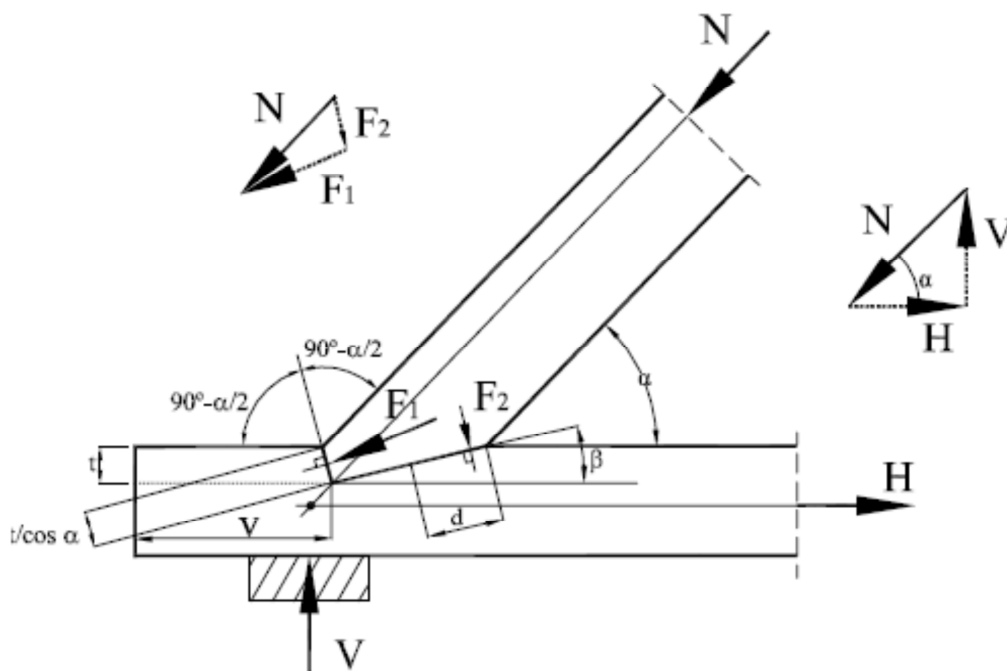


Figura 8 - Mecanismo de resistência de ligação de uma asna tradicional (Branco, Santos, & Cruz, 2008).

Nas zonas sísmicas, em particular, o reforço deve prevenir a degradação da resistência da ligação e evitar a perda de contacto entre os elementos ligados. Braçadeiras, esquadros e varões metálicos representam as soluções de reforço mais vulgares em ligações tradicionais de madeira. Utilizadas em zonas sísmicas (Branco, Cruz, & Piazza, 2006).

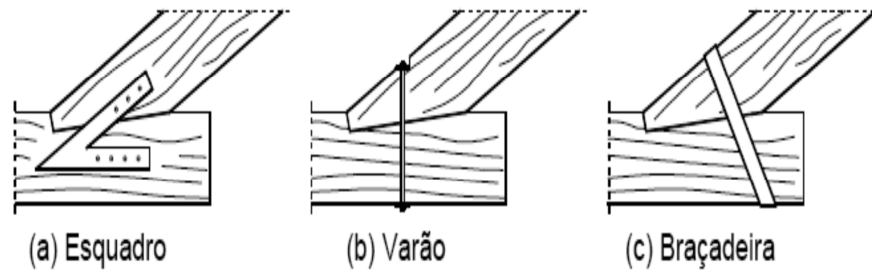


Figura 9 - Três tipos de soluções de reforço.

Nas ligações modernas, o progresso no domínio das ligas metálicas, faz com que os ligadores utilizados passem a ser metálicos. É natural que o interesse no estudo e desenvolvimento dos ligadores seja enorme, com o aparecimento de diferentes ligadores que vão desde o simples prego, às placas metálicas denteadas, e da colagem.

## 2.2 - Técnicas de reforço

No campo de ação da reabilitação e recuperação de estruturas de madeira, as possibilidades de intervenção a adotar são muito variáveis, que podendo passar pela substituição total ou parcial de elementos danificados.(Branco et al., 2006).

Os métodos de reforço podem ser divididos em três grupos:

- Método tradicional, que consiste na substituição das zonas degradadas por peças novas, de dimensões semelhantes às originais;



Figura 10 - Método tradicional.

- Método mecânico, que consiste na adição de elementos metálicos ou de materiais compósitos (cavilhas, parafusos, esquadros, braçadeiras, entre outros);



Figura 11 - Método mecânico.

- Método adesivo, que consiste na substituição da parte deteriorada por argamassa de resina epoxídica ligada à madeira sã, no caso da figura 12 as zonas deterioradas são preenchidas com uma combinação de resina epóxi misturadas com serradura, e madeira nova.



Figura 12 - Método adesivo.

O método mais utilizado para efetuar o reforço das estruturas é o método mecânico com recurso a elementos metálicos, o uso de elementos metálicos tem como principal objetivo prevenir deslocamentos para fora do plano da ligação.

O reforço através da aplicação deste método contempla também o comportamento da ligação no seu próprio plano e o de garantir o contacto entre as peças ligadas, mas também prevenir a degradação da resistência da ligação e evitar a perda de contacto entre os elementos ligados, resultado da diminuição das forças de compressão.

Neste tipo de método, utilizam-se elementos metálicos (pregos, parafusos,...) as quais se caracterizam em dois tipos de modo de ligação em função da transmissão dos esforços (Argüelles Álvarez, Arriaga Martitegui, & Martínez Calleja, 2000).

- Tipo Cavilha, “Doweltype connectors” corresponde aos pregos, parafusos de enroscar, parafusos de porca, cavilhas e pinos. (o esforço transmite-se de uma peça para a outra por flexão e corte do ligador e por tensões de corte na madeira).
- Tipo Superfície, corresponde às ligações através de placas metálicas. (os esforços transmitem-se por distribuição de área de contacto).

### 2.2.1 - Ligação tipo cavilha

Os ligadores cuja forma geométrica seja cilíndrica e que o comprimento seja muito superior ao diâmetro, têm características de funcionamento idênticas, podem ser englobadas numa designação global de ligadores deste tipo cavilha (Mendes, 1994b).



Figura 13 - Ligações tipo cavilha (Mendes, 1994b).

Esta distinção, é feita com base na tecnologia de execução da ligação (Ligações tipo cavilha engloba todas as ligações com um elemento metálico ao corte (pregos, parafusos auto-perfurantes, parafusos de porca e anilha, cavilhas, etc...).

### 2.2.2 - Ligações tipo superfície (CONNECTORES)

Os ligadores lineares aplicados entre faces dos elementos, constituem uma classe de grande importância, resultante por um lado do modo de funcionamento, por outro lado pela significativa evolução que tiveram, a qual culminou em anéis e em chapas denteadas.

A sua vantagem reside no contributo para a diminuição de tensões nos ligadores do tipo cavilha na zona do interface dos elementos, além de que permitem reduzir a deformação da ligação.

Os ligadores de superfície mais usuais, como vemos na Figura 14, estes, são aplicados em ambas as faces.

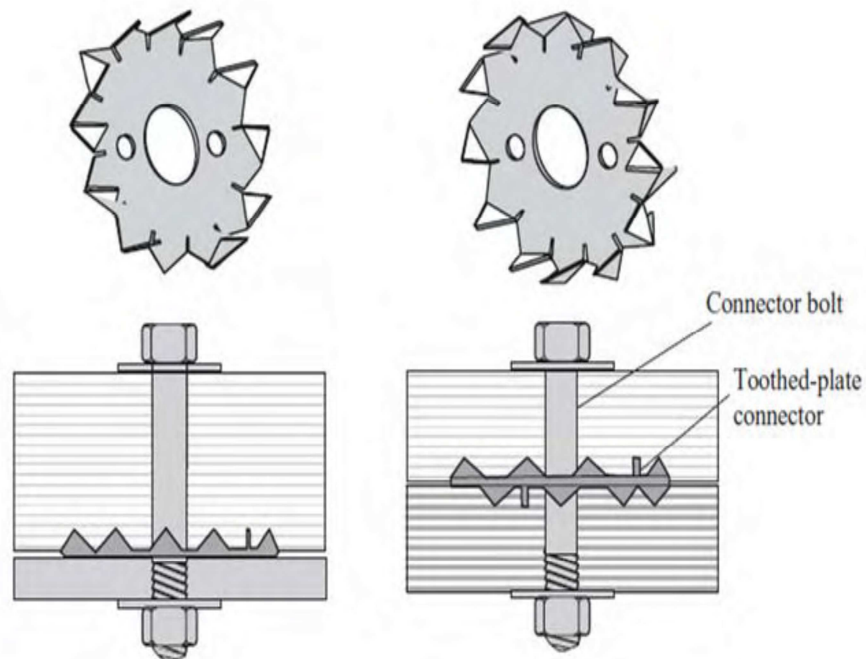


Figura 14 - Ligadores de superfície (Cruz & Palma, 2006).

Dentro deste tipo de ligação, existem os pés-de-galinha, bandas metálicas e os tês. Este tipo de ligações é bastante utilizado em asnas de madeira, sendo que os pés-de-galinha são utilizados para a ligação das Perna-Pendural, os tês para a ligação Perna-Escora e as braçadeiras que irão para a ligação Perna-Linha.

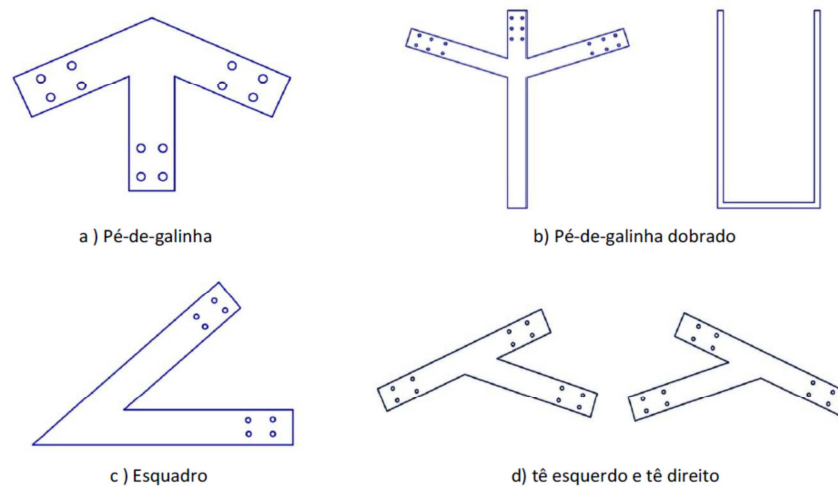


Figura 15 - Esquema tradicional das ferragens de asnas de madeira (Costa, 1955).

Todas as ligações das diferentes peças das asnas são apertadas com ferragens próprias, a largura das barras de ferro para a construção das ferragens das asnas oscila de 5cm a 6cm, no caso de se tratar de asnas de grandes dimensões a largura poderá ser maior, sendo a sua espessura geralmente de 6mm. O diâmetro dos parafusos de porca que atuam nestas ferragens pode ser de 6mm, 8mm ou 12mm consoante a categoria de resistência da asna (Costa, 1955)

As vulgares ferragens de asnas são as seguintes (ver Figura 15): Pé de galinha, para a ligação das pernas ao pendural; Tê para a ligação das pernas às escoras; Pé de galinha dobrado, para a ligação do pendural à linha, e a Braçadeira ou escora, que aperta as pernas à linha.

Os Pés de galinha e os Tês são peças simples e que por isso trabalham em séries de duas, uma de cada lado da peça de madeira, ligadas pelos parafusos. O Pé de galinha dobrado é uma peça única que se coloca debaixo da linha e cujas hastes são depois apertadas de um a outro lado, através da madeira, pelos parafusos. A Braçadeira, a que vulgarmente se dá também o nome de escora, coloca-se pela extremidade da linha e fixa-se apenas à perna, por um parafuso de rosca de madeira ou mesmo por um prego.

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

Sob efeito de ações cíclicas, o reforço afigura-se como a única solução para a garantia de estabilidade da ligação. Dentro deste método, os elementos metálicos mais utilizados são: o esquadro, o varão de aço e a braçadeira.



## Esquadros metálicos

Desde a sua colocação, os esquadros metálicos influenciam bastante o reforço da ligação, pois verifica-se que se forem colocados antes da estrutura ser erguida, ou seja, no início do carregamento, os esquadros são mobilizados e intervêm na resposta da ligação, não permitindo o fecho das folgas entre as peças. Se, por ventura, forem aplicados quando a estrutura já está montada, por exemplo numa ação de reabilitação, e já não há folgas entre as peças, só serão solicitados quando o carregamento provocar deformações significativas na ligação.

Uma ligação reforçada com esquadros apresenta um comportamento simétrico e não linear quando o ângulo aumenta ou diminui. Com este reforço os deslocamentos máximos, a resistência da ligação e a capacidade de dissipação de energia são superiores.

Devido à grande superfície de aço exposta, a eficácia deste reforço pode ser comprometida numa situação de incêndio.

## Varão

Observa-se que, comparativamente à situação sem elementos metálicos, a ligação mais rígida no sentido de abertura do ângulo, embora atinja deslocamentos máximos pouco inferiores. Por outro lado, quando se fecha o ângulo, os deslocamentos máximos são agora muito superiores, devido ao facto do parafuso impedir que as peças escorreguem e se desencaixem.

Ao impedir o desencaixe das peças e através da sua própria deformação, o parafuso aumenta a capacidade da ligação para dissipar energia. O esmagamento localizado da madeira em torno do parafuso resulta na ovalização do furo, permitindo escorregamentos cada vez maiores, o que origina um maior *pinching* dos ciclos e redução da energia dissipada.

## Braçadeira

No caso da ligação com a braçadeira, o deslocamento máximo quando o esforço provoca a abertura do ângulo é semelhante ao da situação sem reforços metálicos, mas quando se fecha o ângulo os deslocamentos são agora muito superiores, devido ao facto da

braçadeira impedir que as peças escorreguem e se desencaixem. Isto permite aumentar a sua resistência e a capacidade de dissipação de energia, embora o mecanismo de dissipação seja o mesmo que na situação sem reforço (atrito no escorregamento entre peças).

Tal como os esquadros, este reforço apresenta uma fraca resistência ao fogo, pois a superfície de aço exposta é significativa.

## 2.3 - Qualidade das ligações

Os requisitos a exigir de uma ligação são a resistência, a deformação, a capacidade de acomodar a inversão das forças atuantes e o modo de rotura. A estes acrescentam-se a rigidez, a ductilidade, a sua resistência ao fogo e à corrosão e, não menos importante por influenciar os aspetos anteriores, a pormenorização da própria ligação (Madsen, 1998).

Estes princípios gerais aplicam-se às ligações tradicionais e também às mais modernas.

### Resistência

As ligações devem ter uma capacidade resistente adequada às forças que têm de transmitir. As ligações apresentam dificuldades muito maiores comparativamente aos outros elementos da estrutura em termos de cálculo, ainda, que tendo a madeira um comportamento anisotrópico, cuja resistência na direção perpendicular às fibras é muito inferior à resistência na direção paralela, a rotura pode ser condicionada por efeitos que à primeira vista seriam desprezáveis, mas que nas zonas de ligação se amplificam devido à concentração de tensões.

### Deformação

A avaliação das deformações nas ligações muitas das vezes não se dava grande relevância no processo de cálculo e dimensionamento de uma estrutura, porém, o EC5 (ENV, 1995) estipula que a influência das deformações nas ligações deve ser em geral considerada, através da sua rigidez (rotacional).

### Resistência às ações cíclicas

Este critério é de elevada importância na utilização de ligações tradicionais, pelo que, transmitem os esforços essencialmente por contacto os quais são frágeis aquando da inversão de esforços, devido a isso, as ligações tradicionais de madeira normalmente realizadas através de entalhes, são complementadas pela colocação de elementos metálicos com a função de manter o contacto entre as peças ligadas quando existe a possibilidade de inversão de forças (Santos, 2009).

Na perspetiva do engenheiro de estruturas, a qualidade de uma ligação depende do seu comportamento mecânico, a curto e longo prazo. Os parâmetros relevantes são:

resistência, capacidade de suportar inversão de esforços, modo de rotura (Madsen, 1998), rigidez, ductilidade, fiabilidade e resistência ao fogo.

Na perspetiva do arquiteto, as ligações visíveis indicam o grau tecnológico da estrutura que integram e delas depende a qualidade estética do conjunto, sendo parâmetros relevantes a forma, as dimensões, o acabamento (cor, textura), a proporção entre as dimensões e disposição dos ligadores e dos elementos de madeira.

Sob o ponto de vista do empreiteiro, os aspetos mais importantes são a facilidade de manuseamento e aplicação, a rapidez de montagem, a possibilidade de criar rotinas através do uso de dispositivos ou sistemas adequados para que o desempenho da ligação não fique dependente da perícia do executante, limitando-se simultaneamente a possibilidade de trocas ou enganos.

Todos estes aspetos são importantes e devem ser tidos em conta, embora nem sempre seja fácil arranjar soluções de compromisso que satisfaçam todos os envolvidos.

## CAPÍTULO 3 - Reforço de asnas tradicionais

As asnas, aqui apresentadas, foram salvas de uma operação de demolição de uma cobertura nas instalações fabris da empresa ADICO, localizada em Avanca.

Segundo (J. M. G. Branco, 2008), a idade das asnas não é conhecida, mas sabe-se que a empresa ADICO existe desde 1920 e que existem documentos que datam de 1942 onde já se poderia constatar a existência do armazém de onde foram retiradas as asnas.

A asna ensaiada por (Santos, 2009), é uma asna que tem uma geometria composta, tipo Howe, com recurso a Pendurais principais, secundários e terciários tal como se pode ver na Figura 16, assim como a nomenclatura utilizada para identificar cada elemento, a esta asna chamaremos asna 1, às asnas ensaiadas neste trabalho designaremos por asna 2 e asna 3.

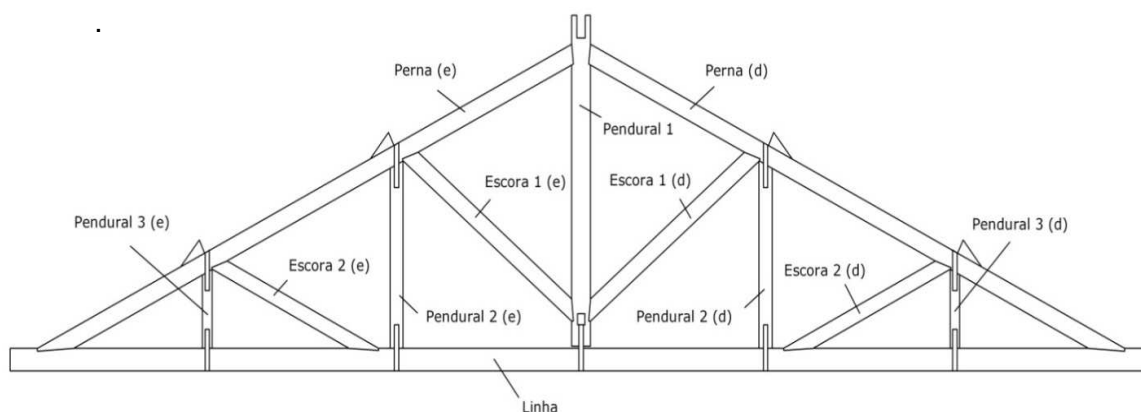


Figura 16 - Asna ensaiada.

Nesta dissertação são apresentadas as recomendações para o restauro dos elementos estruturais das asnas 2 e 3 (o esquema de reforço das ligações da asna com parafusos auto-perfurantes para a asna 2 e o esquema de reforço das ligações da asna com chapas metálicas e parafusos auto-perfurantes para a asna 3).

As informações iniciais foram obtidas nas dissertações (Santos, 2009) e (Bastos, 2011b) sendo estas intervenções efetuadas e dimensionadas para a temperatura ambiente, de acordo com o Eurocódigo 5.

Na asna 1 (Santos, 2009) o ensaio foi efetuado sem qualquer intervenção nas ligações, Figura 17.

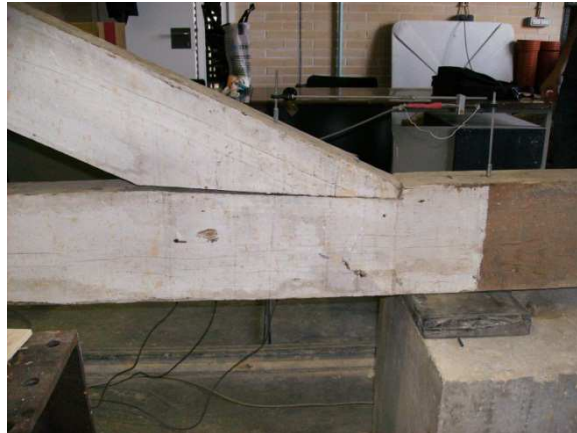


Figura 17 - Asna original (ligação linha-perna).



Figura 18 - Rotura devido ao esforço de corte.

Como conclusão do anterior trabalho, realizado por (Santos, 2009):

*“No que concerne à campanha de ensaio de carga realizado no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro,..., onde se verificou que a rotura se deveu à cedência da madeira por esforço de corte da ligação Linha-Perna.”(Santos, 2009).*

*A capacidade de transmissão de momentos nas ligações altera significativamente a resposta das asnas, em particular quando estas ligações estão sujeitas a ações não simétricas;(J. M. C. Branco, P.J.S.; Piazza, M.; Varum, H., 2008)*

Como experimentalmente se verificou que o comportamento das ligações linha-perna, é de elevada importância, o que levou a realizar-se uma campanha de ensaio de carga às restantes asnas tendo como objetivo principal, no caso particular da reabilitação e/ou reforço de coberturas tradicionais de madeira, o conhecimento do comportamento semi-rígido das ligações típicas em asnas tradicionais de madeira com as soluções de reforço efetuadas.

Estas foram mantidas e armazenadas no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro aproximadamente 6 anos.

Foi feita uma caracterização das asnas recorrendo a ensaios não destrutivos, estes ensaios foram efetuados por (Bastos, 2011b).

### 3.1 - Avaliação das asnas

A avaliação das asnas foi efetuado no trabalho anterior (Bastos, 2011b). A primeira abordagem no que respeita à análise das asnas passou pela identificação dos diversos elementos que as compõe.

#### 3.1.1 - Inspeção visual

A inspeção visual foi a abordagem de análise seguinte efetuada.

Este tipo de intervenção foi de grande importância no estudo de estruturas de madeira tradicionais, possibilitando identificar a degradação externa na madeira bem como eventuais danos mecânicos ao nível das ligações.

Foi possível identificar um elevado número de focos de degradação causados na sua maioria por ataques de agentes xilófagos. A ocorrência destes ataques foi detetada com base nos diversos orifícios de saída presentes em várias zonas das duas asnas.

A degradação em ambas as asnas é mais visível numa das faces, o que pode ser explicado pelo facto de a face mais degradada ser referente à zona exterior da madeira ou borne, enquanto a face menos degradada é referente ao cerne.

O borne é constituído por madeira menos densa quando comparado com o cerne, o que o constitui um alvo preferencial do ataque de agentes xilófagos. Desta forma, os

agentes xilófagos tendem a abrir mais orifícios de saída nas faces correspondentes ao borne da madeira.

Na asna 2, existe um elevado grau de degradação ao nível das escoras 1 e 2 e no topo do pendural.

Outros defeitos foram detetados através da inspeção visual, tais como nós, fendas, descaios e empenos de alguns elementos.



Figura 19 - Orifícios de saída provocados por insetos xilófagos no pendural 3.

O ensaio de Pilodyn foi efetuado por (Bastos, 2011a), tendo sido feito nas duas asnas na face que se encontrava acessível, pois as asnas encontravam-se armazenadas de uma forma que não permitia o seu deslocamento, com o intuito de avaliar a densidade superficial e o seu estado de degradação.

O ensaio com recurso ao Pilodyn é um método fácil, barato e rápido de estimar indiretamente a densidade da madeira e também a sua qualidade e resistência. Este método funciona através da penetração na madeira de um pino de aço impulsionado por uma mola com uma força constante, cuja profundidade de penetração é, em princípio, inversamente proporcional à densidade da madeira e, conseqüentemente, constitui uma



medida do grau de degradação da madeira causada por fungos de podridão. No entanto, embora seja um método muito rápido e não destrutivo, sendo indireto, poderá não traduzir corretamente a densidade da madeira. Isto deve-se ao facto de o pino apenas penetrar alguns milímetros na zona periférica do tronco, sendo apenas esta a zona avaliada, não contabilizando a zona interior do tronco.

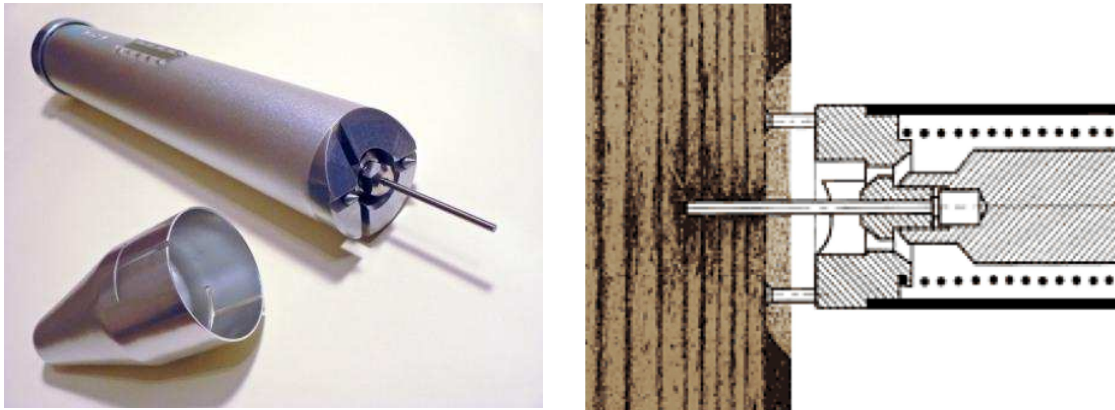


Figura 20 - Pilodyn.

Encontra-se representado o mapeamento das zonas degradadas das duas asnas, com base na profundidade de penetração da agulha.

As zonas onde a agulha penetrou a maior profundidade corresponderam, em grande parte dos casos, às zonas degradadas identificadas quando se efetuou a inspeção visual.

A profundidade de penetração da agulha pode ser relacionada com a densidade da madeira, permitindo estabelecer uma correlação entre estes dois parâmetros. Neste trabalho, como não foi possível estimar com o mínimo de rigor a densidade dos elementos das asnas, nem se procedeu à correlação entre a densidade e a profundidade de penetração da agulha no ensaio de pilodyn.

Na Figura 21 apresentam-se os resultados dos ensaios pilodyn, para a asna 2.

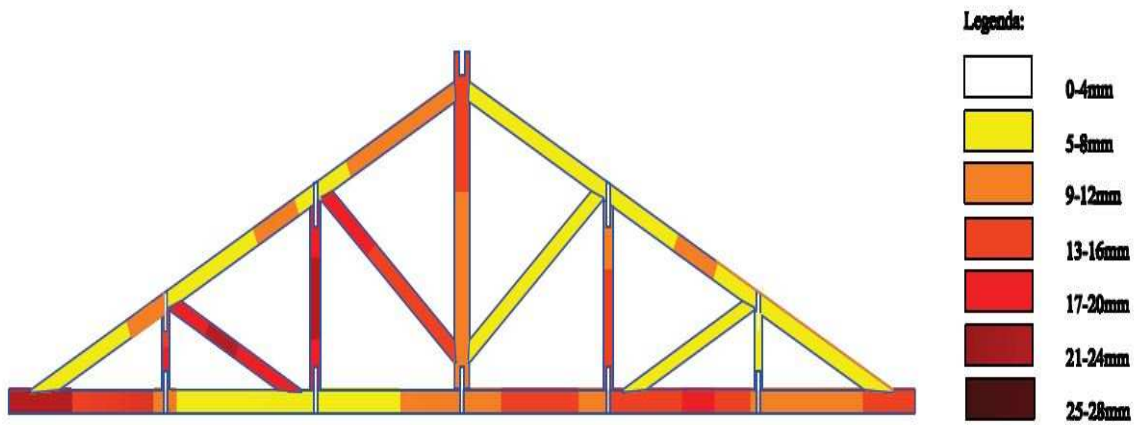


Figura 21 - Profundidades atingidas no ensaio pilodyn na asna 2.

Na Figura 22 apresenta-se o estado de degradação superficial da asna 3 resultante do ensaio de Pilodyn.

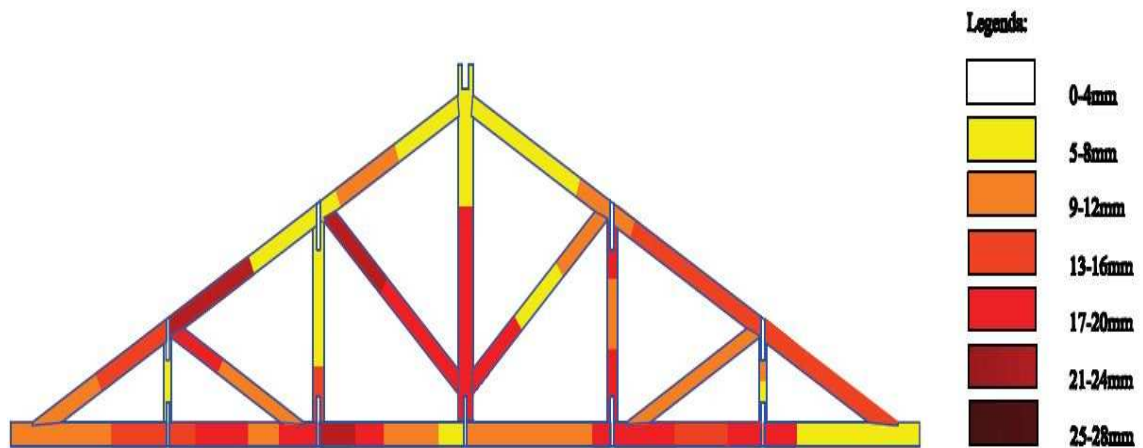


Figura 22 - Profundidades atingidas no ensaio pilodyn na asna 3.

### 3.2. - Reforço das ligações com parafusos auto-perfurantes

Na asna 2 o reforço efetuado foi com os parafusos auto-perfurantes (Figura 24).



Figura 23 - Parafusos auto-perfurantes.

Após a inspeção visual das asnas, foi efetuado uma verificação de todas as ligações das mesmas, tendo a escolha deste tipo de reforço recaído sobre uma das asnas como se verifica na figura 24.



Figura 24 - As asnas a reforçar.

As asnas foram contraventadas com uma estrutura constituída por prumos metálicos idêntica à estrutura usada por (Santos, 2009), havendo alterações pontuais, pois estimaram-se forças de rotura mais elevadas nos ensaios das asnas 2 e 3.

### 3.2.1 - Medidas aplicadas para o reforço efetuado das ligações

A identificação e o reforço efetuado nas ligações, é descrito, para a asna 2, na Figura 26.

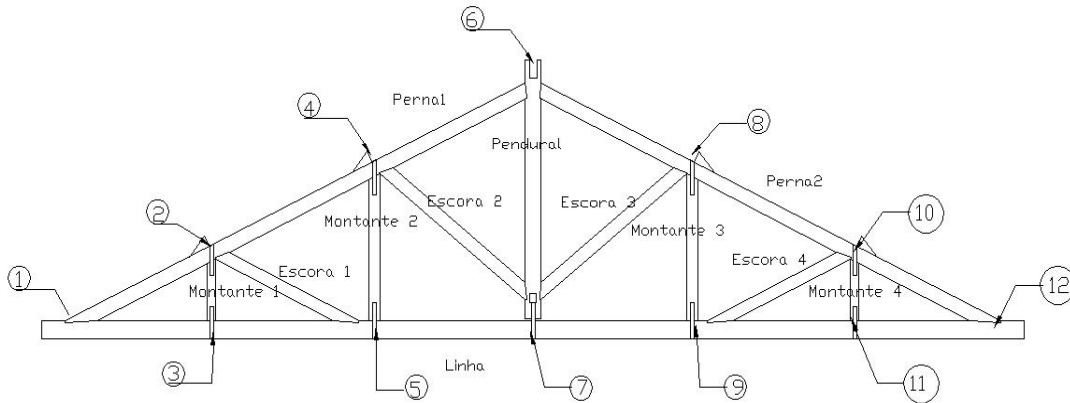


Figura 25 - Esquema da asna

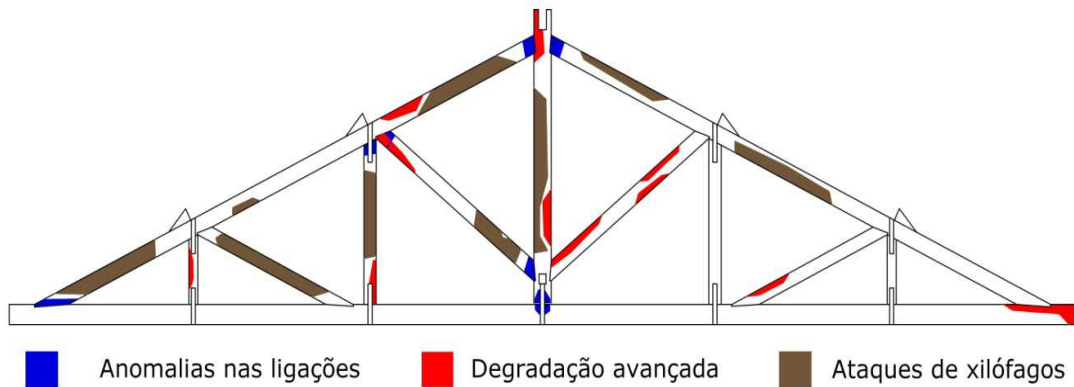


Figura 26 - Anomalias encontradas.

No nó 1 e 12 (Figura 26), o reforço foi efetuado da seguinte maneira:

1. Foi retirado da linha a parte da madeira, atacada pelos agentes xilófagos começando do entalhe (na perna) até a face da linha e regularizado a superfície;
2. Colocou-se um entalhe de madeira, de largura e comprimento correspondente ao reparo, de uma madeira resistente idêntica ao da asna;
3. Aplicou-se um adesivo (à base de um epóxi);
4. Procedeu-se à fixação com parafusos como indicado na figura 28.

Na Figura 27, é possível observar o reforço efetuado na ligação (linha-perna) da asna 2.



Figura 27 - Reforço ligação perna-linha.

A capacidade necessária do reforço foi determinada considerando que o entalhe deverá absorver a carga máxima, incluindo os reforços com parafusos.

Para todas as outras ligações dos nós, foi efetuada a reabilitação e o respetivo reforço com parafusos (Figura 23) de forma a devolver ou a aumentar a rigidez e as características mecânicas da asna.

Foi necessário a reabilitação dos nós 1, 4, 5, 7, 8, 9, 12 (Figura 25), as imagens seguintes identificam os trabalhos efetuados.



Figura 28 - Ligação perna-linha aparafusada (ligação 1 e 12).



A reabilitação das escoras foi efetuada como se vê nas figuras 29, 30 e 31 devido à degradação que apresentava, com a aplicação de entalhes de madeira nova.



Figura 29 - Reabilitação da escora (ligação 4 e 9).



Figura 30 - Reabilitação efetuada escora e pendural (Ligação 5 e 8).



Figura 31 - Reabilitação da escora (ligação 7).

As chapas que prendem os montantes e o pendural foram fixadas na perna e na linha com parafusos para evitar o deslocamento das mesmas, como indica a figura, sendo fixadas de um lado e do outro de uma forma simétrica para garantir as mesmas condições de contraventamento em ambas as direções.



Figura 32 - Chapas aparafusadas com parafusos HBS 10x60.

### 3.2.2 - Ensaio de carga

O ensaio de carga da asna de madeira à escala real foi efetuado no laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

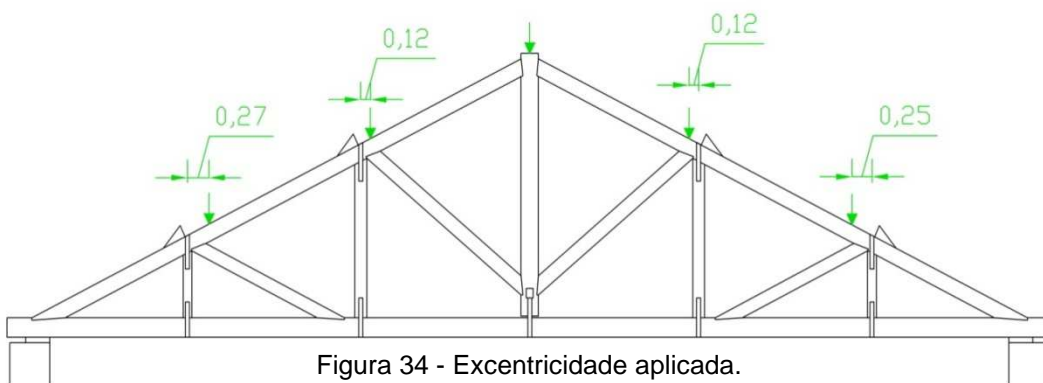
O ensaio consiste num ensaio de carga cíclico num sentido e simétrico com incremento de força até a rotura do sistema estrutural, tal como foi efetuado em (Santos, 2009).



Figura 33 - Asna a ensaiar com o esquema dos atuadores.

Todo o procedimento de ensaio foi análogo ao anteriormente seguido no trabalho experimental anterior de (Santos, 2009), onde se ensaiou uma asna similar não reforçada (vd. capítulo 7 dessa referência).

Os atuadores de 100 kN de capacidade, estão ancorados à laje de reação do laboratório, a força foi aplicada com correntes onde foram utilizados cinco pontos de carga correspondendo cada ponto ao nó formado entre as Escoras e as Pernas, no caso do Pendural principal foi utilizado o ponto de cumeeira como ponto de carga, simulando os pontos onde assentariam as madres da cobertura. É importante relembrar que nos pontos correspondentes aos nós formados pelas Escoras e Pernas, o ponto de carga considerado tem alguma excentricidade em relação a esses nós (Figura 34).



O facto de existir essa excentricidade em relação aos nós, irá fazer com que as pernas estejam sujeitas a esforços de flexão, o que poderá vir a afetar os resultados finais do ensaio.

Após esta fase houve o início do carregamento da asna em ciclos de carga até à rotura do material. Os ciclos de carga iniciaram-se em zero, depois foi criado um patamar mínimo de carga de 6 kN, de ciclo para ciclo houve um incremento de força de 10 kN (excetuando 2º ciclo em que houve um incremento de 15 kN), quando se atingia o patamar pretendido em cada ciclo, efetuava-se a descarga até um valor de referência, que neste caso foi de 6 kN. No ciclo que atingiria os 90 kN efetuou-se uma paragem no carregamento para que se pudesse efetuar o levantamento de danos até ao momento, pois foi onde o ensaio sem qualquer tipo de reabilitação cedeu, isto é, onde houve a rotura.

Depois desta paragem, o ensaio retomou o seu rumo normal efetuando-se de novo os incrementos de 10 kN de ciclo para ciclo até que ocorresse a rotura do material.



Como se pode ver no gráfico 1, esta foi a lei de carga real aplicada a cada uma das células.

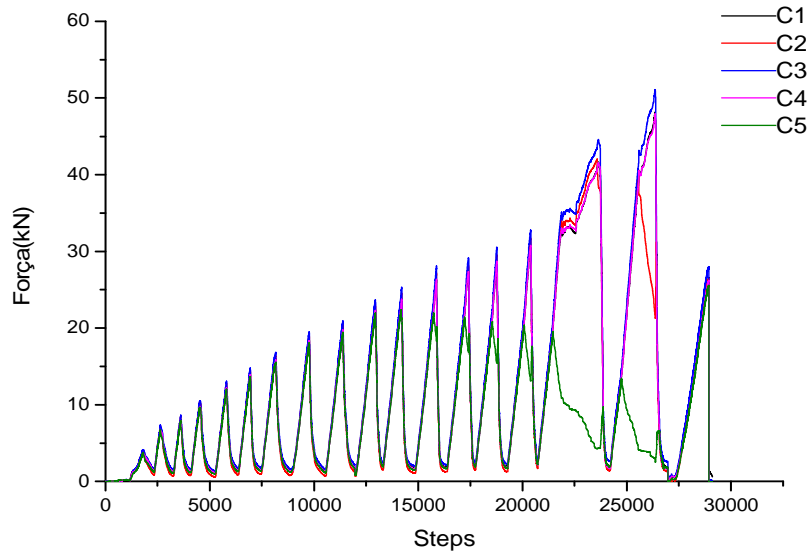


Gráfico 1 - Procedimento de carga.

É importante dizer que a célula de carga C5 perde carga em determinada altura, pois no início do ensaio o braço hidráulico do atuador não estava com a mesma distância dos outros, levando a que houvesse a perda de força.

### 3.2.3 - Instrumentação

A instrumentação aplicada, como indica a figura 35, sendo efetuada através de transdutores medidores de deslocamento e por potenciômetros eletrônicos.

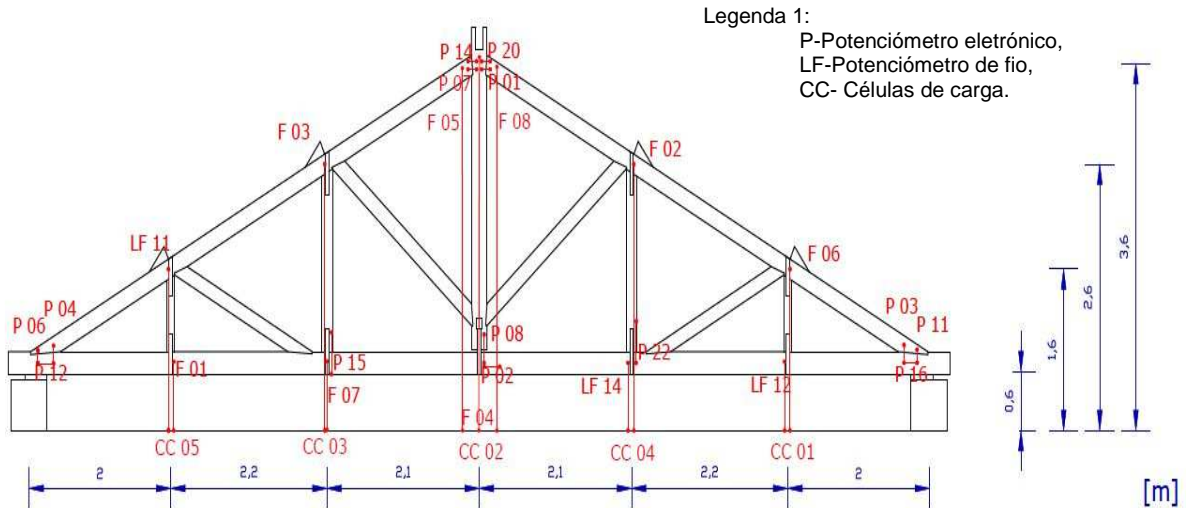


Figura 35 - Instrumentação efetuada na asna 2.

Os deslocamentos medidos, foram sobretudo deslocamentos verticais absolutos dos pontos onde figuravam os nós da asna (estes deslocamentos absolutos foram medidos através dos potenciômetros de fio que tinham um intervalo de medição maior), também foram medidos os deslocamentos internos através de potenciômetros eletrônicos.

As figuras seguintes mostram a instrumentação aplicada à asna 2.

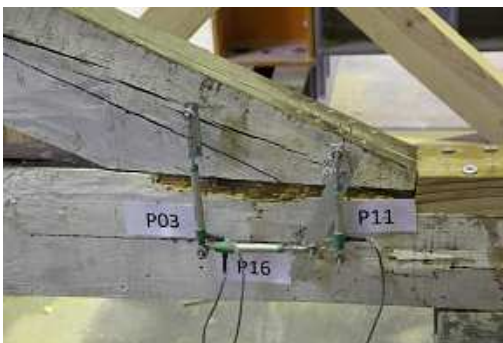


Figura 37 - Potenciômetros eletrônicos aplicados na ligação linha-perna.



Figura 36 - Potenciômetro de fio aplicado na perna.

Nas figuras seguintes é apresentada ou ilustrada a restante instrumentação aplicada à asna 2.



Figura 38 - Potenciômetros aplicados entre o pendural-linha.

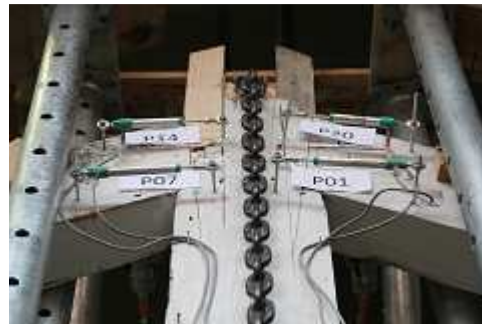


Figura 39 - Potenciômetros perna-pendural principal.



Figura 40 - Potenciômetro aplicado no montante e a linha.



Figura 41 - Potenciômetro de fio aplicado à linha.

Para efetuar as medições de todos os deslocamentos foram necessários no total 25 transdutores, dos quais 14 eram potenciômetros eletrônicos que mediram deslocamentos relativos, 11 eram potenciômetros de fio que mediram deslocamentos verticais absolutos.

As células de carga foram colocadas nos cinco atuadores hidráulicos, onde eram aplicadas na sua ponta medindo as forças verticais aplicadas.



Figura 42 - Células de carga.

### 3.2.4 - Principais resultados

Força deslocamentos globais:

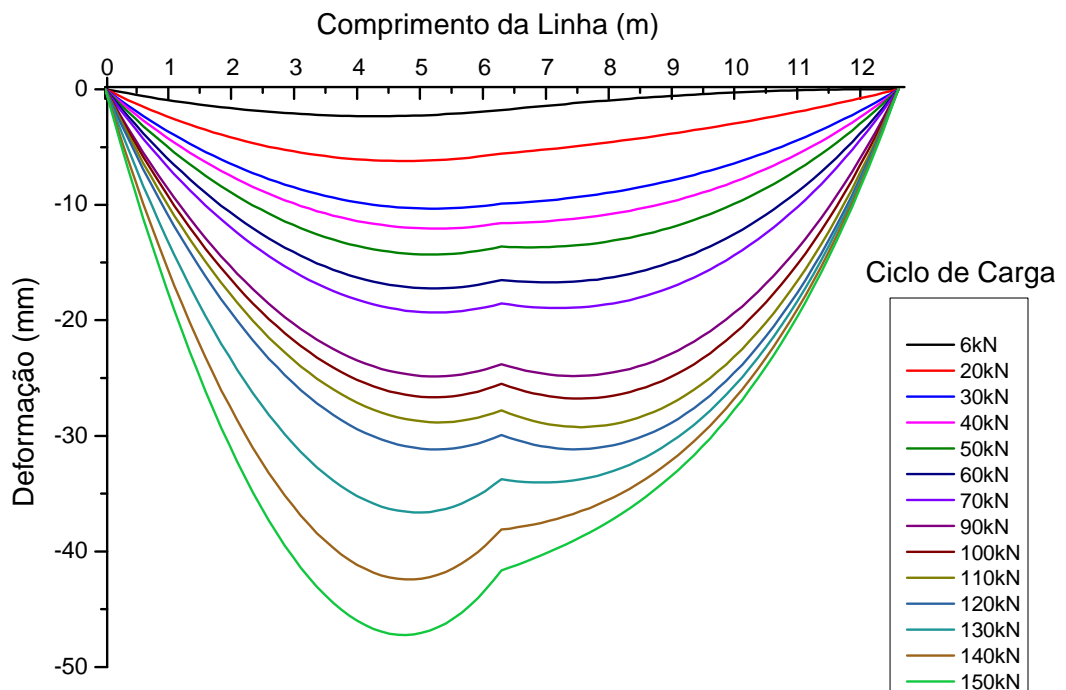


Gráfico 2 - Deformação global da linha.

Através do gráfico anterior, analisa-se qual o comportamento da linha através da aplicação dos ciclos de carga, como resultado, é visível a importância do pendural e o seu comportamento na globalidade do carregamento efetuado, pois as asnas são estruturas hiperestáticas pela alta rigidez das ligações (para a grande maioria das estruturas), gerando a perfeita continuidade das barras, neste caso a transmissão de momentos torna-se determinante sob o efeito de ações assimétricas como são a neve, o vento e o sismo.

Há uma diferença notória no comportamento direito e esquerdo da linha, prevê-se que será do estado em que se encontra a madeira, que foi visível aquando da rotura da asna, que aconteceu no lado esquerdo da ligação, como se verá.

O comportamento global da perna esquerda e direita é descrito a seguir:

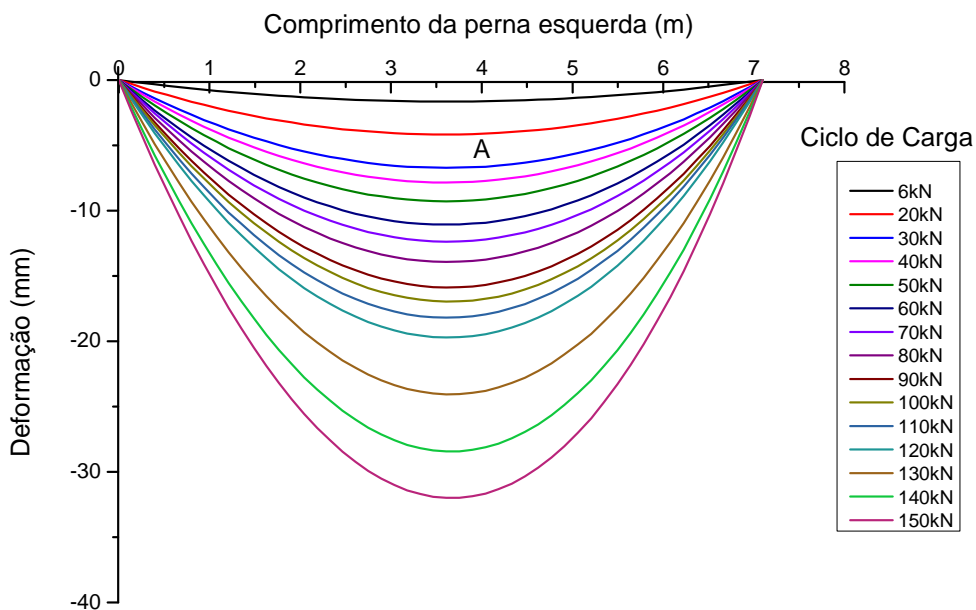


Gráfico 3 - Deformação da perna esquerda.

Este comportamento da perna esquerda, conforme a aplicação dos ciclos de carga, é um comportamento perfeitamente normal e similar ao da parte mais à esquerda da linha

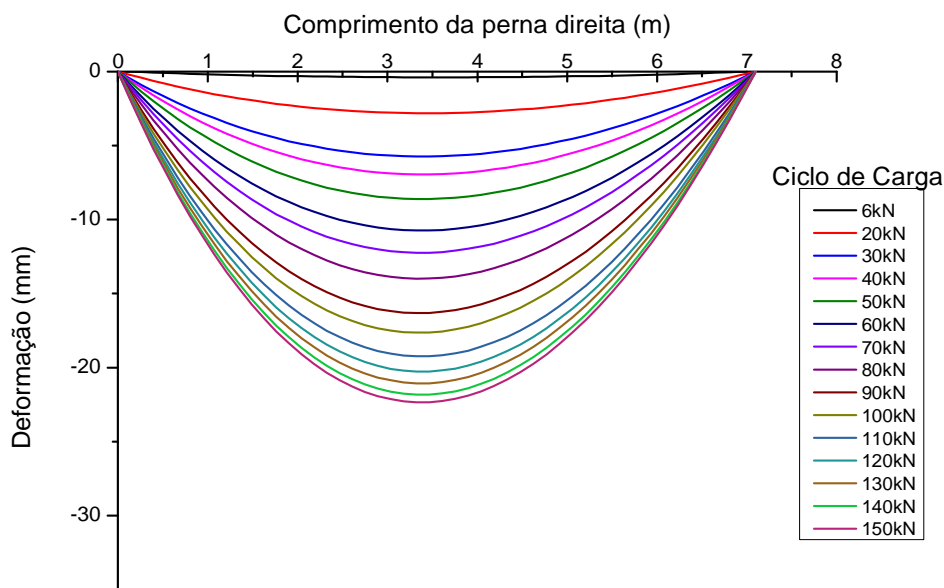


Gráfico 4 - Deformação da perna direita.

Com a análise dos gráficos Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4 é visível que a resposta da asna ao carregamento foi uma resposta mais ou menos simétrica, uma vez que os deslocamentos verticais em pontos de posições simétricas da asna são aproximadamente os mesmos relativamente aos deslocamentos verticais verificados na linha. Nos pontos de leitura em ambas as pernas existe alguma diferença entre os valores, isto poderá dever-se ao facto de o lado direito da asna estar um pouco menos degradado do que o lado esquerdo, apresentando assim uma deformada menor para o mesmo valor de carga aplicada. Este facto confirma plenamente os resultados obtidos no ensaio.

No esquema seguinte encontram-se os pontos onde foram efetuadas as medições.

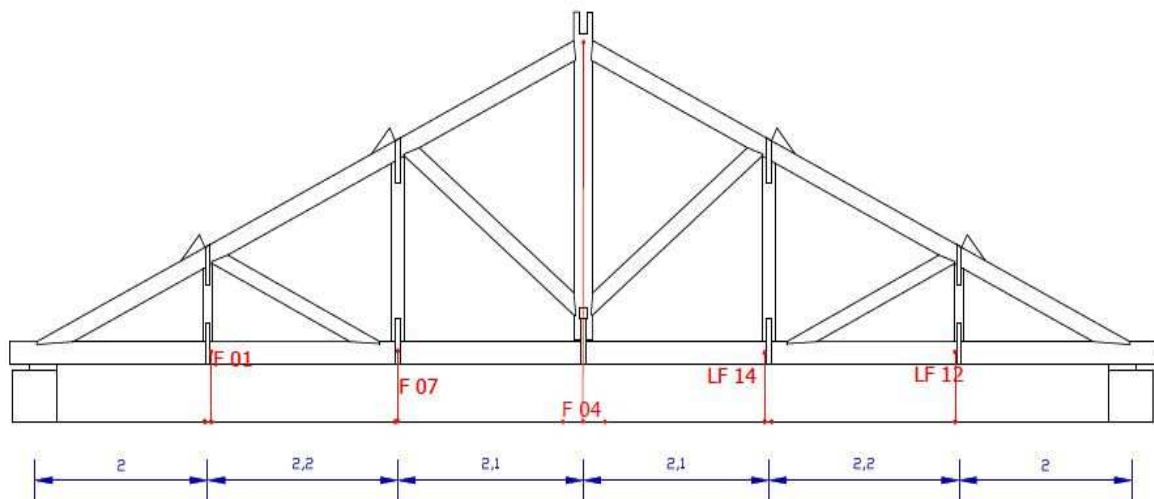


Figura 43 - Esquema dos pontos de medição na asna.

Através da análise do gráfico 5, onde nos é dada a relação força-deslocamento no ponto da ligação Linha-Pendural central, pode-se constatar o comportamento elástico-plástico da estrutura.

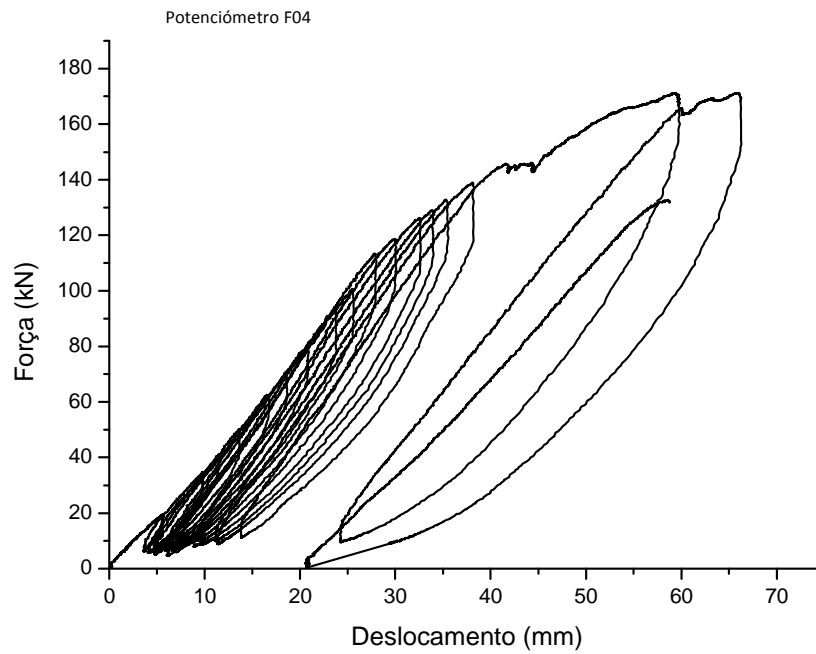


Gráfico 5 - Relação força-deslocamento (LF04).

Como se está a verificar com a análise dos gráficos anteriores e seguinte, a simetria do carregamento é evidente, com uma variação apenas no gráfico 7 pois será devido supostamente à degradação da madeira apresentando pois uma deformação maior do lado do transdutor LF12, sendo aproximadamente de 10 mm.

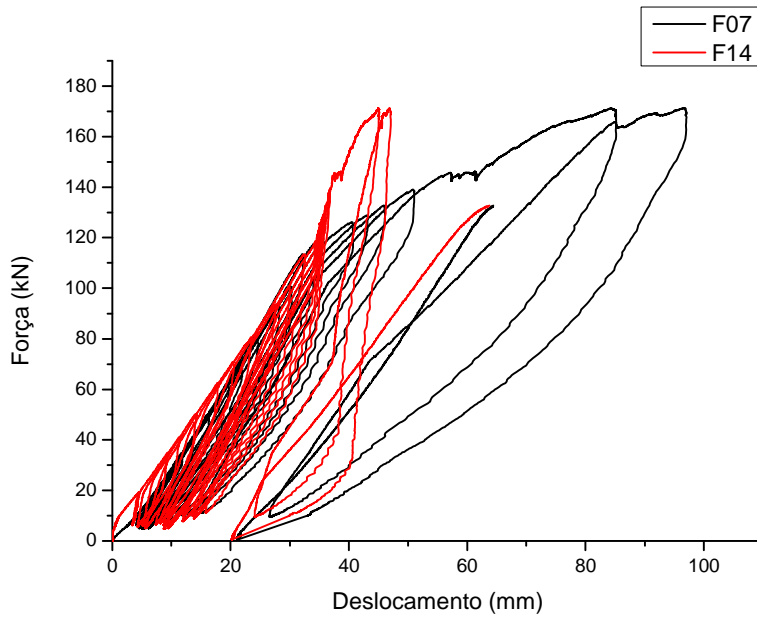


Gráfico 6 - Relação Força-Deslocamento (LF07/LF14).

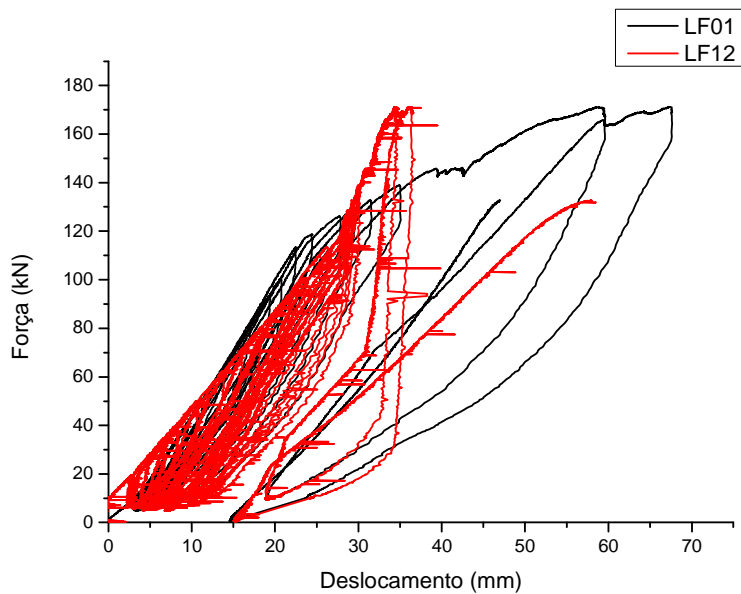


Gráfico 7 - Relação Força-Deslocamento (LF01/LF12).



### 3.2.5 - Rotura da asna.

Para melhor perceber todo o comportamento deste ensaio, desde o início até ao ponto de rotura, aconselha-se pois ler todo o procedimento que foi descrito no ponto 4.2.2. A rotura da asna aconteceu pela ligação linha-perna.



Figura 44 - Rotura da ligação Linha-Perna.



Figura 45 - Rotura da asna.

Verifica-se que a ligação efetuada foi bem dimensionada e aplicada, pois após a força de 171,20 kN é que a rotura aconteceu.

### 3.3 - Reforço das ligações com esquadros metálicos

Na asna 3 Foi efetuado um reforço com esquadros metálicos e com pés de galinha aplicados na ligação perna-pendural principal e na ligação linha-perna.



Figura 46 - Esquadros metálicos.



Figura 47 – Ligação superior pendural-perna.



Figura 48 - Ligação inferior pendural-escora.

As chapas metálicas com espessura de 5 mm, foram colocadas através de parafusos auto-perfurantes HBS 10x60 (mm) em quincôncio, como se vê na figura anterior.

Todo o procedimento efetuado neste tipo de reforço foi idêntico ao anterior ponto desta tese, tanto no contraventamento como também na aplicação da carga.

A perna do lado esquerdo foi integralmente substituída, pois a degradação da mesma era muito acentuada, por uma de madeira nova como se vê na figura 49.

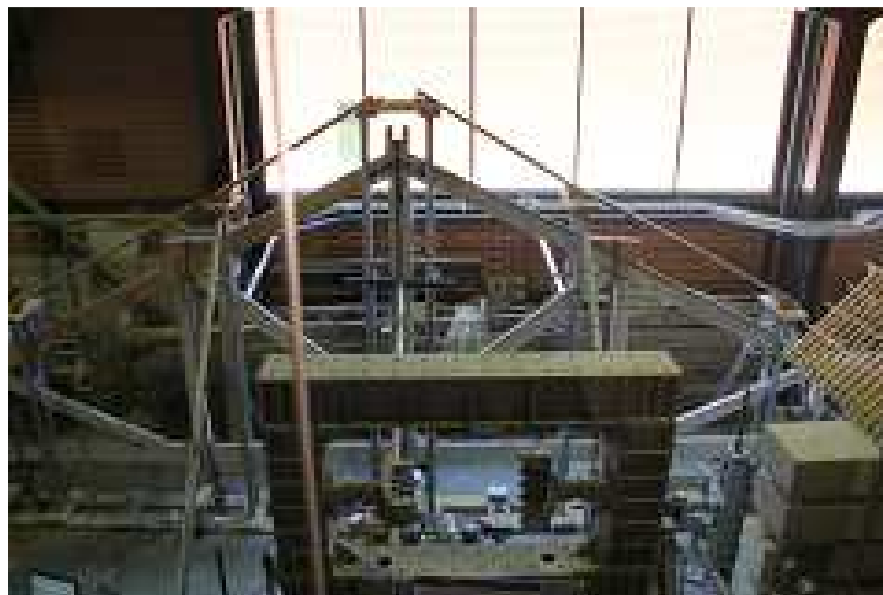


Figura 49 - Intervenção efetuada na asna.

Na perna do lado direito da asna foi efetuada uma intervenção, devido ao estado de degradação, sendo colocada a solução seguinte:



Figura 50 - Intervenção com entalhe de madeira.

O esquema de intervenção que foi colocado em prática foi o seguinte com a aplicação de parafusos auto-perfurantes (VGZ 7x180).



Figura 51 - Esquema de intervenção da perna direita.

### 3.3.1 - Instrumentação

A instrumentação aplicada à asna 3, foi em tudo idêntica à asna anterior, o qual apenas introduzimos dois novos potenciômetros.

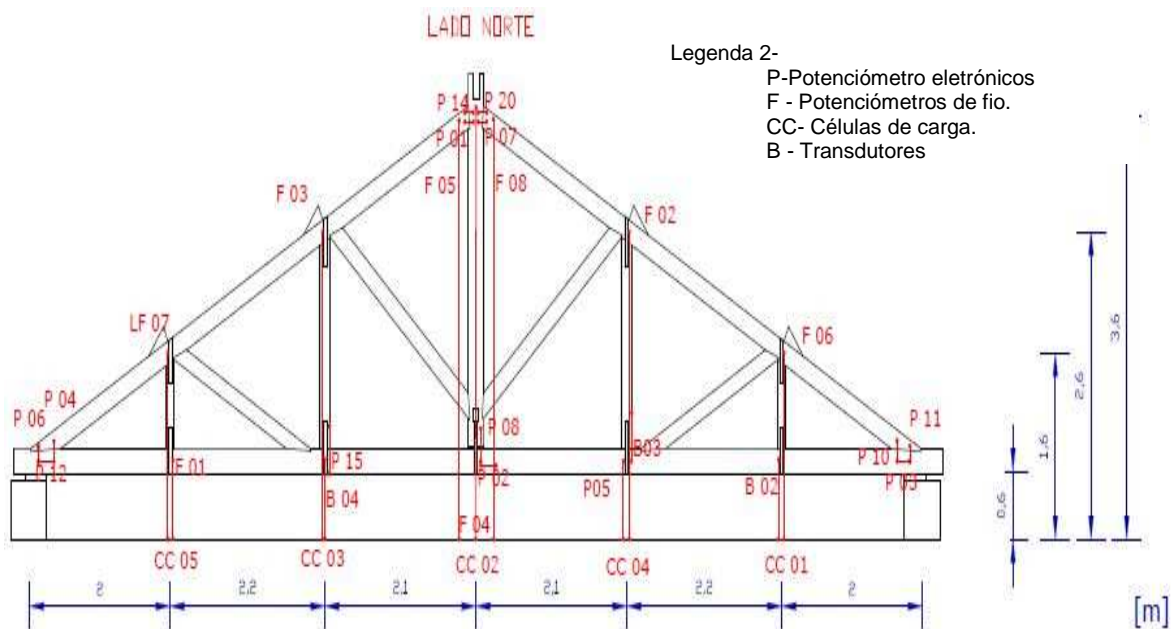


Figura 52 - Instrumentação aplicada na asna 3.

Toda a instrumentação aplicada é descrita nas imagens seguintes.

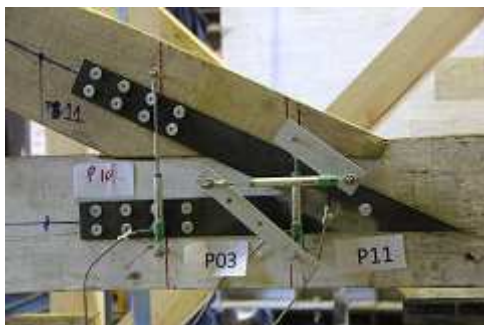


Figura 54 - Ligação perna-linha.



Figura 53 - Potenciômetro de fio aplicado à perna.



A instrumentação aplicada à asna 3, na qual foi aplicada a reabilitação por esquadros metálicos.



Figura 55 - Potenciômetro de fio.



Figura 56 - Potenciômetro aplicado entre pendural-linha.

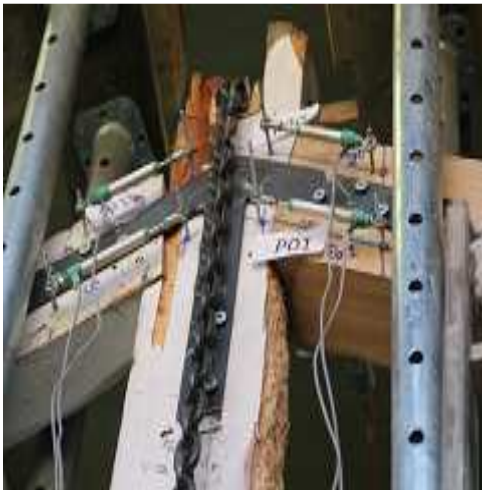


Figura 57 - Potenciômetros aplicados pendural -perna e pendural-linha.



Para completar a instrumentação da linha.



Figura 58 - Potenciômetros aplicados na linha.

O gráfico seguinte, identifica o procedimento e a lei do deslocamento efetuada para este ensaio:

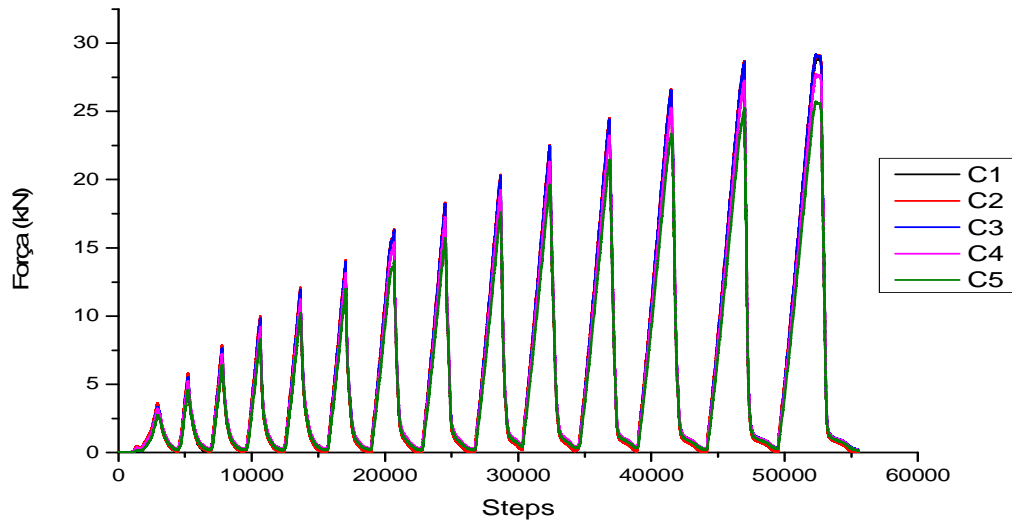


Gráfico 8 - Procedimento de carga.

## 3.3.2 - Resultados globais:

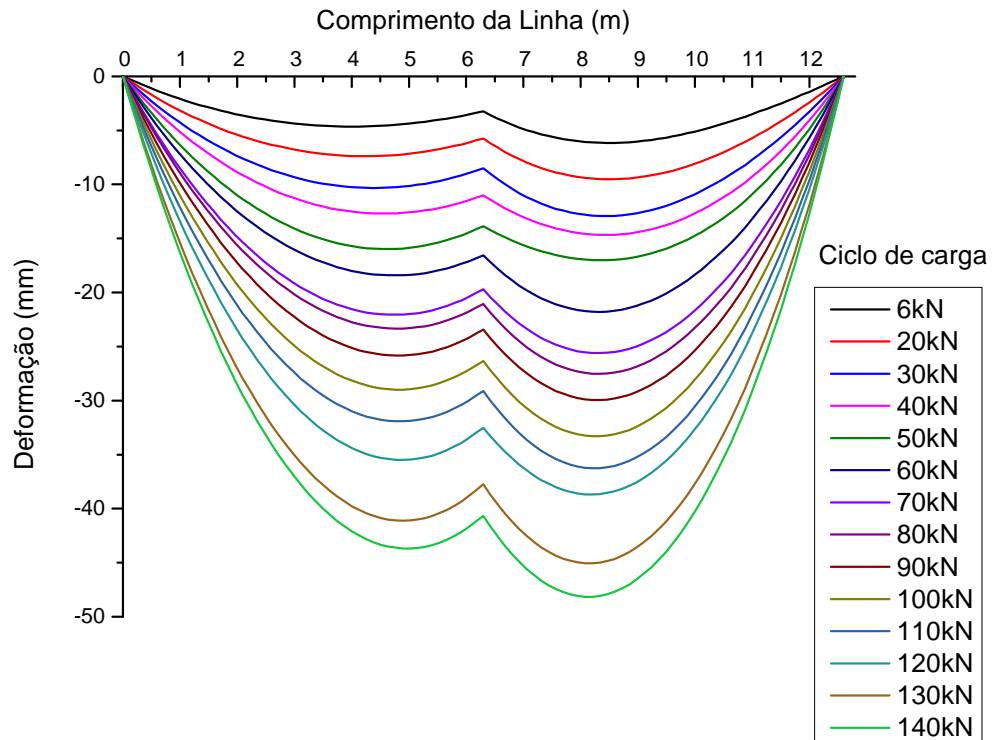
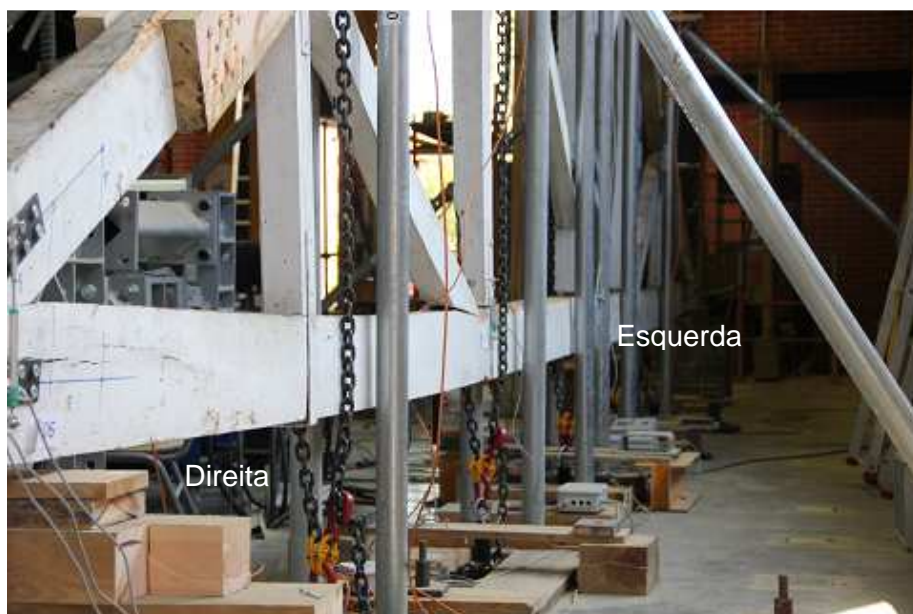


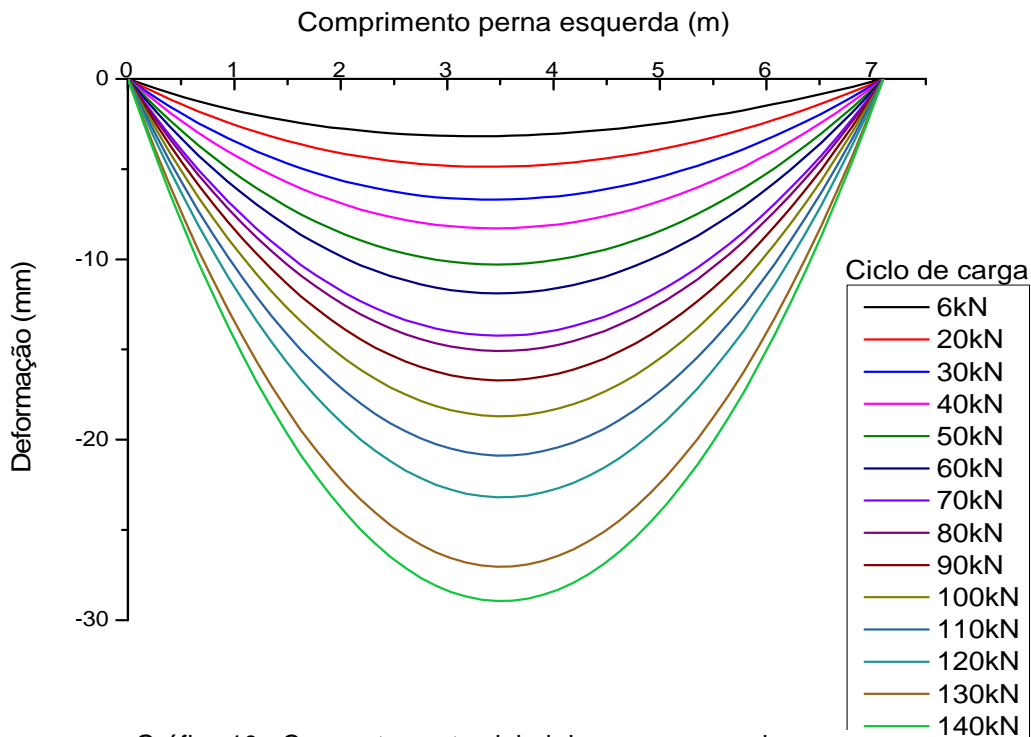
Gráfico 9 - Deformação global da linha.

Em primeira análise do gráfico, verifica-se que a transmissão dos momentos é mais visível neste gráfico e que a rigidez desta ligação será maior, pois no ponto central há um equilíbrio mais acentuado das linhas de carga, como era de prever.

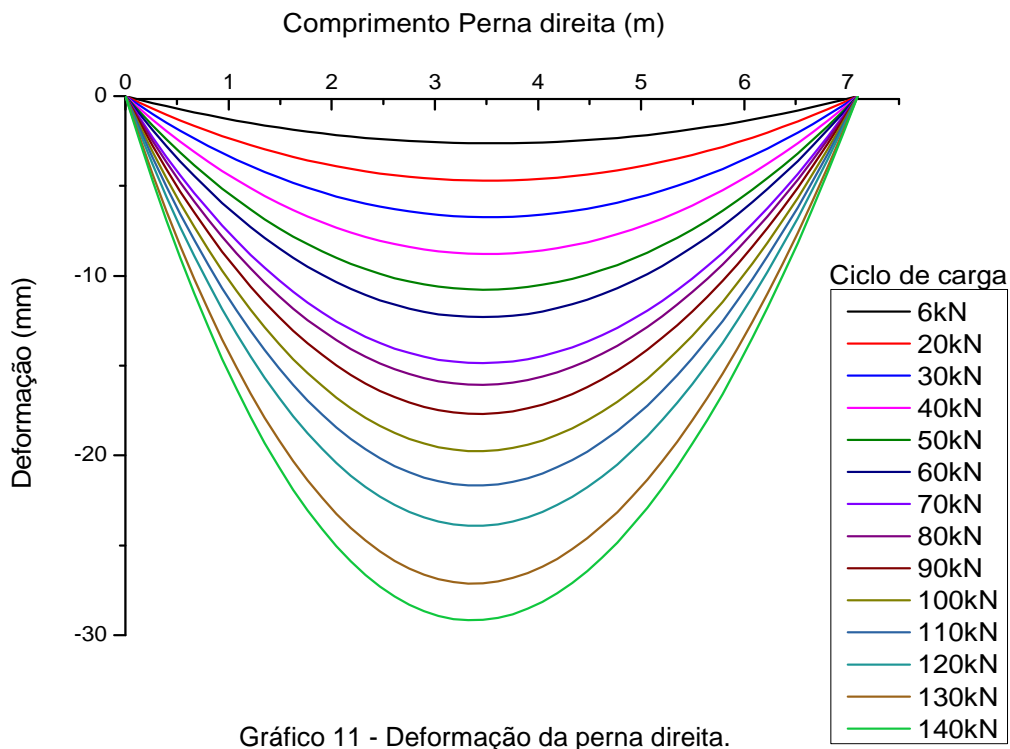




O comportamento global da perna esquerda.



O comportamento global da perna direita:



Foram efetuadas as medições nos mesmos pontos da asna 2, sendo o esquema.

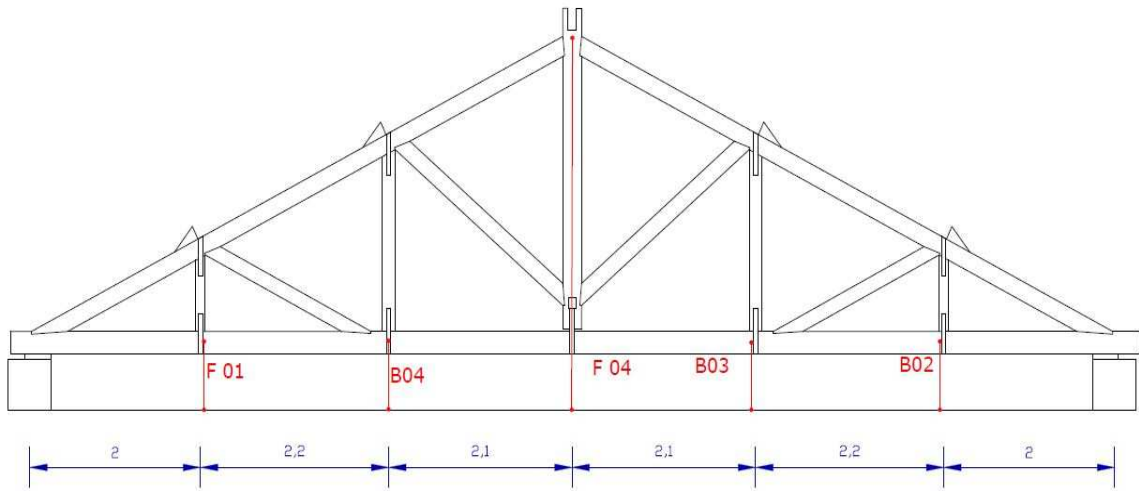


Figura 59 - Esquema de pontos das medições efetuadas na asna 3.

O comportamento da asna é um comportamento simétrico, de seguida verifica-se o comportamento do potenciómetro F04, B03 e B04, F01 e B02:

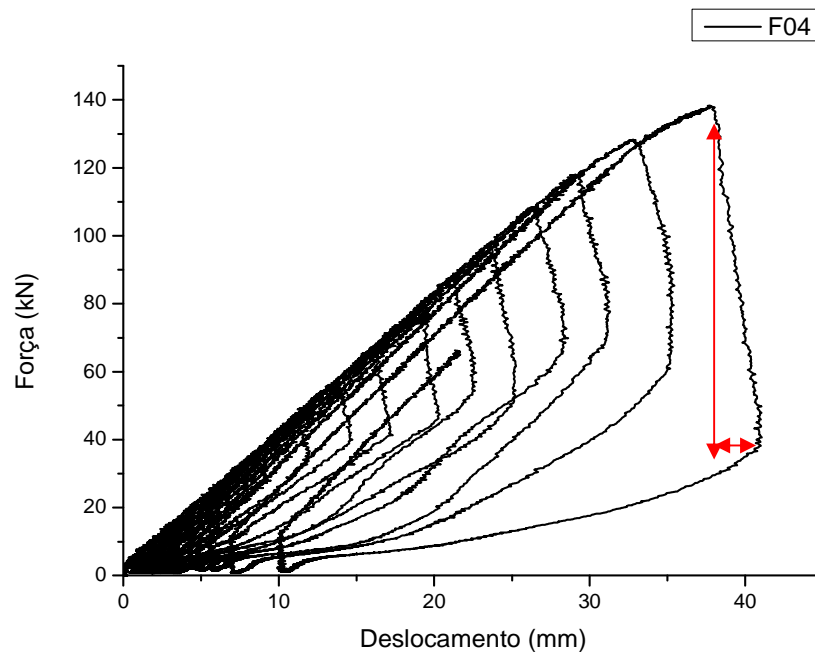


Gráfico 12 - Relação força-deslocamento potenciómetro LF04.

Verifica-se neste gráfico que a curva de descarga provoca um deslocamento, isto aconteceu pois os atuadores não descomprimem todos ao mesmo tempo, provocando este deslocamento.

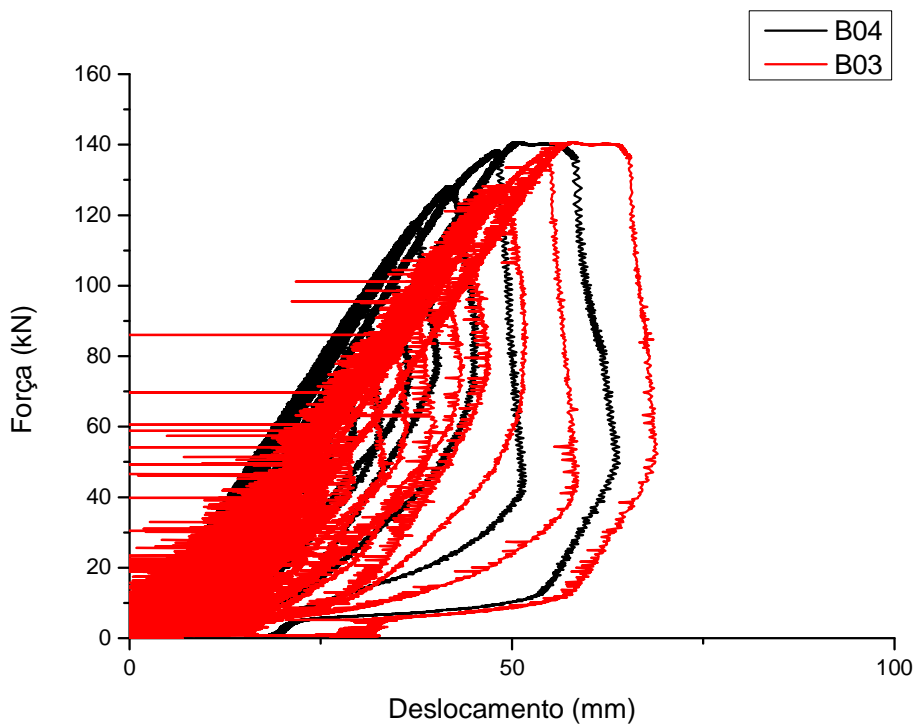


Gráfico 13 - Relação Força-Deslocamento (B03/B04).

Relação força-deslocamento global entre LF01 e B02.

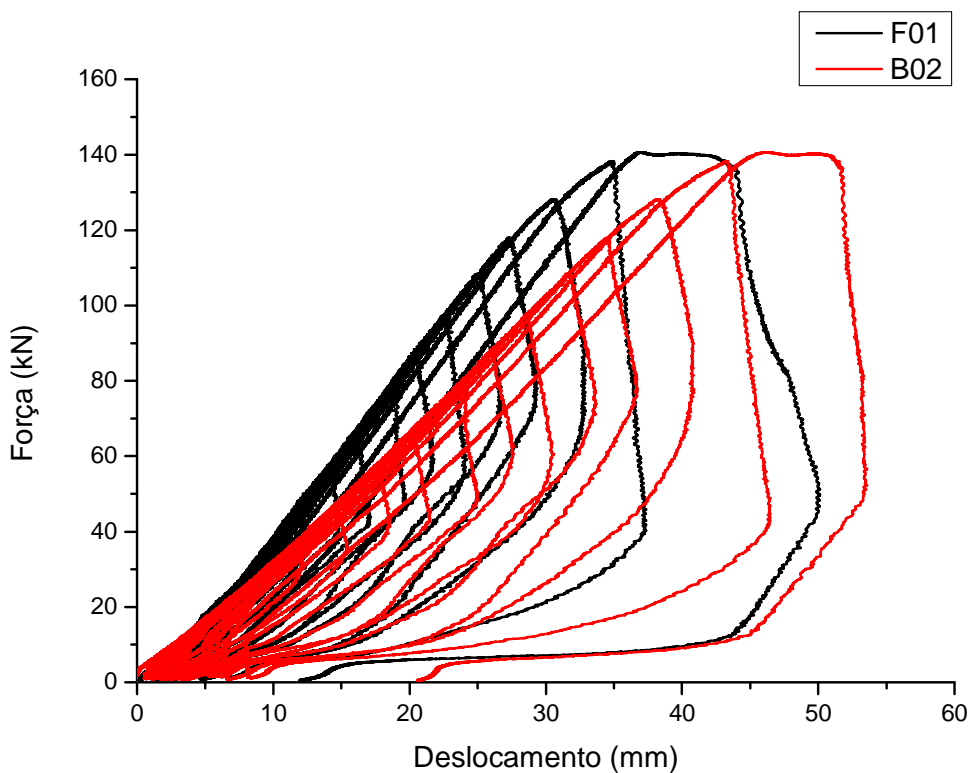


Gráfico 14 - Relação Força-Deslocamento (F01/B02).

Os danos causados pelo carregamento efetuado neste ensaio são visíveis nas figuras 60 e 61 que representa a importância da ductilidade da ligação:



Figura 60 - Plastificação da chapa metálica na ligação Linha-Perna.



Figura 61 - Plastificação da chapa metálica.

### 3.4 - Eficácia do reforço das ligações

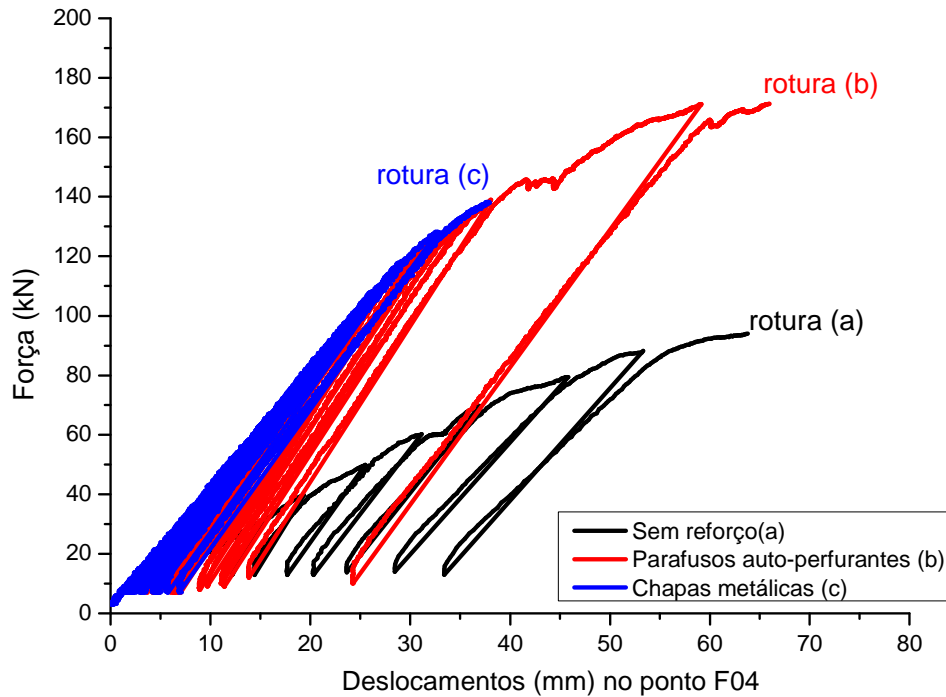
A comparação do comportamento das asnas com e sem reforço é de elevada importância para obter um maior conhecimento das estruturas em estudo, tanto na reabilitação como na conceção de novas estruturas.

Verifica-se que a capacidade resistente das asnas de madeira onde foi aplicado os reforços, é muito maior que a asna sem reforço, mais propriamente, a asna onde foi aplicado o reforço com chapas metálicas (asna 3) atingiu um terço superior, ao valor atingido pela asna 1(sem reforço), e que, o valor atingido pela asna 2 (reforço com parafusos auto-perfurantes) é duas vezes superior ao da asna 1.

Como se verifica, o objetivo atingido pela intervenção nos dois reforços, foi largamente conseguido, apesar do estado da madeira encontrado nas asnas.

Podemos verificar também que o deslocamento com chapas metálicas, asna 3, no caso das ligações perna-linha, é cerca de duas vezes menor ao atingido pelo reforço da asna 2 e da asna 1, verificando-se pois uma rigidez maior na ligação, como era de esperar.

## 3.4.1 - Relação força-deslocamento com e sem reforço



(a) Sem reforço.

(b) Parafusos auto-perfurantes.

(c) Chapas metálicas.



Figura 62 - Ruptura das asnas de madeira.

Comparando os resultados experimentais, da asna sem reforço com as asnas com reforço, conclui-se, em termos de gráfico força-deslocamento, que os ensaios com reforço são eficientes e que a capacidade de resistência das ligações, mesmo com a degradação da madeira encontrada, é superior, para não dizer que duplicou a sua resistência.

Outra conclusão, é que, com soluções baratas, consegue-se melhorar significativamente o comportamento das estruturas, o que em muitos casos se verificava uma intervenção excessivamente do lado da segurança e demasiado intrusivas, como por exemplo a figura 64.



Figura 63 - Ligação de peças com secção circular.

### 3.5 - Recomendações de reforço de asnas tradicionais

Quando se chega o momento da escolha do reforço a aplicar, não é possível definir uma única ou uma solução para cada estrutura, usando um critério do meio-termo entre o aspeto económico e a facilidade de aplicação. O melhor caminho para um bom desempenho estrutural será aplicar um reforço com o qual garanta uma maior segurança e se consiga manter a estrutura na sua função por mais tempo.

Dos estudos efetuados e já comentados, de realçar o bom desempenho destes dois tipos de reforço nas ligações estudadas e da fácil execução garantida por estas soluções.

Como as soluções de reforço estudadas têm por base o recurso a elementos metálicos, é recomendável a sua verificação ao fogo.

Relativamente à durabilidade, nas ligações exteriores expostas à água, mas também nas estruturas interiores sujeitas a infiltrações ocasionais ou condensações, há que ter em conta que, para além do tratamento preservador da madeira e da proteção das peças metálicas, as ligações devem ser ventiladas e com capacidade de escoar a água rapidamente e sem retenções.

A retenção de água na zona das ligações pode conduzir à perda significativa de resistência da madeira por aumento do seu teor em água, ao apodrecimento localizado da madeira e à corrosão acelerada dos ligadores metálicos.

## **CAPÍTULO 4 - Conclusões gerais e futuros desenvolvimentos**

As ligações são um dos aspetos de grande importância no desempenho das estruturas de madeira, não sendo demais salientar a grande relevância quer na sua conceção e pormenorização que tem no seu comportamento e durabilidade.

Com as soluções de reforço de ligações tradicionais de madeira aqui estudadas, conseguiu-se um melhor desempenho, maior fiabilidade garantindo uma fácil aplicação e mantendo os custos baixos.

Será necessário consciencializar os agentes envolvidos para estas abordagens de ligação em estruturas de madeira, abrindo novos horizontes em termos de soluções estruturais e melhorando a qualidade e a economia da construção.

### **4.1 - Concretização dos objetivos**

O objetivo deste trabalho, em primeiro lugar, foi efetuar uma revisão bibliográfica, foram apresentados alguns tipos de asnas mais relevantes utilizadas em Portugal e os tipos de ligações efetuadas nas mesmas.

Um outro objetivo era conseguir a nível de ligações, uma maior resistência nas mesmas, onde, no primeiro ensaio efetuado, (Santos, 2009), sem o reforço nas ligações, foi atingido um valor de rotura, o qual, por meio dos reforços utilizados neste trabalho, foram atingidos valores muito diferentes e superiores ao atingido nesse primeiro ensaio.

O último objetivo deste trabalho, a avaliação de duas técnicas de reforço das asnas, foi conseguido, recorrendo-se à aplicação dos reforços, os resultados dos reforços concluiu-se que reforçando as ligações linha-perna aumenta consideravelmente a capacidade resistente de toda a estrutura, mesmo havendo degradação acentuada da madeira.

Conclui-se que o comportamento da asna é dependente do tipo de ligações efetuadas, sendo que a rigidez é o fator determinante do comportamento da estrutura.



## 4.2 - Futuros desenvolvimentos

Relativamente aos futuros desenvolvimentos, sendo possível efetuar uma análise mais exaustiva aos resultados obtidos, sugere-se um trabalho referente à modelação numérica, mas também, a utilização de outras soluções de reforço, com aplicação de outras técnicas, tais como a aplicação de reforço com elementos compósitos (FRP's).

Com o término deste trabalho, as conclusões são satisfatórias apesar de todas as dificuldades sentidas, tanto no espaço utilizado no ensaio, que era muito reduzido, como na aplicação do contraventamento.

Espero que este trabalho traga novos dados, e, que aumente o conhecimento científico para outros estudos a efetuar neste tipo de intervenções em estruturas idênticas.

## Bibliografia

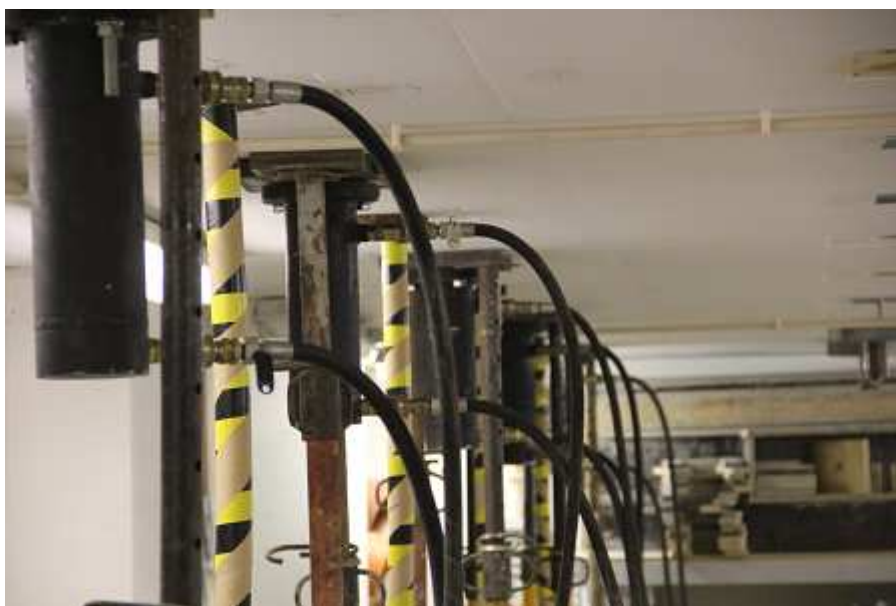
- Argüelles Álvarez, R., Arriaga Martitegui, F., & Martínez Calleja, J. (2000). Estructuras de madera. *Diseño y cálculo. AITIM*.
- Bastos, J. M. S. (2011a). *Asnas Tradicionais de Madeira: Caracterização e Reforço*. Mestrado, Universidade de Aveiro.
- Bastos, J. M. S. (2011b). *Asnas tradicionais de madeira: Caracterização e reforço*. Mestrado, Universidade de Aveiro, Universidade de Aveiro.
- Branco, J. M., Cruz, P. J. S., & Piazza, M. (2006). *Asnas de madeira: a importância da rigidez das ligações*. Paper presented at the JPEE 2006 : Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa. <http://hdl.handle.net/1822/6560>
- Branco, J. M., Santos, A. F. D., & Cruz, P. J. S. (2008). Asnas tradicionais de madeira: evolução, comportamento e reforço com materiais compósitos. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas Série II, nº 3*, pp. 5-18.
- Branco, J. M. C., P.J.S.; Piazza, M.; Varum, H. (2008). COMPORTAMENTO SEMI-RÍGIDO DE LIGAÇÕES TRADICIONAIS DE MADEIRA.
- Branco, J. M. G. (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 em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Costa, F. P. d. (1955). *Enciclopédia prática da construção civil*: FP da Costa.
- Cruz, H., & Palma, P. (2006). *Ligações em estruturas de madeira: para além dos pregos quadrados*. Paper presented at the QIC2006, Lisboa.
- ENV, N. (1995). 1-1: 1998: Eurocódigo 5-Projecto de estruturas de Madeira. *Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifícios*.
- Farinha, J. S. B., & dos Reis, A. C. (1998). *Tabelas Técnicas*: Edições Técnicas ETL.
- Madsen, B. (1998). Reliable timber connections. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1(3), 245-252.
- Mendes, P. M. F. d. C. (1994a). *Ligações em estruturas de madeira Tecnologia e dimensionamento de acordo com o EC5*.
- Mendes, P. M. F. d. C. (1994b). *Ligações em estruturas de madeira: tecnologia e dimensionamento de acordo com o EUROCÓDIGO 5*. Mestrado em Construções de Edifícios, Universidade do Porto.
- Palma, P., & Cruz, H. (2006). *Comportamento de ligações tradicionais em estruturas de madeira*. Paper presented at the 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa.
- Santos, V. D. R. (2009). *Avaliação do comportamento de asnas antigas de madeira de grande vão*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.

## ANEXO – A

Como em todos os trabalhos, foi efetuado um arquivo fotográfico, essas fotografias podem ajudar a entender, a resposta da madeira ao carregamento efetuado e perceber este estudo efetuado.



Arquivo fotográfico 1 - Armazenamento das asnas a ensaiair.



Arquivo fotográfico 2 - Atuadores aplicados na laje de ensaio.

Cont.



Arquivo fotográfico 3 – Ligações aos atuadores.



Arquivo fotográfico 4 - Bomba hidráulica.



Arquivo fotográfico 5 - Momento em carga.



Arquivo fotográfico 6 - Rotura total, ligação linha-perna.



Asna 3.



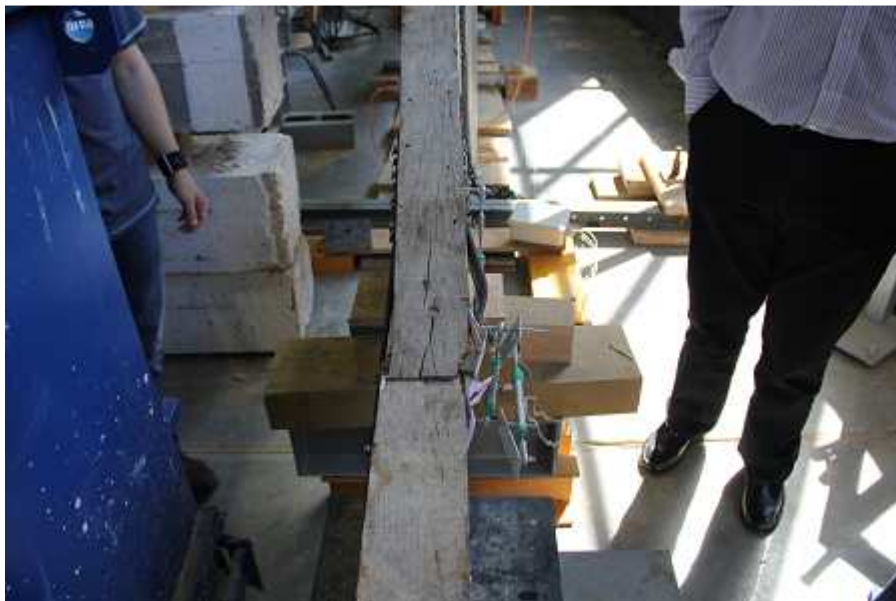
Arquivo fotográfico 7 – Intervenção na perna.



Arquivo fotográfico 8 - Esmagamento perna-linha.

ANEXO

Cont.



Arquivo fotográfico 9 - Momento de paragem do ensaio, encurvadura da chapa metálica.