



**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA**  
**INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO**



## **LIGAÇÕES TRADICIONAIS EM ESTRUTURA DE MADEIRA**

### **Avaliação experimental do seu comportamento mecânico**

**Pedro Manuel Coutinho Palma**

(Licenciado em Engenharia Civil, perfil de Estruturas)

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico no âmbito do protocolo de cooperação com o LNEC

Orientadora: Engenheira Helena Maria Pires Cruz (LNEC)  
Co-orientador: Professor João Paulo Janeiro Gomes Ferreira (IST)

#### **Júri**

Presidente: Professor José Manuel Matos Noronha da Câmara (IST)  
Vogais: Professor Augusto Martins Gomes (IST)  
Engenheira Helena Maria Pires Cruz (LNEC)  
Professor João Paulo Janeiro Gomes Ferreira (IST)

Julho de 2009



## **Agradecimentos**

Agradeço o financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia que, através do Projecto POCI/ECM/56552/2004, permitiu realizar a campanha experimental que deu origem a esta dissertação.

O trabalho apresentado nesta dissertação decorreu no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e, como qualquer campanha experimental, envolveu contribuições de inúmeras pessoas. Aos colegas do Núcleo de Estruturas de Madeira do LNEC agradeço o excepcional ambiente de trabalho, os valiosos ensinamentos e a disponibilidade que sempre demonstraram. Quero também mostrar a minha gratidão ao Núcleo de Sistema Mecânicos, do Centro de Instrumentação Científica do LNEC, em particular aos Eng.<sup>os</sup> Paulo Morais e Fernando Oliveira, e às Oficinas de Carpintaria e de Mecânica por me apoiarem muito para além da sua obrigação. Agradeço igualmente ao Laboratório de Ensaios de Comportamento de Estruturas, que ocupei durante largas temporadas.

Agradeço à Eng.<sup>a</sup> Helena Cruz a confiança que depositou em mim, a sua valiosa orientação científica e a sua motivação e ajuda sempre que trabalho experimental nos brindava com as suas vicissitudes. Ao Professor João Ferreira agradeço a disponibilidade, os proveitosos comentários e a revisão minuciosa deste trabalho.



## Resumo

Uma campanha experimental de ensaio de ligações estruturais em madeira foi conduzida no Núcleo de Estruturas de Madeira do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, para se avaliar o seu comportamento em rotação. Esta campanha incluiu doze situações de ensaio diferentes, englobando as configurações mais vulgares da ligação entre a perna e a linha observadas nas asnas tradicionais de suporte de coberturas em Portugal.

O comportamento mecânico das ligações (resistência, rigidez, ductilidade estática e modo de rotura) foi analisado em função da sua geometria (profundidade do entalhe e presença de respiga e mecha), presença de ligadores metálicos (esquadros ou braçadeira), teor em água e degradação biológica da madeira. Os resultados experimentais mostram que algumas configurações apresentam rigidez e resistência, em rotação, suficientes para ser consideradas na avaliação das estruturas a que pertencem, desenvolvendo a abordagem comum de as idealizar como rotuladas. O desempenho destas ligações é diferente conforme o sentido da rotação (abrir ou fechar o ângulo) e cada configuração mobiliza mecanismos resistentes específicos, que regem o comportamento exibido por cada tipologia.

O esforço axial de compressão da perna, para além de essencial para garantir a integridade de algumas das ligações (em particular na ausência de ligadores metálicos), também influencia amplamente o seu desempenho. Este aspecto exigiu uma configuração experimental complexa e o desenvolvimento de equipamento específico para simultaneamente comprimir e aplicar as rotações na perna.

*Palavras-chave:* madeira, estruturas, ligações, ligações com entalhes, dimensionamento, ensaios



## **Abstract**

An experimental campaign on traditional diagonal front notched timber joints was carried out, at the Timber Structures Division of the National Laboratory for Civil Engineering, in order to assess their rotational behaviour. This campaign included twelve different test conditions, comprising some of the most frequently observed configurations of the rafter and tie beam joint in Portuguese roof structures.

The joints' mechanical behaviour (rotational load carrying capacity, stiffness, static ductility and failure mode) was appraised with regard to their geometric parameters (notch depth and the presence of mortise and tenon), presence of metal fastening devices (stirrups or a clamp), moisture content and biological degradation of timber. The experimental results show that some configurations exhibit enough rotation stiffness and load bearing capacity to be accounted for when appraising the roof structures they belong to, enhancing the common assumption of hinged joints. The joint's response is different when opening or closing the skew angle and for each configuration there are specific load bearing mechanisms that dictate the different performances exhibited by each typology.

The compression internal force in the rafter, besides being crucial to maintain the integrity of some of these carpentry joints, also influences their performance. This aspect required a complex test apparatus and the design of specific equipment to simultaneously apply the compression force and the rotations in the rafter specimen.

*Key words:* timber, structures, joints, carpentry joints, design, testing





# Índice

<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Enquadramento</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Objectivo</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3 Metodologia</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4 Estrutura da dissertação</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Estado da arte</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Evolução histórica</b> .....	<b>5</b>
2.1.1 Estruturas de madeira .....	5
2.1.2 Ligações .....	6
<b>2.2 Tipologias de ligações</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3 Regras de dimensionamento</b> .....	<b>8</b>
2.3.1 Disposições geométricas .....	8
2.3.2 Modelos de cálculo .....	11
<b>2.4 Estudos anteriores</b> .....	<b>16</b>
2.4.1 Comportamento em compressão .....	16
2.4.2 Comportamento em rotação .....	21
2.4.2.1 Ligações sem ferragens .....	21
2.4.2.2 Ligações com ferragens .....	23

<b>3 Programa experimental .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Configurações ensaiadas .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2 Execução das ligações .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3 Equipamento de ensaio .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.1 Condições de ensaio .....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.2 Equipamento de ensaio .....</b>	<b>30</b>
3.3.2.1 Sistema para ensaio de ligações .....	30
3.3.2.2 Medições e verificações/calibrações .....	33
<b>3.3.3 Procedimento de ensaio .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4 Resultados .....</b>	<b>34</b>
<b>3.4.1 Definições .....</b>	<b>35</b>
3.4.1.1 Comportamento inicial ( $d_y$ , $F_y$ e $k_i$ ) .....	35
3.4.1.2 Rotura ( $d_u$ e $F_u$ ) .....	35
3.4.1.3 Ductilidade estática ( $D$ ) .....	36
3.4.1.4 Média e desvio padrão .....	36
<b>3.4.2 Ligações simples (sem ferragens e sem respiga) .....</b>	<b>36</b>
3.4.2.1 $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	36
3.4.2.2 $w = 12\%$ e $t_v = 30\text{ mm}$ .....	40
3.4.2.3 $w = 20\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	42
<b>3.4.3 Ligações com respiga .....</b>	<b>44</b>
3.4.3.1 $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	44
3.4.3.2 $w = 20\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	47
<b>3.4.4 Ligações com esquadros metálicos .....</b>	<b>49</b>
3.4.4.1 Esquadros aplicados antes de $N$ , $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	49
3.4.4.2 Esquadros aplicados após $N$ , $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	52
3.4.4.3 Esquadros aplicados antes de $N$ , $w = 20\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	55
<b>3.4.5 Ligações com braçadeira metálica .....</b>	<b>58</b>
3.4.5.1 Braçadeira aplicada antes de $N$ , $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	58
3.4.5.2 Braçadeira aplicada antes de $N$ , $w = 20\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	61
<b>3.4.6 Ligações simples (sem respiga nem ferragens) com degradação por caruncho pequeno .....</b>	<b>63</b>
3.4.6.1 $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$ .....	63
<b>4 Discussão dos resultados e aplicação de modelos existentes .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1 Discussão dos resultados .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.1 Ligações sem ferragens .....</b>	<b>67</b>
4.1.1.1 Efeito do teor em água .....	67
4.1.1.2 Efeito da profundidade do entalhe .....	68

4.1.1.3 Efeito da presença de respiga e mecha .....	69
4.1.1.4 Efeito da degradação por caruncho pequeno .....	70
<b>4.1.2 Ligações com ferragens .....</b>	<b>70</b>
4.1.2.1 Efeito da presença de esquadros .....	70
4.1.2.2 Efeitos da aplicação dos esquadros antes e depois de N .....	72
4.1.2.3 Comparação entre esquadros e braçadeira .....	73
<b>4.2 Aplicação de Modelos Existentes .....</b>	<b>75</b>
4.2.1 Abrir o ângulo .....	75
4.2.2 Fechar o ângulo .....	77
4.2.3 Considerações .....	79
<b>5 Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros .....</b>	<b>81</b>



## Índice de quadros

Quadro 2.1 - Resultados dos ensaios de Köhler e Heimeshoff (1989).....	16
Quadro 2.2 - Resultados dos ensaios de Feio (2006).....	17
Quadro 2.3 - Resultados dos ensaios de Faye (2007).....	19
Quadro 2.4 - Resultados dos ensaios de Koch e Schäfers (2008).....	20
Quadro 3.1 - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga), w = 12 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	37
Quadro 3.2 - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga), w = 12 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	38
Quadro 3.3 - Resultado do ensaio de ligação simples (sem ferragens e sem respiga) anteriormente ensaiada a abrir o ângulo, w = 12 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	39
Quadro 3.4 - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga), w = 12 % e tv = 30 mm, a abrir o ângulo.....	40
Quadro 3.5 - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga), w = 12 % e tv = 30 mm, a fechar o ângulo.....	41
Quadro 3.6 - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga), MC = 20 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	42
Quadro 3.7 - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga), w = 20 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	43
Quadro 3.8 - Resultados dos ensaios das ligações com respiga, w = 12 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	44
Quadro 3.9 - Resultados dos ensaios das ligações com respiga, w = 12 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	45
Quadro 3.10 - Resultados dos ensaios das ligações com respiga, w = 20 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	47
Quadro 3.11 - Resultados dos ensaios das ligações com respiga, w = 20 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	48
Quadro 3.12 - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados antes de N, w = 12 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	49
Quadro 3.13 - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, w = 12 % e	

tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	50
Quadro 3.14 - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados após N, w = 12 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	52
Quadro 3.15 - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados após N, w = 12 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	53
Quadro 3.16 - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados antes de N, w = 20 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	55
Quadro 3.17 - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados antes de N, w = 20 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	56
Quadro 3.18 - Resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica aplicada antes de N, w = 12 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	58
Quadro 3.19 - Resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica aplicada antes de N, w = 12 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	60
Quadro 3.20 - Resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica aplicada antes de N, w = 20 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	61
Quadro 3.21 - Resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica aplicada antes de N, w = 20 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	62
Quadro 3.22 - Resultados dos ensaios com ligações simples, com degradação por caruncho pequeno, w = 12 % e tv = 45 mm, a abrir o ângulo.....	63
Quadro 3.23 - Resultados dos ensaios com ligações simples, com degradação por caruncho pequeno, w = 12 % e tv = 45 mm, a fechar o ângulo.....	65
Quadro 4.1 - Estimativa do momento resistente $M_{max-,est}$ das configurações ensaiadas em função do valor médio da pressão do ar nas almofadas p.....	76
Quadro 4.2 - Momento máximo atingido nas ligações $M_{max+}$ [kNm] (valor médio dos três ensaios de cada configuração).....	76
Quadro 4.3 - Quociente entre a estimativa do momento resistente e o momento máximo obtido durante os ensaios $M_{max+,est} / M_{ma+}$ .....	76
Quadro 4.4 - Excentricidade $b_l$ entre a resultante das reacções no entalhe e o esforço axial na perna, em função da geometria e do atrito, para cada configuração de ensaio.....	78
Quadro 4.5 - Estimativa do momento resistente $M_{max-,est}$ das configurações ensaiadas em função do atrito (considerando os valores médios, para cada configuração, da pressão do ar nas almofadas p).....	78
Quadro 4.6 - Momento máximo atingido na ligação $M_{max-}$ (valor médio dos três ensaios de cada configuração).....	78
Quadro 4.7 - Quociente entre a estimativa do momento resistente e o momento máximo obtido durante os ensaios $M_{max-,est} / M_{max-}$ , em função do atrito.....	78

## Índice de figuras

Figura 2.1 - Possível evolução histórica das construções em madeira (Foliente 2000).....	5
Figura 2.2 - Ligações tradicionais (Cenci 1987).....	6
Figura 2.3 - Ligações tradicionais sem ferragens: a) ligação com dente simples; b) ligação com respiga e mecha.....	7
Figura 2.4 - Ligações com ferragens: a) esquadro; b) braçadeira.....	8
Figura 2.5 - Geometria da ligação com dente simples.....	9
Figura 2.6 - Geometria da ligação com dente recuado.....	10
Figura 2.7 - Geometria da ligação com dente duplo.....	10
Figura 2.8 - Desenhos antigos de ligações com respiga e mecha: a) (Cenci 1987); b) (Lóbez 1898).....	11
Figura 2.9 - Geometria da ligação com respiga.....	11
Figura 2.10 - Dimensionamento da ligação: superfícies de compressão e de corte. Adaptado de Guide des assemblages de charpente (2000).....	11
Figura 2.11 - Decomposição vectorial do esforço axial na perna para dimensionamento dos entalhes da ligação (Hirsi 2008).....	12
Figura 2.12 - Tensões de compressão nas superfícies do entalhe.....	13
Figura 2.13 - Superfície de corte no talão.....	14
Figura 2.14 - Excentricidade do apoio (Blass et al. 2004).....	15
Figura 2.15 - Esforços actuantes na ligação, segundo (Köhler e Heimeshoff 1989).....	15
Figura 2.16 - Modelação da ligação, segundo Blaß et al. (2004). Na primeira figura (Bild 8/74) a ligação posiciona-se sobre o eixo do elemento 1, enquanto que na segunda figura (Bild 8/75) isso não ocorre.....	15
Figura 2.17 - Configuração dos ensaios realizados por Köhler e Heimeshoff (1989).....	16
Figura 2.18 - Resultados e equipamento utilizado (Feio 2006).....	17
Figura 2.19 - Resultados e equipamento utilizado. Adaptado de (Thoma et al. 2007).....	18
Figura 2.20 - Exemplos de roturas (Faye 2007).....	19
Figura 2.21 - Geometria, equipamento e curvas de comportamento idealizadas. Adaptado de	

(Koch e Schäfers 2008).....	20
Figura 2.22 - Resistência à compressão de ligações com dentes simples (Ominaiskapasiteetti) de diferentes profundidades para diferentes ângulos de montagem (Liitoskulma) (Hirsi 2008).....	21
Figura 3.1 - Geometria das ligações com $tv = 45$ mm (dimensões em cm).....	25
Figura 3.2 - Geometria das ligações com $tv = 30$ mm (dimensões em cm).....	25
Figura 3.3 - Geometria das ligações com respiga (dimensões em cm).....	26
Figura 3.4 - Ligações na câmara de condicionamento.....	26
Figura 3.5 - Evolução do teor em água das peças de madeira para os ensaios com $w = 20$ %.....	26
Figura 3.6 - Configurações ensaiadas: ligações sem ferragens.....	28
Figura 3.7 - Configurações ensaiadas: ligações com esquadros metálicos.....	28
Figura 3.8 - Configurações ensaiadas: ligações com braçadeira metálica.....	28
Figura 3.9 - Configurações ensaiadas: ligações com degradação por caruncho pequeno (sem ferragens).....	29
Figura 3.10 - Pilhas de secagem.....	29
Figura 3.11 - Organização das peças por densidade, para posterior distribuição pelos lotes.....	29
Figura 3.12 - Distribuição da massa volúmica das peças de madeira ( $w = 12$ %)......	29
Figura 3.13 - Marcação das peças para corte dos entalhes.....	30
Figura 3.14 - Execução da mecha.....	30
Figura 3.15 - Peças finalizadas.....	30
Figura 3.16 - Ligações montadas.....	30
Figura 3.17 - Sistema de ensaio das ligações (adaptado do esquema original de F. Oliveira).....	31
Figura 3.18 - Circuito pneumático para aplicação da carga axial na perna (adaptado do esquema original de F. Oliveira).....	32
Figura 3.19 - Exemplo de curva F-d e respectiva curva bilinear.....	35
Figura 3.20 - Vista geral de um ensaio de uma ligação simples.....	36
Figura 3.21 - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga), $w = 12$ %, $tv = 45$ mm, ensaios a abrir o ângulo.....	37
Figura 3.22 - Sequência (ligação 1.3): a) início do ensaio ; b) durante o ensaio.....	37
Figura 3.23 - Pormenor (ligação 1.3): redução da área de contacto na face frontal do entalhe.....	37
Figura 3.24 - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga), $w = 12$ %, $tv = 45$ mm, ensaios a fechar o ângulo.....	38
Figura 3.25 - Sequência (ligação 2.2): a) início do ensaio ; b) durante o ensaio.....	38
Figura 3.26 - Pormenores (ligação 2.1): a) rotura por tracção perpendicular às fibras na face frontal do entalhe; b) esmagamento na zona posterior do entalhe.....	38
Figura 3.27 - Ligação simples (sem ferragens e sem respiga) anteriormente ensaiada a abrir o ângulo, $w = 12$ %, $tv = 45$ mm, ensaio a fechar o ângulo.....	39
Figura 3.28 - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga), $w = 12$ %, $tv = 30$ mm, ensaios a abrir o ângulo.....	40
Figura 3.29 - Sequência (ligação 31.2): a) início do ensaio ; b) fim o ensaio.....	40
Figura 3.30 - Pormenor (ligação 31.2): área de contacto, na face frontal do entalhe, vai-se reduzindo .....	40
Figura 3.31 - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga), $w = 12$ %, $tv = 30$ mm, ensaios a fechar o ângulo.....	41



Figura 3.32 - Sequência (ligação 32.3): a) início do ensaio ; b) fim o ensaio.....	41
Figura 3.33 - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga), w = 20 %, tv = 45 mm, ensaios a abrir o ângulo.....	42
Figura 3.34 - Sequência (ligação 4.2): a) início do ensaio ; b) fim o ensaio.....	42
Figura 3.35 - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga), w = 20 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo.....	43
Figura 3.36 - Sequência (ligação 5.1): a) início do ensaio ; b) fim o ensaio.....	43
Figura 3.37 - Pormenor (ligação 5.2): rotura localizada da madeira no fim do ensaio.....	43
Figura 3.38 - Vista geral de um ensaio de uma ligação com respiga.....	44
Figura 3.39 - Ligações com respiga, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a abrir o ângulo.....	44
Figura 3.40 - Sequência (ligação 13.2): a) início do ensaio ; b) fim do ensaio.....	45
Figura 3.41 - Pormenor (ligação ): área de contacto, na face frontal do entalhe, vai-se reduzindo (idêntico aos ensaios das ligações sem respiga).....	45
Figura 3.42 - Ligações com respiga, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo.....	45
Figura 3.43 - Sequência (ligação 14.3): a) início do ensaio ; b) fim do ensaio.....	46
Figura 3.44 - Pormenor (ligação 14.1): rotura da respiga por tracção perpendicular às fibras.....	46
Figura 3.45 - Ligações com respiga, MC = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo de ligações já anteriormente ensaiadas.....	46
Figura 3.46 - Ligações com respiga, w = 20 %, tv = 45 mm, ensaios a abrir o ângulo.....	47
Figura 3.47 - Pormenor (ligação 10.1): redução da área de contacto na face frontal do entalhe....	47
Figura 3.48 - Ligações com respiga, w = 20 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo.....	48
Figura 3.49 - Sequência (ligação 11.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	48
Figura 3.50 - Pormenor (ligação 11.1): rotura da respiga.....	48
Figura 3.51 - Vista geral de um ensaio de uma ligação com esquadros metálicos.....	49
Figura 3.52 - Ligações com esquadros metálicos aplicados antes de N, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a abrir o ângulo.....	49
Figura 3.53 - Sequência (ligação 16.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	50
Figura 3.54 - Pormenores (ligação 16.2): a) instabilização de uma barra do esquadro; b) rotura da soldadura.....	50
Figura 3.55 - Ligações com esquadros metálicos aplicados antes de N, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo.....	51
Figura 3.56 - Sequência (ligação 17.2): a) início do ensaio; b) durante o ensaio.....	51
Figura 3.57 - Pormenores: a) Esmagamento na parte posterior do entalhe (ligação 17.1); b) Deformação dos esquadros (ligação 17.2).....	51
Figura 3.58 - Ligações com esquadros metálicos aplicados após N, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a abrir o ângulo.....	52
Figura 3.59 - Sequência (ligação 7.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	53
Figura 3.60 - Pormenores (ligação 7.3): a) rotura da soldadura; b) área de contacto, na face frontal do entalhe, vai-se reduzindo (idêntico aos ensaios das ligações simples).....	53
Figura 3.61 - Ligações com esquadros metálicos aplicados após N, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo.....	54
Figura 3.62 - Sequência (ligação 8.3): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	54
Figura 3.63 - Pormenor (ligação 8.2): rotura do dente.....	54

Figura 3.64 - Ligações com esquadros metálicos aplicados antes de N, w = 20 %, tv = 45 mm, ensaios a abrir o ângulo.....	55
Figura 3.65 - Sequência (ligação 19.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	56
Figura 3.66 - Pormenores (ligação 19.2): a) folga entre as faces no entalhe; b) rotura da soldadura.....	56
Figura 3.67 - Ligações com esquadros metálicos aplicados antes de N, w = 20 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo.....	56
Figura 3.68 - Sequência (ligação 20.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	57
Figura 3.69 - Pormenor (ligação 20.3): folga entre as faces no entalhe.....	57
Figura 3.70 - Vista geral de um ensaio de uma ligação com braçadeira metálica.....	58
Figura 3.71 - Ligações com braçadeira metálica aplicada antes de N, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a abrir o ângulo.....	58
Figura 3.72 - Tensões de flexão num elemento de secção variável.....	59
Figura 3.73 - Diagrama de corpo livre da perna, quando o ângulo tende a abrir, e exemplo de um padrão de rotura.....	59
Figura 3.74 - Sequência (ligação 25.1): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	59
Figura 3.75 - Pormenores: a) rotura da ligação 25.1; b) rotura da ligação 25.2; c) rotura da ligação 25.3.....	59
Figura 3.76 - Ligações com braçadeira metálica aplicada antes de N, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo.....	60
Figura 3.77 - Diagrama de corpo livre da perna, nos ensaios de fechar o ângulo.....	60
Figura 3.78 - Sequência (ligação ): a) início do ensaio; b) durante o ensaio.....	61
Figura 3.79 - Pormenores: a) perda de contacto na face frontal do entalhe; b) esmagamento da madeira sob a chapa espessa; c) instabilização lateral da perna.....	61
Figura 3.80 - Ligações com braçadeira metálica aplicadas antes de N, w = 20 %, tv = 45 mm, ensaios a abrir o ângulo.....	62
Figura 3.81 - Ligações com braçadeira metálica aplicada antes de N, w = 20 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo.....	62
Figura 3.82 - Sequência (ligação 29.1): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	63
Figura 3.83 - Pormenores (ligação 29.1): a) esmagamento sob a chapa espessa; b) esmagamento na parte posterior do entalhe.....	63
Figura 3.84 - Ligações simples, com degradação por caruncho pequeno, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a abrir o ângulo.....	64
Figura 3.85 - Sequência (ligação 34.1): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	64
Figura 3.86 - Pormenor (ligação 34.3): área de contacto, na face frontal do entalhe, vai-se reduzindo (idêntico aos outros ensaios com tv = 45 mm).....	64
Figura 3.87 - Ligações simples, com degradação por caruncho pequeno, w = 12 %, tv = 45 mm, ensaios a fechar o ângulo.....	65
Figura 3.88 - Sequência (ligação 35.1): a) início do ensaio; b) fim do ensaio.....	65
Figura 3.89 - Pormenor (ligação 35.2): rotura, por tracção perpendicular, do troço da linha após o entalhe.....	65
Figura 4.1 - Ligações simples: efeito do teor em água.....	67
Figura 4.2 - Ligações simples: efeito da profundidade do entalhe, madeira com w = 12 % .....	68
Figura 4.3 - Ligações sem ferragens: efeito da respiga, madeira com w = 12 %.....	69
Figura 4.4 - Ligações sem ferragens: efeito da respiga, madeira com w = 20 %.....	69

Figura 4.5 - Ligações sem ferragens: efeito da degradação por caruncho pequeno.....	70
Figura 4.6 - Ligações com ferragens: efeito dos esquadros, madeira com $w = 12\%$ .....	71
Figura 4.7 - Ligações com ferragens: efeito dos esquadros, madeira com $w = 20\%$ .....	71
Figura 4.8 - Ligações com ferragens: efeitos da aplicação dos esquadros antes e depois de N....	72
Figura 4.9 - Ligações com ferragens: esquadros aplicados antes de N e braçadeiras, madeira com $w = 12\%$ .....	74
Figura 4.10 - Ligações com ferragens: esquadros aplicados antes de N e braçadeiras, madeira com $w = 20\%$ .....	75
Figura 4.11 - Estados limite: a) no sentido de abrir o ângulo; b) no sentido de fechar o ângulo.....	75



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

As ligações em estruturas antigas de madeira, designadamente em estruturas de cobertura, são geralmente realizadas através de entalhes nos elementos, onde as tensões são transmitidas por compressão ou por atrito entre as superfícies em contacto. Nalguns casos as ligações apresentam entalhes do tipo macho-fêmea (designados por “respiga e mecha”) para facilitar o posicionamento dos elementos durante a construção e para prevenir deslocamentos para fora do plano da asna em serviço. Em estruturas mais recentes, principalmente a partir do século XIX, o aumento da complexidade das tipologias estruturais e a industrialização dos processos construtivos (mecanização e produção em massa) conduziram à utilização generalizada de peças metálicas nas ligações estruturais, impelindo a utilização de ligações mecânicas modernas, que substituíram quase integralmente as ligações com entalhes ou “tradicionais”, remetendo-as para utilizações muito pontuais. De qualquer modo, as ligações tradicionais estão ainda presentes em inúmeras estruturas, algumas das quais fazem parte do património histórico e arquitectónico português, pois caracterizam o estado de desenvolvimento tecnológico do seu tempo relativamente à concepção estrutural, às técnicas de construção e ao conhecimento do comportamento da madeira, marcando distintamente a percepção que se tem do nível tecnológico da estrutura que integram.

Actualmente são cada vez maiores as exigências relativas às intervenções de restauro ou reforço de estruturas antigas de madeira, em termos de profundidade da intervenção, das suas consequências, da sua reversibilidade, dos materiais aplicados e do nível de segurança que se pretende estabelecer. Acresce ainda que as recentes recomendações internacionais relativas a estas intervenções encaminham para a manutenção, sempre que possível, do comportamento estrutural original, que, como foi referido, também faz parte do património histórico e tecnológico, e é fortemente dependente das ligações estruturais (ICOMOS 1999; UNI 11138:2004). A satisfação

destes requisitos requer que cada vez mais se desenvolva o conhecimento actual sobre o comportamento destas estruturas antigas, sendo importante a sua análise detalhada para se observar como certas configurações estruturais, materiais, disposições construtivas, adição de reforços, manutenção (ou falta dela), interagiram com as acções mecânicas, biológicas e ambientais que actuaram sobre a estrutura.

As orientações no sentido de manutenção do comportamento estrutural original não devem ser encaradas como dogmas, nem ser interpretadas como garantias de que um desempenho adequado no passado implique um nível de segurança adequado para o futuro, simplesmente porque a estrutura “sobreviveu” até aos nossos dias. De facto, mesmo a cópia fiel da estrutura original nem sempre é garantia de qualidade, uma vez que muitas estruturas antigas apresentam erros de concepção estrutural, pormenorização e execução, que são apenas compensados pelos excessos na quantidade de material aplicado, nalguma redundância estrutural e, por vezes, na excepcional qualidade da madeira utilizada, que fornecem à estrutura a capacidade de carga adicional que lhe permitiu manter-se em serviço.

Dado que a avaliação de estruturas antigas de madeira implica a apreciação das propriedades mecânicas dos elementos e das ligações, o aprofundar do conhecimento relativo ao seu comportamento mecânico reveste-se de grande importância, sendo necessário estabelecer os parâmetros que mais o influenciam e adoptar modelos de comportamento adequados para as ligações tradicionais com entalhes, com e sem ferragens e considerando diferentes técnicas de reforço, antigas e actuais. Trabalhos recentes demonstraram que as ligações tradicionais apresentam geralmente uma rigidez e capacidade resistente em rotação consideráveis, comportando-se como ligações semi-rígidas, mesmo nalguns casos sem elementos metálicos. Os métodos de dimensionamento disponíveis focam apenas a transmissão de forças axiais e de corte entre elementos, desprezando o comportamento momento-rotação destas ligações, que pode ter uma influência significativa no comportamento estrutural global.

Actualmente nalguns países europeus tem havido um interesse crescente por parte dos arquitectos e dos donos de obra na utilização de ligações tradicionais em estruturas novas. A actual facilidade de maquinar os entalhes com rigor, através da utilização de programas de desenho assistido por computador com capacidade de modelação tridimensional e de equipamento para execução de elementos estruturais em madeira por controlo numérico computadorizado (nalguns casos com tolerâncias de aproximadamente 0,2 mm) (Hirst et al. 2008), a redução substancial do consumo de elementos metálicos e a estética ímpar de uma estrutura com este tipo de ligações permitem que a execução de ligações com entalhes seja competitiva e explicam em parte o seu reaparecimento.

Este renovado interesse nas ligações tradicionais motivou o desenvolvimento de vários projectos de investigação sobre o tema, esperando-se que possam conduzir a recomendações para quem as quer especificar ou avaliar. A médio prazo, pretende-se que este conhecimento apoie os

códigos que orientam a avaliação de estruturas antigas em serviço (que não vigoram em Portugal, mas que existem noutros países) ou integre novas versões dos actuais regulamentos estruturais.

Nesta dissertação apresentam-se e analisam-se alguns dos resultados experimentais obtidos no âmbito do Projecto POCI/ECM/56552/2004 - Influência da rigidez das ligações no comportamento estático e dinâmico das estruturas de madeira: consequências de diferentes técnicas de reforço.

Os resultados desta extensa campanha experimental mostram que o comportamento mecânico das ligações tradicionais com entalhes dependem das tensões de compressão nas superfícies dos entalhes, da geometria dos entalhes, da presença/ausência de elementos metálicos e do teor em água.

## **1.2 Objectivo**

O objectivo desta dissertação é a caracterização do comportamento mecânico de ligações tradicionais em estruturas de madeira e, em particular, a determinação dos parâmetros geométricos, tecnológicos e ambientais que mais influenciam o seu desempenho.

## **1.3 Metodologia**

A metodologia adoptada para atingir os objectivos enunciados consistiu em:

- compilação de elementos bibliográficos sobre estruturas de madeira: tipologias, comportamento, dimensionamento, degradação e reforço;
- definição de casos de estudo e do programa experimental para avaliação do comportamento de diversas tipologias de ligações;
- realização e condicionamento de protótipos e concepção do equipamento de ensaio;
- ensaios para avaliação do comportamento das ligações, englobando os diversos parâmetros estudados;
- estabelecimento de modelos de comportamento de ligações, nas condições de serviço, e identificação dos parâmetros mais influentes;
- verificação da adequabilidade dos modelos existentes para prever a resistência das ligações.

## **1.4 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está organizada em três capítulos principais onde se apresentam, respectivamente, o estado da arte relativo ao comportamento de ligações tradicionais (Cap. 2), a campanha de ensaios realizada e os resultados obtidos (Cap. 3) e, para finalizar, a análise comparativa dos resultados e a aplicação de modelos existentes às tipologias analisadas

(Cap. 4.2).

No Capítulo 2 é apresentada uma descrição sumária da evolução histórica das estruturas de madeira e as principais tipologias de ligações presentes nas estruturas antigas em serviço (capítulos 2.1 e 2.2). São também descritas as metodologias de verificação da segurança e as disposições geométricas relativas às ligações tradicionais presentes na bibliografia especializada, enquadrando cada expressão apresentada com os respectivos modelos subjacentes, de modo a identificar claramente o seu âmbito de aplicação (capítulo 2.3). Finalmente, no capítulo 2.4, são apresentados e analisados os estudos já realizados, ou ainda em curso, relativos ao comportamento mecânico de ligações tradicionais.

O Capítulo 3, relativo ao programa experimental, subdivide-se em três partes. Na primeira parte são apresentadas as configurações ensaiadas e a preparação dos protótipos (capítulos 3.1 e 3.2), na segunda parte é apresentado o equipamento de ensaio desenvolvido especificamente para esta campanha experimental (capítulo 3.3) e na terceira e última parte são apresentadas as análises individuais dos resultados dos ensaios (capítulo 3.4).

Na terceira parte da dissertação (capítulo 4.1) são comparados os desempenhos das várias tipologias e aplicados modelos existentes para estimar a resistência de ligações tradicionais com entalhes às ligações ensaiadas (capítulo 4.2), sendo os resultados assim obtidos comparados com os resultados dos ensaios.

A dissertação termina com um pequeno capítulo onde são apresentadas sumariamente as principais observações e conclusões decorrentes da campanha experimental, analisadas em pormenor nos capítulos anteriores.



## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Evolução histórica

#### 2.1.1 Estruturas de madeira

A madeira é porventura o material de construção mais antigo utilizado por quase todas as sociedades, tendo sido aplicada em estruturas de suporte de coberturas desde as primeiras construções. As aplicações estruturais mais antigas, inicialmente condicionadas pela espécie e dimensão das árvores disponíveis e pelos utensílios rudimentares disponíveis para as trabalhar, seriam simples vigas horizontais ou elementos inclinados em torno de um prumo central (Foliente 2000). A combinação destas tipologias mais simples, aliada ao desenvolvimento da capacidade de forjar ferramentas mais resistentes e precisas (iniciada na Idade do Ferro) adequadas à preparação dos elementos estruturais, conduziu ao surgimento de construções cada vez mais complexas. Apesar do desenvolvimento tecnológico, alguns elementos estruturais, em particular os elementos curvos, continuaram a ser obtidos recorrendo à curvatura natural do tronco e ramos principais das árvores donde provinham.



**Figura 2.1** - Possível evolução histórica das construções em madeira (Foliente 2000)

O trabalho de sistematização destas formas é consequência de uma abordagem empírica, baseada num conhecimento prático do material e na experiência dos construtores. As formas e as ligações eram, bem ou mal, baseadas noutras já existentes, ajustando-se a sua geometria à

escala da estrutura (Chilton 1995). Relativamente às estruturas de suporte das coberturas, tal como as conhecemos hoje, durante o Renascimento estavam já estabelecidas as bases do conhecimento sobre o seu funcionamento estrutural o que é evidenciado pelas ilustrações de Andrea Palladio (Palladio 2002), entre outros. Estas ilustrações, em particular a pormenorização das ligações, revelam já um conhecimento muito aproximado das forças actuantes e do modo de as transmitir entre os elementos estruturais.

No século XIX surgem os primeiros esboços da abordagem actual, analítica e experimental, que congrega métodos matemáticos (geométricos e/ou analíticos) de análise estrutural com ensaios de caracterização do material. Este procedimento de análise e dimensionamento estrutural, baseado num conhecimento científico do comportamento das estruturas e do material, abriu extraordinárias possibilidades em termos de formas estruturais.

Actualmente, o dimensionamento das estruturas de madeira é feito com base em modernos códigos estruturais, a durabilidade das madeiras está caracterizada e pode ser melhorada e há um amplo conjunto de normativo que permite especificar estes e outros aspectos, de modo a garantir um desempenho adequado das estruturas de madeira.

### 2.1.2 Ligações

As ligações tradicionais em estruturas de madeira são geralmente variantes das ligações do tipo respiga e mecha (Figura 2.2, (Cenci 1987)), que se caracterizam pelos entalhes que permitem o encaixe dos elementos estruturais. Os arqueólogos dataram as primeiras ligações conhecidas deste tipo a cerca de 200 A.C., no Extremo Oriente e na Europa, sendo plausível que tenham surgido com a divulgação de utensílios metálicos que facilitassem a sua execução (Sandberg et al. 2000).

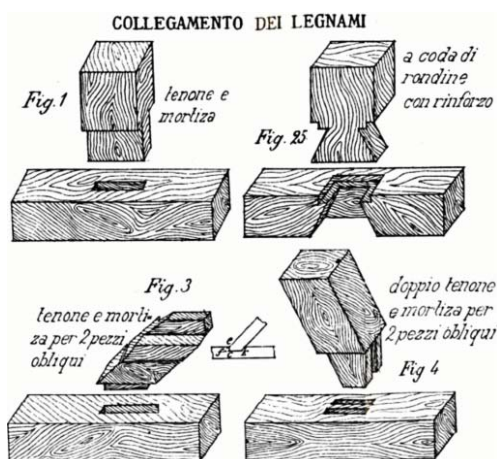


Figura 2.2 - Ligações tradicionais (Cenci 1987)

As ligações sem cavilhas, metálicas ou de madeira, estão limitadas à transmissão de esforços de compressão e de corte, transmitidos principalmente através do contacto directo entre os elementos nas faces dos entalhes e dentro de cada peça através da mobilização de superfícies sujeitas a tensões de compressão (com maior ou menor ângulo em relação às fibras), de corte e

de tracção (paralela ou perpendicularmente às fibras). A utilização de elementos do tipo cavilha, de madeira ou metálicos, nas ligações tradicionais aumentou a complexidade da sua realização, mas permitiu acomodar mais facilmente esforços de tracção, fomentando o surgimento de novas formas estruturais.

A ligação entre a linha e a perna das asnas de cobertura é onde actuam as maiores forças pontuais na estrutura. A realização desta ligação através de um entalhe na face superior da linha é muito comum, apresentando por vezes dispositivos para impedir o desencaixe das peças e, apesar das alterações introduzidas pelo desenvolvimento tecnológico relativamente à concepção estrutural, às técnicas de construção e ao conhecimento do comportamento da madeira, as ligações com entalhes são muito comuns nas estruturas dos últimos três séculos.

## 2.2 Tipologias de ligações

A ligação entre a linha e a perna, através de um entalhe na face superior da linha (Figura 2.3), resolve a necessidade de unir, em ângulo e no mesmo plano, estes dois elementos, de modo a transmitir a componente horizontal da compressão da perna para a linha, libertando os apoios destes impulsos horizontais. A concepção desta ligação implica, se não houver dispositivos que impeçam o desencaixe das peças, que as pernas têm de apresentar sempre um nível de compressão adequado para manter a integridade da ligação.

Existem três tipos distintos de geometria para esta ligação: dente simples (mais vulgar) (Figura 2.5), dente recuado (Figura 2.6) e dente duplo (Figura 2.7).



**Figura 2.3** - Ligações tradicionais sem ferragens: a) ligação com dente simples; b) ligação com respiga e mecha

Originalmente o objectivo das ferragens (Figura 2.4), tal como o da respiga, era impedir os deslocamentos para fora do plano da asna. Actualmente pretende-se que estas peças também evitem as consequências negativas de uma eventual redução da compressão na perna, fornecendo simultaneamente uma adequada capacidade de dissipação de energia. Em zonas sísmicas as ferragens, para além de evitarem a eventual separação das peças, ajudam a manter um comportamento mais estável para as acções cíclicas. O EC8 (prEN 1998-1:2003) estipula que estas ligações, aí designadas por *carpentry joints*, devem ser concebidas de modo a impedir que as peças se separem.

Os três tipos de ferragens mais comuns são um parafuso interior ligando a perna e a linha (geralmente colocado perpendicularmente a um destes elementos), esquadros metálicos (paralelos aos elementos estruturais, soldados entre si e aparafusados à madeira) e uma braçadeira metálica (que funciona como um grampo, envolvendo os elementos de madeira).



**Figura 2.4** - Ligações com ferragens: a) esquadro; b) braçadeira

Os eventuais reforços, no âmbito de intervenções subsequentes à estrutura, devem melhorar o comportamento da ligação em termos de resistência e ductilidade, sem alterar significativamente o seu funcionamento original, em particular a rigidez (UNI 11138:2004). A rigidificação completa da ligação fica reservada a casos extremos de degradação, pois conduz a uma distribuição de esforços na estrutura distinta da concebida originalmente. Na base da escolha de um determinado tipo de reforço deve estar o verdadeiro modo de rotura, que nem sempre é fácil de determinar com base em análises simplistas da estrutura e/ou da ligação (Senno e Piazza 2003).

## 2.3 Regras de dimensionamento

São abundantes as regras empíricas relativas ao dimensionamento destas ligações, mas poucas as justificações apresentadas para a sua consideração.

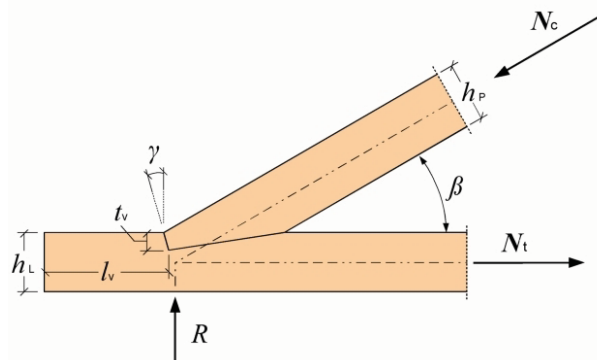
Nas asnas tradicionais de madeira, geralmente aborda-se a ligação entre a perna e linha como rotulada, pelo que as forças que concorrem na ligação são a de compressão na perna, a de tracção na linha e a reacção do apoio. Deste modo, admite-se que a ligação não tem rigidez de rotação suficiente para transmitir momentos flectores entre elementos adjacentes e os métodos de verificação da segurança vulgarmente apresentados na bibliografia consistem em decompor vectorialmente a força de compressão na perna e comparar cada componente com o mecanismo resistente adequado, mobilizado no entalhe. Alguns destes aspectos foram já analisados por Palma e Cruz (2006, 2007).

### 2.3.1 Disposições geométricas

Nas **ligações com dente simples** (Figura 2.5) as disposições apresentadas na bibliografia prendem-se com a profundidade do entalhe e o comprimento do talão (troço da linha entre o entalhe e o topo do elemento). Segundo vários autores (SE-M 2006; Ehlbeck 1995; Götz et al. 1983), a profundidade do entalhe  $t_v$  deve respeitar os limites apresentados nas expressões (2.1), podendo-se interpolar linearmente para ângulos intermédios.

$$t_v \leq \begin{cases} h/4 & ; \text{ se } \beta \leq 50^\circ \\ h/6 & ; \text{ se } \beta > 60^\circ \end{cases} \quad (2.1)$$

Estas disposições devem-se ao facto de quanto menor for o ângulo  $\beta$ , maior será a componente da compressão da perna transmitida através do entalhe frontal e maior o entalhe necessário para transmitir essa compressão, implicando uma redução severa da secção transversal da linha, sendo necessário limitar a sua profundidade.



**Figura 2.5** - Geometria da ligação com dente simples

Ao talão são atribuídos comprimentos mínimos que variam entre  $l_v = 15$  cm (SE-M 2006), 20 cm (Matana 2003) e um mínimo de  $8 \cdot t_v$  (Ehlbeck 1999; Hirsi 2008). Estas restrições servem para garantir que neste troço há uma superfície de dimensão adequada para acomodar as tensões de corte paralelo às fibras (responsáveis por roturas frágeis da madeira) que aí ocorrem.

As designações  $t_v$  e  $l_v$ , actualmente consagradas para caracterizar a geometria do entalhe, têm origem na literatura germânica (Köhler e Heimeshoff 1989) e são diminutivos de *versatztiefe* (profundidade do entalhe) e *vorholtzlänge* (comprimento de madeira antes do entalhe), respectivamente.

O ângulo  $\gamma$  da superfície frontal do entalhe é geralmente apresentado como sendo igual a  $\beta/2$ . Esta assunção visa otimizar a ligação para o caso em que tanto a linha como a perna são do mesmo material, o que é expectável, pois deste modo o ângulo entre as tensões transmitidas no entalhe e as fibras da madeira é igual nos dois elementos (Pierce et al. 2005).

Nas **ligações com um dente recuado** (Figura 2.6), a superfície de corte paralelo às fibras  $l_v$  mobilizável é maior. Ehlbeck (1995) recomenda que o entalhe seja perpendicular ao eixo da perna para facilitar a execução das peças, embora deste modo o ângulo das tensões de compressão com as fibras na linha seja maior (o que implica uma menor resistência e rigidez). Neste tipo de ligação deve haver uma folga de 1 a 2 mm entre a face superior da linha e a perna, para evitar fissuração decorrente de eventuais tensões na perna perpendiculares às fibras (Piazza e Tomasi 2004).

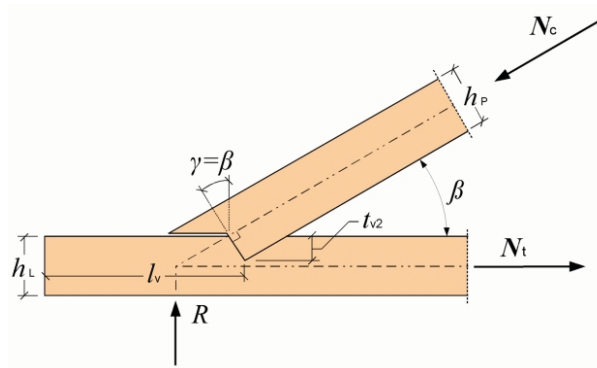


Figura 2.6 - Geometria da ligação com dente recuado

As **ligações com dente duplo** (Figura 2.7) têm a vantagem de permitir reduzir as tensões de compressão em cada entalhe e mobilizar uma área maior para o corte paralelo às fibras. No entanto, a sua execução requer uma precisão muito maior para se garantir um bom contacto entre todas as superfícies. Observam-se algumas vezes ligações deste tipo quando esta zona da perna é constituída por dois elementos sobrepostos, tendo cada um deles um dente simples.

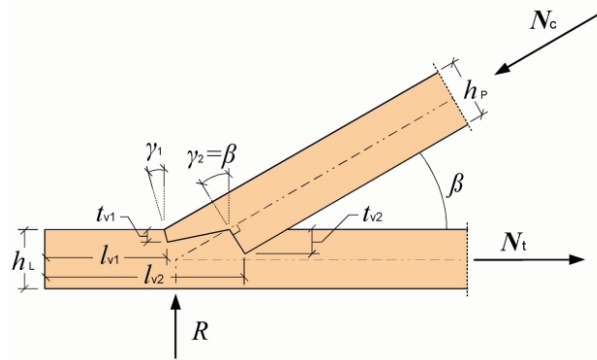


Figura 2.7 - Geometria da ligação com dente duplo

As duas superfícies de corte devem estar suficientemente afastadas, respeitando as seguintes condições (Ehlbeck 1995):

$$t_{v1} \leq \begin{cases} t_{v2} - 10\text{mm} \\ 0,8 \cdot t_{v2} \end{cases} \quad (2.2)$$

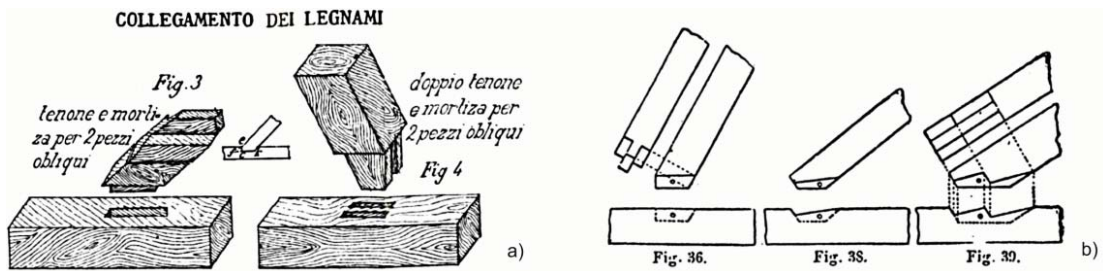
Independentemente do ângulo  $\beta$ , para um entalhe com dente duplo, Götz et al. (1983) e o SE-M (2006) recomendam as seguintes profundidades máximas dos entalhes  $t_{v1}$  e  $t_{v2}$ :

$$\begin{cases} t_{v1} \leq h/6 \\ t_{v2} \leq h/4 \end{cases} \quad (2.3)$$

Neste caso, SE-M (2006) estipula um comprimento mínimo  $l_{v1}$  de 15 cm.

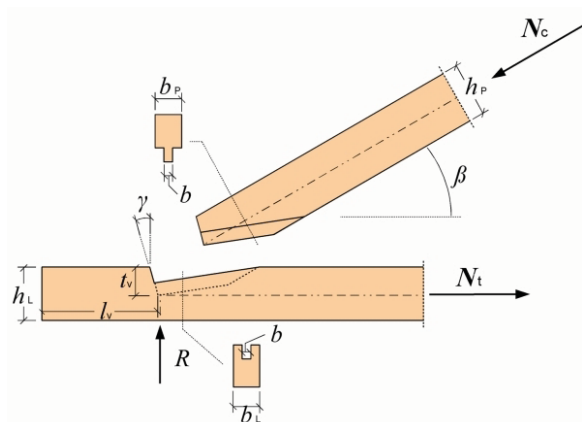
Sobre as **dimensões e forma da respiga** há inúmeras soluções (Figuras 2.2 e 2.8), mas praticamente em nenhum caso são explicitados os critérios que conduzem às geometrias representadas. Segundo Feio (2006), a sua largura  $b$  deve ser cerca de 1/3 da espessura da peça de madeira, o que corresponde ao geralmente observado nas estruturas existentes, e que a largura da mecha (onde se introduz a respiga) deve ser igual à da respiga.





**Figura 2.8** - Desenhos antigos de ligações com respiga e mecha: a) (Cenci 1987); b) (Lóbez 1898)

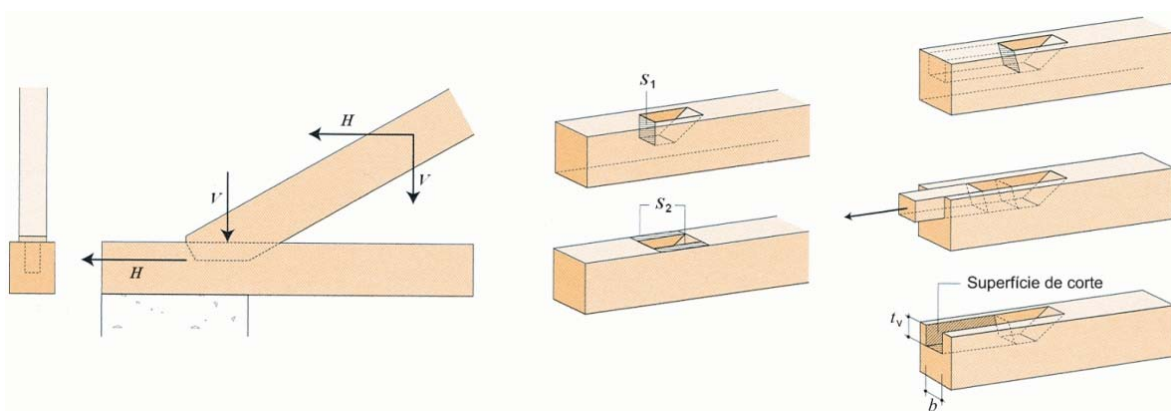
Ensaios realizados em ligações viga-pilar do tipo respiga e mecha com cavilhas de madeira Malhotra e Jin (1989) e Shanks e Walker (2005) observaram que o ajustamento da respiga e da mecha tem uma grande importância na resistência e na rigidez da ligação, tanto em flexão como em corte.



**Figura 2.9** - Geometria da ligação com respiga

### 2.3.2 Modelos de cálculo

A bibliografia francesa (*Guide des assemblages de charpente* 2000; U.T.I. 1998) sugere a decomposição do esforço normal na perna em duas componentes, horizontal e vertical, e a verificação ao esmagamento e ao corte em superfícies perpendiculares e paralelas, respectivamente.



**Figura 2.10** - Dimensionamento da ligação: superfícies de compressão e de corte. Adaptado de *Guide des assemblages de charpente* (2000)

Relativamente à **compressão da madeira**, este método em vez de considerar a actuação de tensões de compressão com um determinado ângulo em relação à orientação das fibras, considera que a componente vertical actua perpendicularmente às fibras da linha e que a componente horizontal actua paralelamente, na linha.

$$\begin{cases} \sigma_{c,0,d} = \frac{H}{S_1} \leq f_{c,0,d} \\ \sigma_{c,90,d} = \frac{V}{S_2} \leq f_{c,90,d} \end{cases} \quad (2.4)$$

A verificação da rotura por **corte paralelo às fibras** considera apenas a componente horizontal do esforço axial na perna:

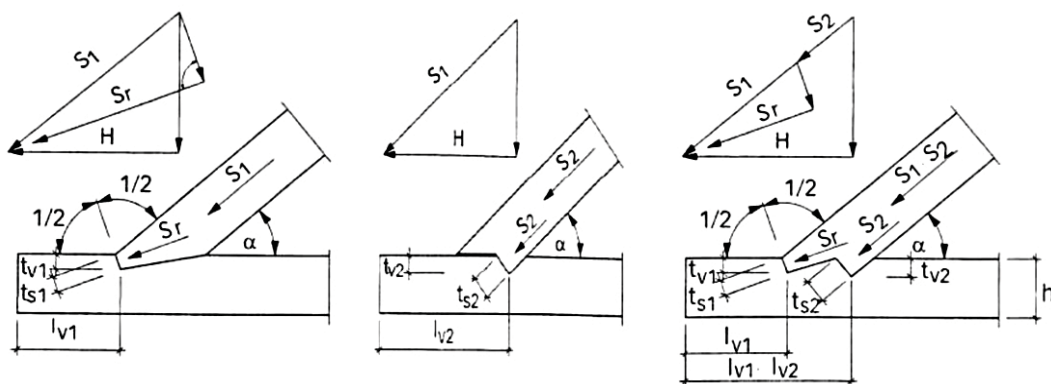
$$\tau_d = \frac{H}{b_{ef} \times l_v} \leq f_{v,d} \quad (2.5)$$

em que  $b_{ef}$  é definido como (Racher 2007)

$$b_{ef} = \begin{cases} b & ; \text{se } b_L - b < 2t_v \\ b + 2t_v & ; \text{se } b_L - b \geq 2t_v \end{cases} \quad (2.6)$$

Nas expressões anteriores as variáveis têm o significado apresentado nas Figuras 2.9 e 2.10,  $f_{c,0,d}$  e  $f_{c,90,d}$  são as resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, respectivamente, a considerar no dimensionamento (os respectivos valores característicos são  $f_{c,0,k} = 16$  a 34 MPa e  $f_{c,90,k} = 2$  a 13 MPa, consoante a classe de resistência da madeira) e  $f_{v,d}$  é a resistência ao corte a considerar no dimensionamento (o seu valor característico  $f_{v,k}$  assume valores entre 1,7 e 3,8 MPa).

A abordagem actualmente mais disseminada consiste numa verificação semelhante, mas considerando a resistência da madeira ao esmagamento por compressão em ângulo com as fibras (Köhler e Heimeshoff 1989; Ehlbeck 1995, 1999; Blass et al. 2004; SE-M 2006; Racher 2007; Hirsi 2008).

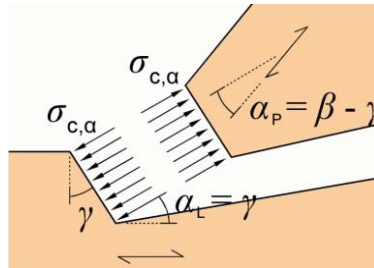


**Figura 2.11** - Decomposição vectorial do esforço axial na perna para dimensionamento dos entalhes da ligação (Hirsi 2008)



O procedimento adoptado consiste em definir os caminhos de transmissão de tensões entre peças, decompondo as forças em componentes perpendiculares às superfícies dos entalhes (Figura 2.17), determinando as tensões de compressão actuantes  $\sigma_{c,\alpha,d}$ , e definindo superfícies de corte paralelo às fibras que garantam a capacidade do elemento de acomodar essas tensões.

No modo de rotura por **esmagamento da superfície frontal do entalhe** (Figura 2.12), as tensões de compressão da perna concentram-se nesta área, actuando com um determinado ângulo em relação às fibras da madeira na linha  $\alpha_L$  e na perna  $\alpha_p$ .



**Figura 2.12** - Tensões de compressão nas superfícies do entalhe

Considerando a componente perpendicular à superfície do entalhe da força de compressão da perna e admitindo uma distribuição uniforme de tensões, obtém-se uma tensão actuante, tanto na linha como na perna, dada por (2.7)

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_{c,d} \cdot \cos(\beta - \gamma)}{\frac{t_v}{\cos(\gamma)} \cdot b} \quad (2.7)$$

Nesta situação há um dos elementos que é solicitado com um ângulo mais desfavorável (maior) em relação às fibras da madeira, ( $\alpha_L = \gamma$  no caso da linha e  $\alpha_p = \beta - \gamma$  no caso da perna).

Se ambos os elementos forem do mesmo material, o que é expectável para a maioria das situações, o ângulo  $\gamma$ , entre a superfície frontal do entalhe e a vertical, deve ser igual a  $\beta/2$ , pois assim o ângulo entre as compressões transmitidas no entalhe e as fibras da madeira é igual nos dois elementos. Neste caso, a expressão anterior simplifica-se para 2.8

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_{c,d} \cdot \cos^2(\beta/2)}{t_v} \cdot b \quad (2.8)$$

Em qualquer dos casos há que comparar com a resistência à compressão num determinado ângulo com as fibras. Segundo o EC5 (EN 1995-1-1:2004), esta deve ser determinada através da fórmula de Hankinson (2.9).

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2(\alpha) + \cos^2(\alpha)} \quad (2.9)$$

Nas expressões anteriores as variáveis têm o significado apresentado nas Figuras 2.5 a 2.7, 2.9 e 2.12,  $f_{c,0,d}$  e  $f_{c,90,d}$  são as resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, respectivamente, e  $k_{c,90}$  deve ser, neste caso, considerado igual à unidade (EN 1995-1-1:2004/A1).

A regulamentação espanhola (SE-M 2006) considera para este modo de rotura uma redução de 20 % do valor de  $f_{c,0,d}$ .

No caso de uma ligação com dente duplo (Figura 2.7), SE-M (2006) permite que a verificação ao esmagamento se faça considerando uma profundidade do entalhe  $t = t_{v1} + t_{v2}$ , bem como um ângulo  $\alpha$  intermédio entre os dos dois entalhes ( $\alpha = 3/4 \beta$ ), o que é discutível face à dificuldade de garantir um contacto perfeito nas duas superfícies.

O outro modo de rotura, por **corte paralelo às fibras** (Figura 2.13), deve-se à forma como as tensões são transmitidas da perna para a linha. Após a transmissão, por contacto, do esforço de compressão da perna para a linha, a transição da sua componente horizontal para tracção na linha é feita através das tensões tangenciais. Esta rotura é geralmente verificada comparando a componente horizontal da compressão na perna, igual à tracção na linha, com as tensões tangenciais paralelas às fibras que se conseguem mobilizar no talão (num plano entre o topo da linha e o início do entalhe) (2.10).

$$\tau_d = \frac{N_{c,d} \cdot \cos(\beta)}{b_{ef} \cdot l_v} \leq f_{v,d} \quad (2.10)$$

Na expressão anterior,  $f_{v,d}$  é a resistência ao corte a considerar no dimensionamento (EN 1995-1-1:2004) (o seu valor característico  $f_{v,k}$  assume valores entre 1,7 e 3,8 MPa, dependendo da espécie e qualidade da madeira) e  $b_{ef}$  é definido pela expressão (2.6). As restantes variáveis têm o significado representado na Figura 2.9.

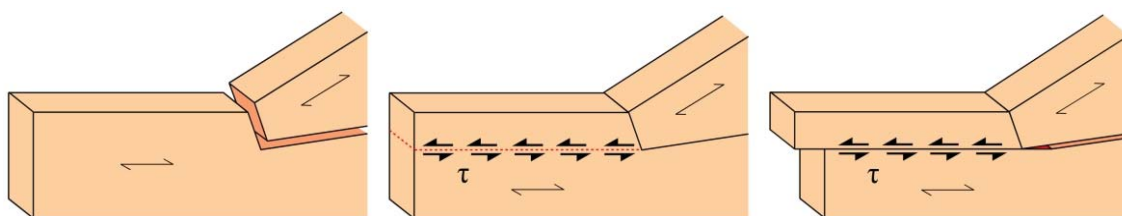


Figura 2.13 - Superfície de corte no talão

Nas ligações com dente duplo, a sua execução requer uma precisão muito maior para se garantir um bom contacto entre todas as superfícies, pelo que, de acordo com Ehlbeck (1995) e SE-M (2006), no cálculo de  $l_{v2}$  se deve considerar toda a componente horizontal da compressão na perna, não a distribuindo por  $l_{v1}$  e  $l_{v2}$ . A última publicação estipula também um comprimento mínimo  $l_{v1}$  de 15 cm.

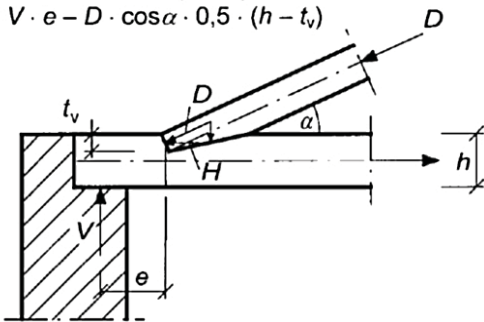
Em qualquer das verificações anteriores, designadamente na decomposição vectorial da força de compressão da perna, é desprezado o atrito entre as peças, embora este tenha uma grande importância no comportamento da ligação.

Consoante a geometria da ligação e o tipo e localização do apoio da asna, outros modos de rotura a ter em conta são (Köhler e Heimeshoff 1989; Blass et al. 2004; Pierce et al. 2005): tracção na linha na secção reduzida devido ao entalhe; flexão composta com tracção nessa mesma secção,

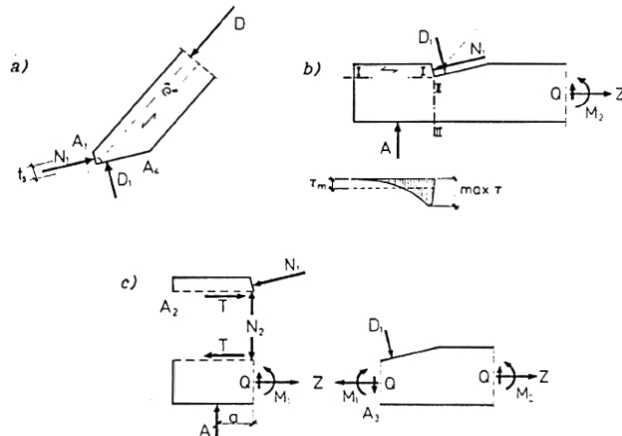
devido à excentricidade do caminho das tensões de tracção; quaisquer tensões resultantes da flexão da linha por o apoio se encontrar fora das secções do entalhe (Figuras 2.14 e 2.15).

$$M = V \cdot e - H \cdot 0,5 \cdot (h - t_v)$$

$$M = V \cdot e - D \cdot \cos \alpha \cdot 0,5 \cdot (h - t_v)$$

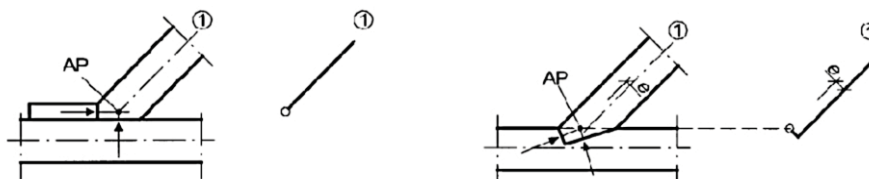


**Figura 2.14** - Excentricidade do apoio (Blass et al. 2004)



**Figura 2.15** - Esforços actuantes na ligação, segundo (Köhler e Heimeshoff 1989)

A localização do apoio tem grande importância para evitar excentricidades, sendo vantajoso que a direcção da reacção de apoio passe na intercepção dos eixos da perna e da linha. As forças aqui actuantes são as maiores a que estão sujeitos os elementos da asna, o que aliado à geometria da ligação conduz a grandes concentrações de tensões. Para obviar a esta situação, são por vezes executados cachorros em madeira que se prologam sob a linha para o interior da asna. Conseguem-se assim distribuir melhor as tensões da reacção de apoio e diminuir a flexão na linha.



**Bild 8/74.** Direkte Verbindung über Kontakt; Anschlusspunkt (AP) liegt auf Stabachse 1

**Bild 8/75.** Direkte Verbindung über Kontakt; AP liegt nicht auf Stabachse 1

**Figura 2.16** - Modelação da ligação, segundo Blaß et al. (2004). Na primeira figura (Bild 8/74) a ligação posiciona-se sobre o eixo do elemento 1, enquanto que na segunda figura (Bild 8/75) isso não ocorre.

A previsão do modo de rotura é essencial na definição da intervenção sobre uma estrutura. De facto, ensaios físicos e análises de modelos de elementos finitos da ligação perna-linha (Senno e Piazza 2008) permitiram verificar, através de uma modelação minuciosa, que a rotura, naquele caso, ocorria por combinação de corte paralelo e tracção perpendicular às fibras no talão, junto ao entalhe (devido ao atrito que se mobiliza na face frontal do entalhe quando a perna tenta rodar no sentido de se aproximar da linha). A mesma análise, feita por uma modelação com elementos finitos menos sofisticada, tal como a sugerida por (Blass et al. 2004) e apresentada na Figura 2.16, mais semelhante ao modo como os projectistas em geral lidam com estes problemas (considerando elementos de barra com comportamento linear e concentrando nas ligações o comportamento não linear) conduzia a uma rotura por flexão composta na perna.

Embora em ambos os modelos a rotura ocorresse para o mesmo nível de carga, os modos de

rotura são completamente distintos, orientando a intervenção em direcções distintas. Isto demonstra a necessidade de conhecer os modos de rotura envolvidos nas ligações com entalhes e de determinar a resistência mobilizada em cada um, para garantir que os modelos adoptados representam o comportamento real da estrutura.

## 2.4 Estudos anteriores

Na pesquisa bibliográfica realizada foram encontrados alguns trabalhos sobre o comportamento da ligação entre a linha e perna, dividindo-se entre os que estudaram o comportamento da ligação em compressão e os que o estudaram em rotação. Nos pontos seguintes apresentam-se alguns resultados e as principais conclusões desses estudos, embora alguns destes trabalhos estejam ainda em curso.

### 2.4.1 Comportamento em compressão

No primeiro trabalho experimental referenciado sobre o comportamento de ligações tradicionais entre a perna e a linha (Köhler e Heimeshoff 1989) (Figura 2.17) foram utilizadas ligações com  $\beta = 45, 35$  e  $55^\circ$  e entalhes com  $t_v = 1,17, 2,34$  e  $3,51$  cm de profundidade (ver Figura 2.5), com madeira de resinosas da classe de qualidade S10 (à data designada por classe II) (DIN 4074-1:2008), que corresponde a uma classe de resistência C24 (EN 338:2003). A secção transversal das peças utilizadas foi de  $12 \times 12$  cm<sup>2</sup> para a perna e de  $12 \times 14$  cm<sup>2</sup> para a linha. O teor em água da madeira encontrava-se entre os 10 e os 16 %.

Quadro 2.1 - Resultados dos ensaios de Köhler e Heimeshoff (1989)

Série	N.º de ensaios	Ângulo da ligação $\beta$	Profundidade do entalhe $t_v$ [cm]	Comprimento do talão $l_v$ [cm]	Carga máxima atingida [kN]
1	6	45 °	1,17	90	72,1
2	6	45 °	2,34	90	78,1
3	7	45 °	3,51	90	108
4	6	45 °	2,34	20	70,1
5	6	45 °	2,34	16	68,9
6	3	45 °	2,34	14	80,1
7	4	45 °	2,34	12	69,4
8	6	35 °	2,34	90	83,2
9	6	55 °	2,34	90	95,3

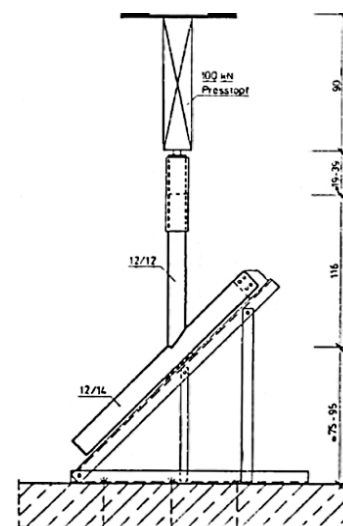


Figura 2.17 - Configuração dos ensaios realizados por Köhler e Heimeshoff (1989)

Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 2.1, sendo observável que para  $\beta = 45^\circ$ , o aumento da profundidade do entalhe de  $t_v = 1,17$  cm para  $t_v = 2,34$  cm (aumento de 100 %) resulta num aumento da resistência inferior a 10 %, mas um aumento da profundidade do entalhe de  $t_v = 2,34$  cm para  $t_v = 3,51$  cm (aumento de 50 %) resulta num aumento da resistência de aproximadamente 40%, o que indicia uma variação não linear da resistência com a profundidade

do entalhe, tal como assumido na expressão (2.10).

Por outro lado, a redução do comprimento do talão de  $l_v = 90$  cm para  $l_v = 20$  cm (redução de 78 %) implicou uma diminuição de apenas 11 % na resistência da ligação, enquanto que posteriores reduções para  $l_v = 16$  cm e  $l_v = 12$  cm não tiveram influência significativa na resistência (a redução para  $l_v = 14$  cm apresenta um aumento na resistência, mas foram realizados apenas metade dos ensaios e os resultados não são representativos).

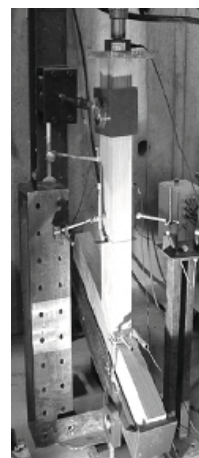
A variação de  $\beta = 45^\circ$  para  $\beta = 35^\circ$  não alterou significativamente a resistência, mas o aumento para  $\beta = 50^\circ$  conduziu a um aumento de 22 % da resistência.

Feio (2006) realizou ensaios de compressão de ligações com dente simples e respiga, com madeira de castanho (*Castanea sativa* Mill.), ângulo  $\beta = 65^\circ$ , profundidade  $t_v = 2$  cm e comprimento do talão  $l_v = 410$  cm e secções transversais com  $92 \times 15$  cm<sup>2</sup> (Figura 2.18). A madeira de castanho utilizada foi dividida em lotes em função da origem: proveniente de estruturas antigas ou madeira recente.

**Quadro 2.2** - Resultados dos ensaios de Feio (2006)

Grupo	Provete	Força última [kN]	Média [kN]	Desvio padrão [kN]
NCW	J_1	121,6	145,4	18,9
	J_2	161,5		
	J_3	159,7		
	J_4	138,9		
OCW	J_5	126,4	133,8 (145,5*)	27,1 (16,7*)
	J_6	157,1		
	J_7	98,5		
	J_8	153		

\*média desprezando o provete J\_7

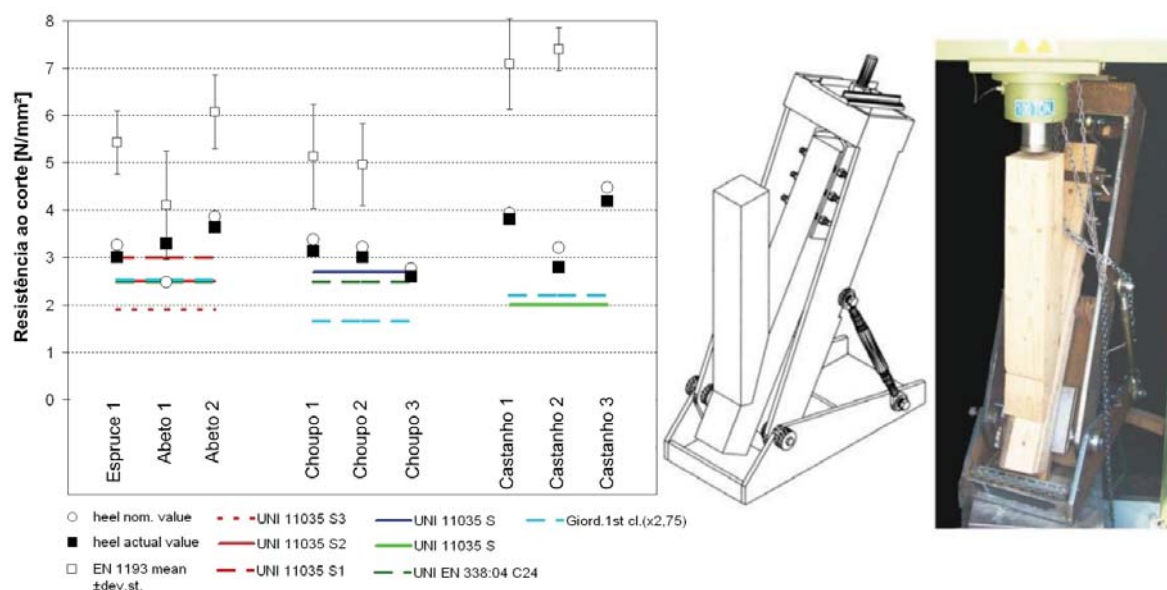


**Figura 2.18** - Resultados e equipamento utilizado (Feio 2006)

Os resultados obtidos revelam que não há diferença estatisticamente significativa entre a resistência das ligações executadas com madeira antiga (grupo OCW) e das ligações com madeira nova (grupo NCW) (Quadro 2.2).

Com o objectivo de analisar as roturas por corte paralelo às fibras no talão, Thoma et al. (2007) realizaram ensaios de compressão da perna de ligações executadas com elementos de madeira de choupo (*Populus* sp.), abeto (*Abies alba* Mill.) e espruce (*Picea abies* Karst.) retirados de estruturas antigas e madeira de castanho (*Castanea sativa* Mill.) recente. As ligação ensaiadas foram montadas com um ângulo  $\beta = 30^\circ$ , as peças foram rectificadas para secções transversais com  $15 \times 15$  cm<sup>2</sup> e apresentavam um teor em água  $w = 12$  %. O comprimento adoptado para o talão foi  $l_v = 20$  cm e para a profundidade do entalhe foi  $t_v = 4$  cm. Os autores realizaram também ensaios de corte, segundo a EN 1193:1997, para determinar a resistência ao corte paralelo às

fibras de provetes retirados das mesmas peças de madeira, com o objectivo de comparar os resultados fornecidos pelos dois ensaios. Os resultados são apresentados na Figura 2.19.



**Figura 2.19** - Resultados e equipamento utilizado. Adaptado de (Thoma et al. 2007)

Os autores referem que a superfície de rotura nunca correspondeu à vulgarmente adoptada no dimensionamento (Figura 2.13), sendo influenciada pela anatomia da madeira, pela direcção dos anéis de crescimento e pela presença e distribuição de defeitos no talão. Este autores concluem que as fendas de secagem não reduzem a resistência à rotura do talão, a não ser que se encontrem exactamente na superfície de rotura, e alguns dos defeitos da madeira associados à sua estrutura, tais como nós e inclinação do fio, vulgarmente utilizados na classificação visual tendo em vista a sua resistência mecânica não reduzem a resistência ao corte do talão, mas os empenos, as bolsas de resina e as galerias de caruncho podem influenciar negativamente o desempenho da ligação.

Os valores característicos de resistência ao corte paralelo às fibras fornecidos para madeira nova (EN 338:2003) são ligeiramente inferiores aos valores médios obtidos nos ensaios das ligações (madeira envelhecida e com degradação por caruncho), que ,por sua vez, são significativamente inferiores aos valores médios obtidos nos ensaios de provetes de madeira retirados das ligações (EN 1193:1997). É referido pelos autores que esta diferença se pode dever à componente de compressão perpendicular às fibras que o procedimento de ensaio da EN 1193:1997 introduz nos provetes, que pode conferir um certo efeito de confinamento, contribuindo para o aumento da resistência ao corte. Por outro lado, nas ligações o volume de madeira solicitado é maior que nos provetes da EN 1193:1997, o que aumenta a probabilidade da ocorrência de defeitos que condicionem a resistência, reduzindo, deste modo, os valores de obtidos.



Faye (2007) apresentou resultados de ensaios de compressão de ligações com ângulos  $\beta = 25$  e  $55^\circ$ , profundidades do entalhe  $t_v = 30$  e  $45$  mm e talões com  $l_v = 150, 200$  e  $250$  mm (Quadro 2.3). Nas ligações a  $25^\circ$  observou-se que a ruptura se deu por corte paralelo às fibras no talão, e que a resistência não aumentou proporcionalmente ao comprimento do talão  $l_v$ , confirmando o observado por Köhler e Heimeshoff (1989). Um aumento de 5 % do teor em água conduziu a uma redução de 15 % da resistência (esta redução de 3 % da resistência por cada 1 % de aumento do teor em água é idêntica à prevista na EN 384:2004 para ajustamento da resistência em compressão paralela às fibras para  $w = 12$  %). Nas ligações a  $55^\circ$  as rupturas foram por esmagamento (Figura 2.20) e corte, sendo a resistência da ligação muito superior. A redução da profundidade do entalhe de  $t_v = 45$  para  $t_v = 30$  mm não teve influência na resistência das ligações montadas a  $25^\circ$  e teve pouca influência (redução de cerca de 10 %) nas ligações montadas com  $\beta = 55^\circ$ .

**Quadro 2.3** - Resultados dos ensaios de Faye (2007)

Lote	$\beta$	$t_v$ [mm]	$l_v$ [mm]	$b$ [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$F_{\max}$ (valor médio) [kN]
17	25	30	150	90	485	62
1	25	30	200	90	475	74
5	25	45	200	90	459	76
18 (C24, preparação $w = 20$ % e ensaio $w = 14$ %)	25	45	200	90	421	76
18 (C24, preparação $w = 20$ % e ensaio $w = 19$ %)	25	45	200	90	421	65
6	25	45	200	160	451	123
7	25	45	250	90	487	92
9	55	30	150	90	488	153
13	55	45	200	90	477	170
14	55	45	200	130	482	230

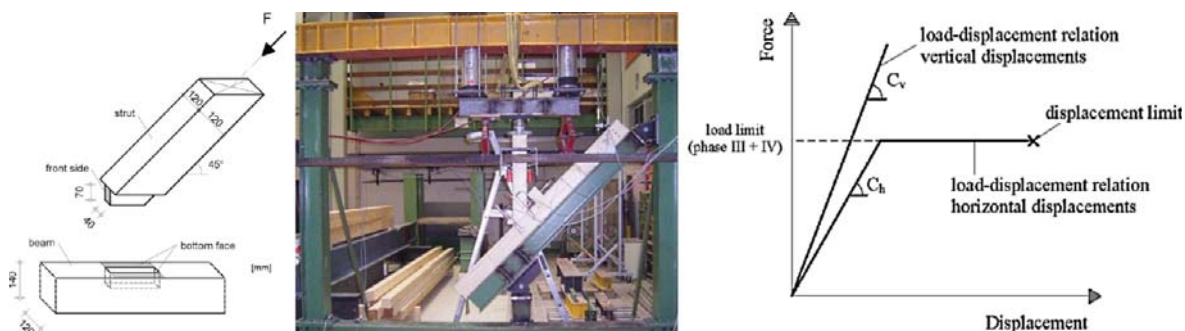


**Figura 2.20** - Exemplos de roturas (Faye 2007)

Os resultados foram comparados com a metodologia exposta nas expressões (2.8) e (2.10), concluindo-se que para  $\beta = 25^\circ$  os valores característicos estimados pelas expressões eram, em média, 20 % superiores aos valores característicos obtidos do tratamento dos resultados dos ensaios. Contudo, para o cálculo da resistência à compressão foi adoptado o coeficiente  $k_{c,90} = 4$ , o que parece exagerado (e foi entretanto limitado a  $k_{c,90} \leq 1,75$  (EN 1995-1-1:2004/A1)), uma vez que a zona comprimida está encostada ao limite da secção transversal, não havendo continuidade das fibras para além da zona carregada.

Koch e Schäfers (2008) realizaram ensaios de compressão de ligações do tipo respiga e mecha, mas sem dente, isto é, em que a transmissão de tensões entre as peças era apenas assegurada pela respiga (Figura 2.21). Nas ligações foi utilizada madeira de espruce (*Picea abies* Karst.), da

classe de resistência C24 (EN 338:2003), sendo o ângulo de montagem  $\beta = 45^\circ$ , a secção transversal da perna  $12 \times 12 \text{ cm}^2$  e da linha  $12 \times 14 \text{ cm}^2$ . A profundidade da respiga era  $t_v = 70$  e a sua largura 40 mm (1/3 da largura da linha).



**Figura 2.21** - Geometria, equipamento e curvas de comportamento idealizadas. Adaptado de (Koch e Schäfers 2008)

Estes autores concluíram que estas ligações apresentavam um comportamento elástico linear até atingir a carga máxima, após o que se verifica uma redução da aproximadamente 30 % na carga aplicada. É referido que o comportamento destas ligações pode ser descrito por curvas bilineares de comportamento elasto-plástico perfeito.

**Quadro 2.4** - Resultados dos ensaios de Koch e Schäfers (2008)

Provete	$F_{max}$ [kN]	$0,1 \cdot F_{max}$ [kN]	Deslocamento ( $0,1 \cdot F_{max}$ )		$0,4 \cdot F_{max}$ [kN]	Deslocamento ( $0,4 \cdot F_{max}$ )		$C_h$ [kN/mm]	$C_v$ [kN/mm]	Força no limite elástico <sup>3)</sup> (fase III+IV) [kN]
			$h^{1)}$ [mm]	$v^{2)}$ [mm]		$h^{1)}$ [mm]	$v^{2)}$ [mm]			
1.1	90,0	10,9	1,01	0,43	35,9	1,16	0,62	117,8	93,0	50
1.2	132,8	13,6	0,81	0,61	53,1	1,07	0,93	110,6	87,4	67
1.4	123,5	12,4	0,25	0,26	49,5	0,67	0,71	62,5	58,4	58
1.5	137,8	13,4	0,68	0,86	56,1	0,83	1,27	191,1	73,0	73

<sup>1)</sup> Valor médio dos transdutores de deslocamento colocados nos dois lados da ligação

<sup>2)</sup> Valor médio de todos os transdutores de deslocamento verticais

<sup>3)</sup> Apenas para a componente horizontal

Hirsi (2008) apresentou resultados do ensaio de ligações (Figura 2.22), conduzidos na *Helsinki University of Technology*, em que os elementos de madeira utilizados tinham uma largura  $b = 10 \text{ cm}$  e se enquadravam numa classe de qualidade T30 (NS-INSTA 142:1997).

Embora se desconheça se o número de ensaios realizados foi suficiente para traçar as curvas apresentadas na figura anterior, é notória a relação não linear entre o aumento da resistência da ligação e o aumento da profundidade do entalhe, para qualquer valor do ângulo da ligação.



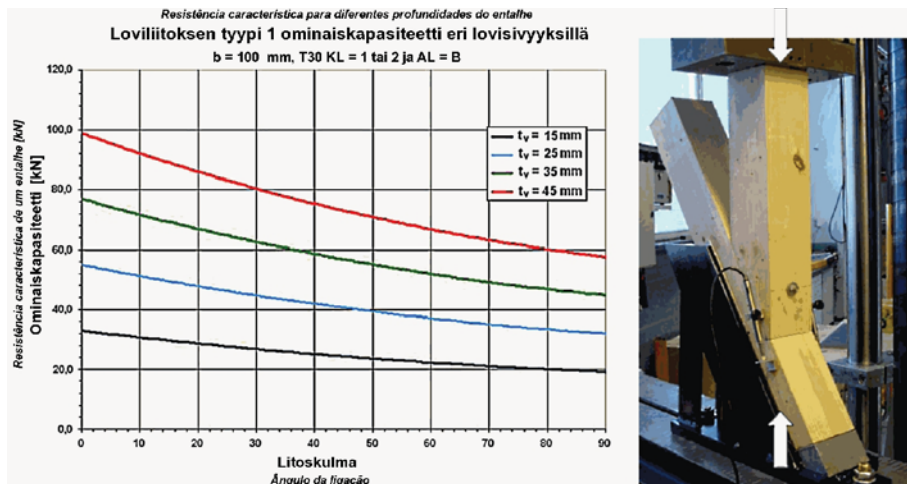


Figura 2.22 - Resistência à compressão de ligações com dentes simples (Ominaiskapasiteetti) de diferentes profundidades para diferentes ângulos de montagem (Liitoskulma) (Hirsi 2008)

## 2.4.2 Comportamento em rotação

### 2.4.2.1 Ligações sem ferragens

O comportamento destas ligações é assimétrico relativamente à rotação, apresentando comportamentos distintos consoante a rotação é no sentido de aumentar ou diminuir o ângulo  $\beta$ , devido às assimetrias do entalhe. Quando o ângulo tende a abrir, a ligação apresenta um troço inicial elástico linear bastante bem definido, um regime de transição não linear muito reduzido ao qual sucede um regime plástico com ductilidade significativa. Quando o ângulo tende a fechar, a ligação exibe um comportamento menos dúctil, tanto mais dependente do atrito quanto menor for o ângulo  $\beta$ . O comportamento elástico linear inicial termina abruptamente num efeito mais ou menos evidenciado do tipo “dentes de serra”, dependendo do nível de compressão na perna.

Os resultados obtidos por Parisi e Piazza (2000) através de análises de sensibilidade realizadas num modelo de elementos finitos de uma ligação com dente simples, sem respiga e sem ferragens, permitiram determinar a importância relativa de vários parâmetros. Segundo estes autores, os parâmetros com menor influência no comportamento da ligação são o coeficiente de Poisson (na gama de 0,2 a 0,4 não tem influência) e a classe de resistência da madeira (tem pouca influência no momento último da ligação e a influência na rigidez da ligação é também pequena e equivalente à diferença entre a rigidez de cada classe). Por outro lado, os parâmetros mais influentes no comportamento da ligação são o coeficiente de atrito, as dimensões das peças, o ângulo entre a perna e a linha  $\beta$  e o nível de compressão na perna, o que evidencia o carácter friccional da ligação e a importância do atrito na sua resistência e comportamento.

O **coeficiente de atrito estático entre peças de madeira** é influenciado pela aspereza das superfícies, orientação das fibras em relação à superfície de contacto ( $\mu_{\perp} \approx 3 \times \mu_{\parallel}$  (Senno e Piazza 2003)), idade, temperatura, teor em água (aumentando com o teor em água até ao ponto de

saturação da fibras, mantendo-se depois disso constante até se verificar a presença de água livre na superfície de contacto) e extractivos presentes na madeira (Forest Products Laboratory 1999; McKenzie e Karpovich 1968). McKenzie e Karpovich (1968) sustentam que entre superfícies de madeira o coeficiente de atrito varia entre 0,5 e 0,7 e perto do ponto de saturação das fibras entre 0,8 e 0,9. A EN 1995-2:2004, no caso do atrito entre duas superfícies de madeira serrada ou entre uma superfície serrada e outra aplainada, estabelece valores do coeficiente de atrito entre 0,30 (para  $w \leq 12\%$ ) e 0,45 (para  $w \geq 16\%$ ), na direcção paralela às fibras, e entre 0,23 (para  $w \leq 12\%$ ) e 0,35 (para  $w \geq 16\%$ ), na direcção perpendicular às fibras. Na situação de atrito entre superfícies de madeira aplainada, segundo este documento o coeficiente de atrito varia entre 0,20 (para  $w \leq 12\%$ ) e 0,40 (para  $w \geq 16\%$ ), na direcção paralela às fibras, e entre 0,17 (para  $w \leq 12\%$ ) e 0,30 (para  $w \geq 16\%$ ), na direcção perpendicular às fibras. Para peças antigas Parisi e Piazza (2000) sugerem  $\mu = 0,3$ , com um limite de  $\mu = 0,6$  para casos em que ocorreu uma interpenetração parcial das fibras comprimidas. Segundo os mesmo autores, o efeito do coeficiente de atrito é mais notório quando o ângulo  $\beta$  tende a fechar do que quando tende a abrir e, por outro lado, a resistência e a rigidez aumentam com o atrito, enquanto que a ductilidade diminui.

O coeficiente de atrito dinâmico varia de modo não linear com a velocidade relativa entre as peças em contacto (McKenzie e Karpovich 1968).

O **coeficiente de atrito entre a madeira e as peças metálicas** depende do acabamento das superfícies e do teor em água (McKenzie e Karpovich 1968). Segundo estes autores, quando as superfícies são lisas o coeficiente de atrito varia entre 0,1 e 0,7 e perto do ponto de saturação das fibras entre 0,2 e 0,5; quando as superfícies são rugosas o coeficiente de atrito assume valores entre 0,5 a 0,7 (independentemente do teor em água, tal como no caso do atrito entre superfícies de madeira).

As **dimensões da perna** são um factor preponderante na resistência e na rigidez da ligação. A resistência aumenta quase com o quadrado da largura da perna, enquanto que a rigidez é apenas significativamente alterada quando o ângulo  $\beta$  tende a fechar, aumentado com a largura da perna (Parisi e Piazza 2000).

Segundo Parisi e Piazza (2000), a influência do **ângulo entre a perna e a linha**  $\beta$  é muito significativa quando o ângulo  $\beta$  tende a fechar e insignificante quando tende a abrir. A resistência da ligação com  $\beta = 30^\circ$  é quase o dobro da ligação com  $\beta = 60^\circ$ , embora a ductilidade desta última seja mais que o dobro da primeira. Uma explicação possível pode ser porque na primeira situação ( $\beta = 30^\circ$ ) as tensões de compressão transmitem-se essencialmente pelo entalhe frontal, mobilizando uma força de atrito maior do que no segundo caso ( $\beta = 60^\circ$ ), em que as tensões de compressão de distribuem mais equitativamente pelas duas superfícies do entalhe.

A resistência da ligação é aproximadamente directamente proporcional ao **nível de compressão na perna** (Branco 2008; Parisi e Piazza 2000). Por sua vez, a rigidez só é influenciada por este parâmetro quando o ângulo tende a abrir (aumentando significativamente com a compressão).

Com o aumento da compressão, o troço elástico linear inicial é menos extenso quando o ângulo tende a abrir e mais extenso quando o ângulo tende a fechar (Branco 2008). No entanto, níveis de compressão elevados conduzem a maiores danos nas peças, quando sujeitas a acções cíclicas.

De acordo com o EC8 (prEN 1998-1:2003), as ligações tradicionais apenas podem ser utilizadas em zonas sísmicas se evidenciarem uma capacidade de dissipação de energia suficiente, sem riscos de rotura frágil em corte ou em tracção perpendicular às fibras. A sua utilização deve ser baseada em resultados de ensaios apropriados. A resposta da ligação quando sujeita a acções cíclicas foi obtida experimentalmente (Branco 2008; Parisi e Piazza 2000, 2002), segundo as indicações de Dolan et al. (1994) e da EN 12512:2001.

#### 2.4.2.2 Ligações com ferragens

Alguns trabalhos têm analisado a influência das ferragens no comportamento das ligações tradicionais. Observou-se que as ferragens introduzem uma fase pós-elástica muito significativa no comportamento das ligações, pois impedem a separação das peças de madeira (Del Senno e Piazza 2003).

Os ensaios realizados em ligações com ferragens (com parafuso, esquadros ou braçadeiras metálicas) concluem que qualquer destas técnicas resulta num aumento da resistência, da ductilidade e da rigidez (excepto quando o ângulo tende a fechar, pois nesse caso a rigidez inicial pode não ser alterada). O comportamento elástico linear inicial exibido pelas ligações sem ferragens é também por vezes alterado para regimes significativamente menos lineares. Relativamente ao comportamento histerético, pode dizer-se que todas as técnicas de reforço resultam num aumento da capacidade de dissipação de energia da ligação.

De acordo com Parisi e Piazza (2000, 2002), comparativamente à situação sem ferragens, a **ligação com um parafuso atravessante** é mais rígida no sentido de abertura do ângulo, embora atinja deslocamentos máximos um 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 (atenua o efeito tipo “dentes de serra”) e se desencaixem. A resistência da ligação também aumenta. 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 (*embedding*) resulta na ovalização do furo, permitindo escorregamentos cada vez maiores, o que origina um maior efeito de aperto (*pinching*) dos ciclos e redução da energia dissipada. De qualquer modo, Parisi e Piazza (2002) obtiveram coeficientes de comportamento  $q$  para uma asna de cobertura com ligações reforçadas com parafusos atravessantes (modelada considerando os resultados dos ensaios dessas ligações) entre 3 e 3,2, o que as enquadra na classe de ductilidade H (estruturas de elevada ductilidade) (EN 1998-1:2004).

O efeito da introdução de dois parafusos de menor diâmetro (posicionados na mesma secção transversal) ainda não é claro, pois têm-se obtido resultados contraditórios. Nalguns ensaios (Parisi e Piazza 2000) obteve-se um aumento da resistência e uma redução da ductilidade da

ligação, enquanto que noutros ensaios (Branco 2008) se observaram reduções significativas ao nível da resistência, ductilidade e capacidade de dissipar energia.

A influência do reforço com **esquadros metálicos** no comportamento da ligação depende desde logo do instante em que são montados. Isto é, se forem colocados antes da estrutura ser erguida, assim que se inicia o carregamento os esquadros são mobilizados e intervêm na resposta da ligação, não permitindo o fecho das folgas entre as peças. Se, por outro lado, forem aplicados quando a estrutura já está montada e já não há folgas entre as peças, só serão solicitados quando o carregamento provocar deformações significativas na ligação. Os ensaios de Parisi e Piazza (2000) e de Branco (2008) foram realizados, colocando os esquadros antes da ligação ser carregada. Comparativamente à situação sem ferragens, estas ligações apresentam um comportamento simétrico quando o ângulo aumenta ou diminui e marcadamente não linear. Os deslocamentos máximos, a resistência da ligação e a capacidade de dissipação de energia são superiores. A simetria e o acentuado efeito de aperto (*pinching*) exibidos pela curva de comportamento sugerem que seja a deformação do aço a reger o comportamento desta ligação.

As ligações com esquadros metálicos apresentam um comportamento muito distinto do original, sendo ambíguo o caminho de transmissão de carga entre os elementos (através dos entalhes e/ou das ferragens), ao que acresce a possibilidade de rotura frágil muitas vezes observada nas soldaduras. Devido à grande superfície de aço exposta, e eficácia deste reforço pode ser comprometida numa situação de incêndio.

No caso da ligação com a **braçadeira metálica**, o deslocamento máximo quando se abre o ângulo é semelhante ao da situação sem ferragens, 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 (Parisi e Piazza 2000). 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.

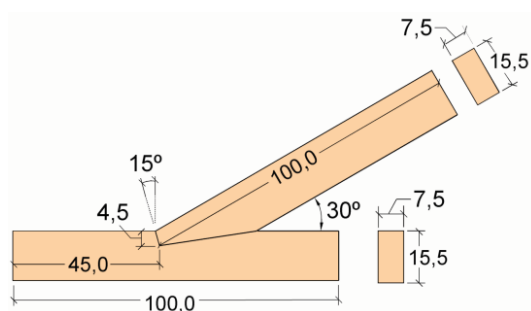
A braçadeira deve estar sempre ajustada às peças de madeira, para ser eficaz para pequenas deformações, o que implica uma manutenção após montagem, o que nem sempre é viável, dependendo do tipo de braçadeira e da acessibilidade e manutenção da estrutura.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

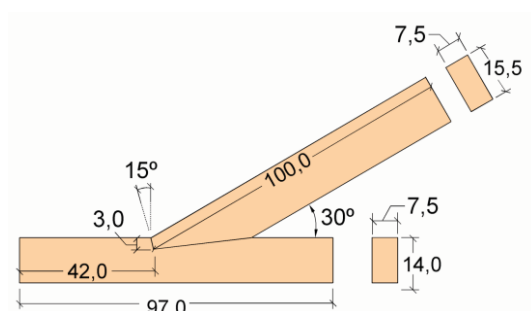
Nos pontos seguintes é apresentado o programa experimental conduzido no LNEC.

#### 3.1 Configurações ensaiadas

Na definição dos casos de estudo considerou-se a bibliografia consultada e os estudos já desenvolvidos nesta área, definindo-se um programa experimental com as configurações apresentadas nas figuras seguintes. As ligações ensaiadas foram executadas com as três **geometrias** de entalhes apresentadas nas Figuras 3.1 a 3.3. As dimensões das secções transversais das peças (cerca de  $8 \times 16 \text{ cm}^2$ ) e do ângulo entre elas ( $\beta = 30^\circ$ ) foram escolhidas por serem porventura as mais frequentes nas estruturas de madeira para suporte de coberturas em Portugal.

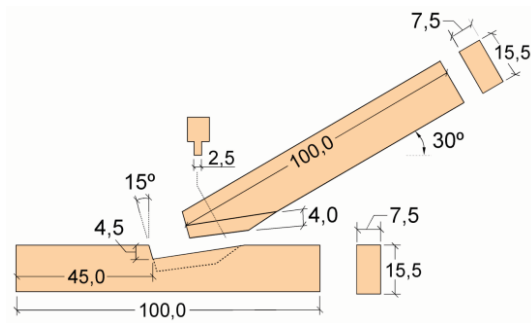


**Figura 3.1** - Geometria das ligações com  $t_v = 45 \text{ mm}$  (dimensões em cm).



**Figura 3.2** - Geometria das ligações com  $t_v = 30 \text{ mm}$  (dimensões em cm).

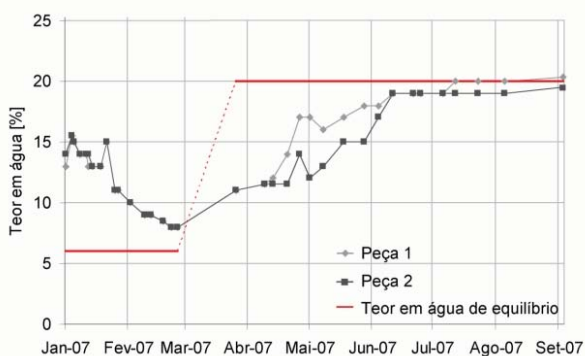
O comprimento de  $l_v$  adoptado (45 cm) está bastante sobredimensionado face às solicitações vulgares nestas ligações, mas pretendeu-se evitar as roturas frágeis por corte paralelo às fibras que aí poderiam ocorrer (Thoma et al. 2007) e comprometer a realização dos ensaios em rotação. As configurações com ferragens derivam da ligação sem respiga e com uma profundidade do entalhe  $t_v$  de 4,5 cm.



**Figura 3.3** - Geometria das ligações com respiga (dimensões em cm).

A influência da **profundidade do entalhe** foi aferida através da realização do ensaio de ligações simples, sem respiga e sem ferragens, com uma profundidade do entalhe  $t_v = 3,0$  cm (apenas para  $w = 12$  %). A diferente altura da secção transversal da linha das ligações com  $t_v = 3,0$  cm (Figura 3.2) resulta do facto destas peças terem sido obtidas de peças originalmente com um entalhe com 4,5 cm de profundidade, através da remoção de uma zona com 1,5 cm de altura. Para garantir o correcto posicionamento da ligação no equipamento de ensaio foi necessário reduzir o comprimento destes elementos para 97,0 cm.

Devido à sua localização perto do beirado do telhado e sobre as paredes exteriores, estas ligações podem, ocasional e ciclicamente, ser sujeitas a teores em água elevados. Deste modo, para avaliar a **influência do teor em água ( $w$ )** no seu comportamento mecânico foi decidido que a maioria das tipologias seria ensaiada com teores em água de 12 e de 20 %. Contudo, como a execução das ligações foi realizada quando as peças apresentavam um teor em água perto de 16 %, situação próxima da prática corrente, procedeu-se ao subsequente condicionamento das ligações para os valores pretendidos. As ligações a ensaiar “no estado seco” ( $w = 12$  %) foram deixadas a secar ao ar até atingirem esse valor. No caso das ligações a ensaiar “no estado húmido” (com  $w = 20$  %), para simular a situação real, foi decidido secar as peças/ligações até  $w \approx 8$  % e só depois as conduzir até  $w \approx 20$  %. Os parafusos das ligações com ferragens (esquadros e braçadeiras) foram apertados na fase do teor em água mais reduzido, tal como é recomendado que se faça em estruturas existentes, o que levou ao ajustamento das ferragens à madeira quando esta aumentou de volume.



**Figura 3.5** - Evolução do teor em água das peças de madeira para os ensaios com  $w = 20$  %



**Figura 3.4** - Ligações na câmara de condicionamento

Os **elementos metálicos** utilizados, esquadros e braçadeira, representam as configurações mais comuns, com exceção do parafuso atravessante (embora este último apresente princípios de funcionamento semelhantes ao da braçadeira). As ferragens escolhidas são uma das maneiras possíveis de materializar as tipologias mais básicas e permitem analisar os mecanismos envolvidos no seu comportamento e que mais afectam o seu desempenho.

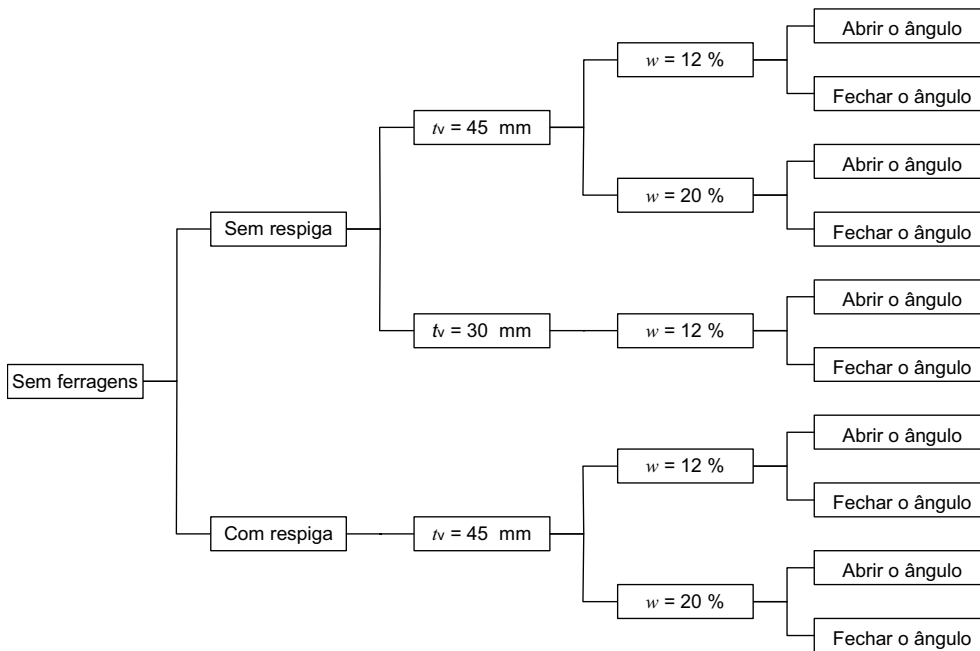
Os **esquadros metálicos** são constituídos por barras rectangulares de 50x3 mm<sup>2</sup>, soldadas em ângulo e com furos com um diâmetro de 10 mm (o EC5 (EN 1995-1-1:2004) estipula que o diâmetro dos furos nas chapas metálicas não deve ter mais que 2 mm ou 0,1·*d*, adoptando-se o maior entre os dois, que o diâmetro *d* do parafuso). A sua fixação é assegurada através de troços de varão roscado M8, inseridos através dos furos nos esquadros e na madeira, porcas e anilhas. Os furos estão colocados ao longo do eixo dos elementos. O diâmetro dos furos na madeira deve ser no máximo 1 mm superior ao diâmetro dos parafusos (EN 1995-1-1:2004), pelo que se consideraram furos com diâmetro de 9 mm. Contudo, mesmo adoptando as maiores tolerâncias previstas para execução dos furos, as variações dimensionais das peças (decorrentes da secagem e/ou humidificação), as tolerâncias de execução e as deformações decorrentes da aplicação dos esquadros ser, nalguns casos, “em carga” dificultaram a montagem das ligações.

As **braçadeiras** são constituídas por duas barras rectangulares espessas (barra rectangular 40x10 mm<sup>2</sup>) fixadas através de dois troços de varão roscado M8, que funcionam como tirantes, com anilhas e porcas. As braçadeiras foram colocadas a meio do entalhe e com os tirantes perpendiculares à perna, embora também se observem vulgarmente estruturas em que estes se encontram perpendicularmente à linha. Em qualquer dos casos é necessário realizar um entalhe para acomodar uma das barras. A colocação “ideal” da braçadeira seria com os tirantes fazendo, neste caso, 15 ° com a vertical, de modo a que madeira fosse comprimida com igual ângulo em relação às fibras, tanto na linha como na perna, mas isso obrigaria à realização de um entalhe em cada peça.

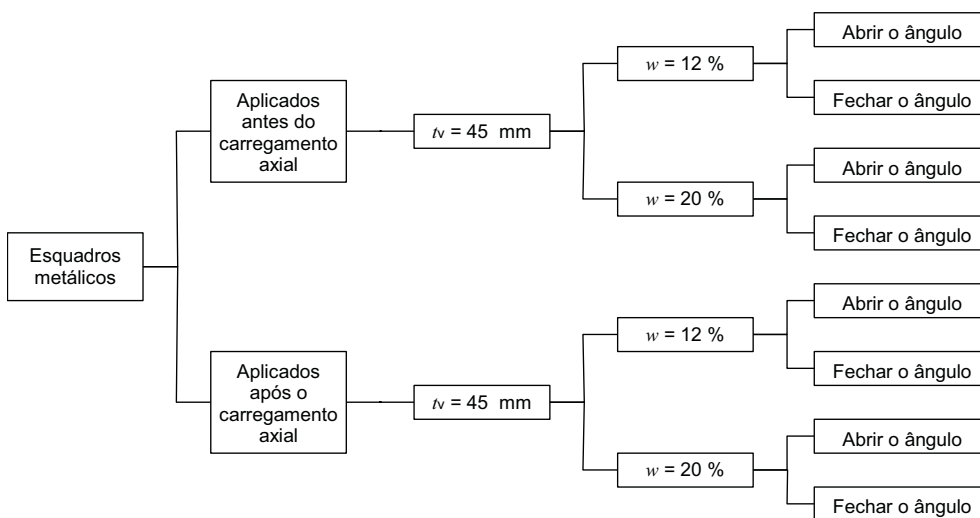
Foi também analisada a **diferença entre “ferragens e reforços”**, isto é, entre a montagem das “ferragens” antes da aplicação da força de compressão da perna ou a introdução de “reforços” após a aplicação da compressão na perna, nas ligações com esquadros metálicos com teor em água de 12 %.

Para avaliar a **influência da degradação por caruncho pequeno** foram ensaiadas ligações executadas com peças de madeira de Pinho Bravo com degradação intensa, obtidas na demolição das asnas de suporte de uma cobertura num edifício do início do século XX, em Sintra.

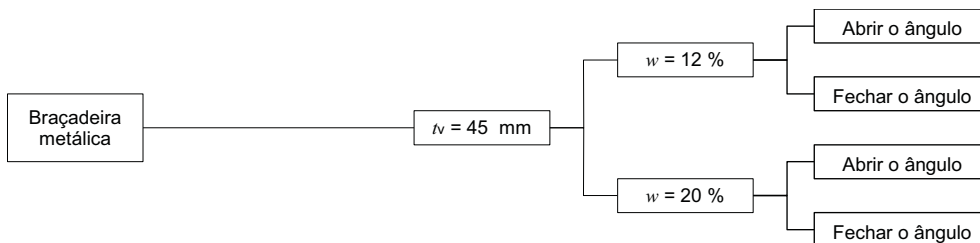
Nas figuras seguintes (3.6 a 3.9) são apresentadas as diferentes configurações ensaiadas.



**Figura 3.6** - Configurações ensaiadas: ligações sem ferragens

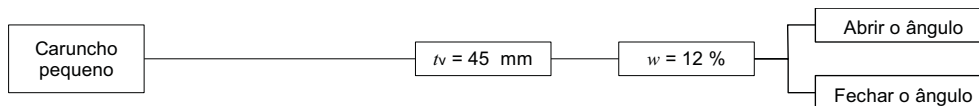


**Figura 3.7** - Configurações ensaiadas: ligações com esquadros metálicos



**Figura 3.8** - Configurações ensaiadas: ligações com braçadeira metálica





**Figura 3.9** - Configurações ensaiadas: ligações com degradação por caruncho pequeno (sem ferragens)

### 3.2 Execução das ligações

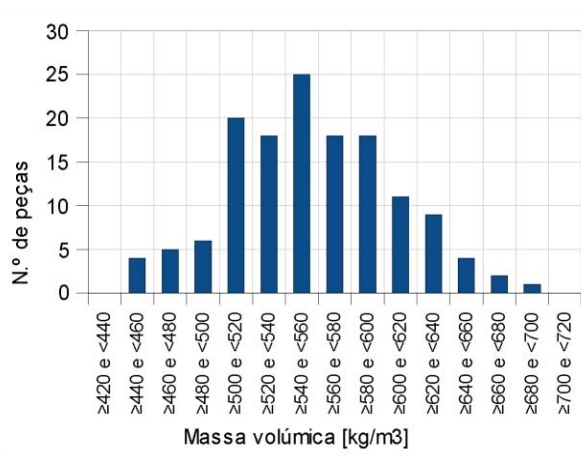
As ligações foram executadas com madeira de Pinho Bravo (*Pinus pinaster* Ait.), cerca de 2,6 m<sup>3</sup>, adquirida ainda verde em peças com 0,08×0,16×4,00 m<sup>3</sup>. Para acelerar o processo de secagem e minimizar a formação de fendas e empenos, estas peças foram cortadas em troços com 1 m de comprimento que foram deixados a secar em pilhas (Figura 3.10).



**Figura 3.10** - Pilhas de secagem



**Figura 3.11** - Organização das peças por densidade, para posterior distribuição pelos lotes



**Figura 3.12** - Distribuição da massa volúmica das peças de madeira ( $w = 12\%$ )

Para se garantir que as diferentes configurações ensaiadas apresentavam valores médios de massa volúmica semelhantes, os troços foram distribuídos por lotes (Figura 3.11) de acordo com a sua massa volúmica (Figura 3.12).

Os entalhes foram realizados e as ligações montadas quando a madeira apresentava um teor em água médio entre 16 e 18 %. A execução das peças de madeira (Figuras 3.13 e 3.14) e das ferragens foi realizada nas Oficinas de Carpintaria e de Mecânica do LNEC. Foram feitas três réplicas de cada ligação para cada uma das situação de ensaio apresentadas nas Figuras 3.6 a 3.9.



**Figura 3.13** - Marcação das peças para corte dos entalhes



**Figura 3.14** - Execução da mecha



**Figura 3.15** - Peças finalizadas



**Figura 3.16** - Ligações montadas

### **3.3 Equipamento de ensaio**

Nos pontos seguintes é apresentado o equipamento desenvolvido e utilizado durante a campanha experimental.

#### **3.3.1 Condições de ensaio**

A avaliação do comportamento da ligação em serviço requer que durante o ensaio se reproduzam as condições reais a que está sujeita, designadamente em termos de esforços. O aspecto mais importante prende-se com a necessidade de manter a perna com um nível de compressão correspondente, pelo menos, ao peso próprio da estrutura, durante todo o ensaio. Para além de assegurar a integridade da ligação, no caso de não existirem ferragens, esta compressão influencia também o seu comportamento mecânico, por intermédio do atrito mobilizado nas superfícies de contacto e do esmagamento localizado das fibras. Simultaneamente com a carga axial, é necessário impor rotações relativas entre os dois elementos, conhecendo, em cada instante, as forças aplicadas e os deslocamentos da perna.

#### **3.3.2 Equipamento de ensaio**

##### **3.3.2.1 Sistema para ensaio de ligações**

A realização do programa experimental implicou o desenvolvimento de equipamento específico para ensaio de ligações em asnas de madeira (Palma et al. 2007), construído no Núcleo de Sistemas Mecânicos do Centro de Instrumentação Científica do LNEC. Este sistema foi concebido de modo a ser fácil de utilizar, minimizando o tempo de montagem e desmontagem dos provetes e

o esforço despendido nessas operações. O equipamento é constituído por um suporte onde é colocado o provete a ensaiar, bases de aperto para imobilização do provete ao suporte por intermédio de parafusos e porcas, uma alonga para transmissão do movimento transversal ao eixo da perna e um dispositivo para aplicação da carga axial na perna. Este último dispositivo representa uma solução simples e fácil de utilizar, sendo a carga axial controlada através de um circuito pneumático e determinada pela altura e pressão interna de duas almofadas de ar.

Os ensaios foram efectuados no Laboratório de Comportamento de Estruturas do LNEC, tendo sido utilizado o actuador hidráulico de duplo efeito *Schenck* que está montado no pórtico para aplicação das deformações nos provetes.

Toda a instrumentação foi ligada a um sistema de aquisição *HBM Spider 8*, ligado a um computador, para se ler e armazenar os dados dos ensaios.

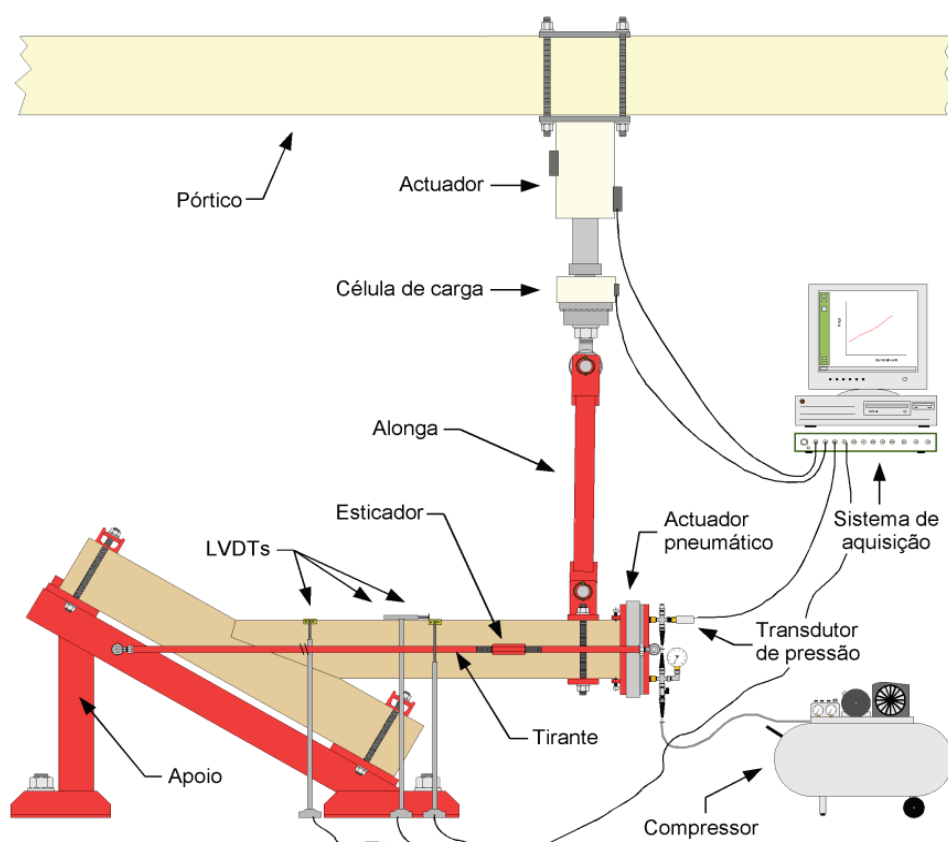


Figura 3.17 - Sistema de ensaio das ligações (adaptado do esquema original de F. Oliveira)

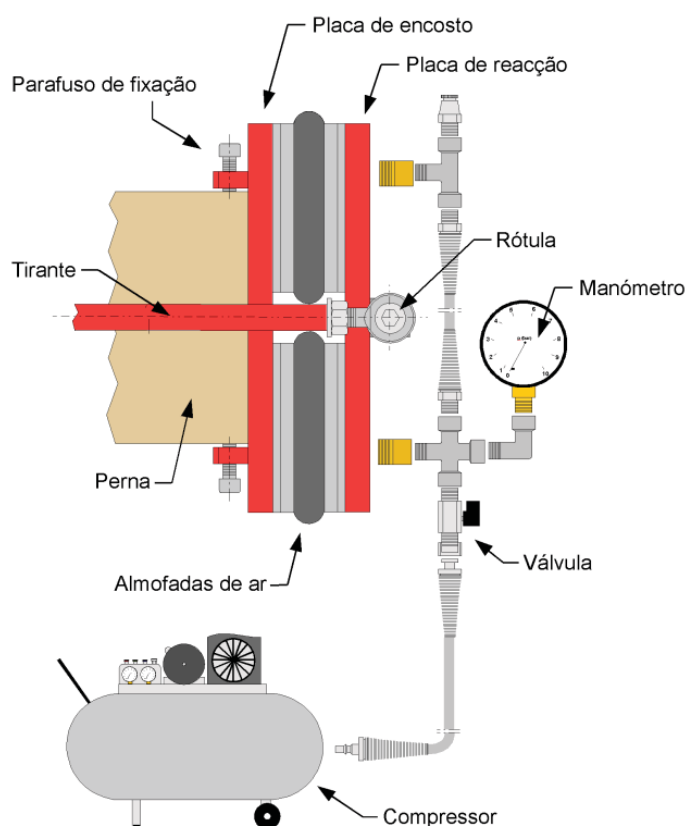
O **suporte** é constituído por uma estrutura de aço ligada ao pavimento por intermédio de duas sapatas e fusos roscados. Os provetes são fixados ao suporte pelas extremidades do elemento correspondente à linha da asna sobre duas placas, estando uma delas dotada de um batente para garantir o correcto alinhamento do provete. A imobilização do provete é efectuada por intermédio de bases de aperto, fusos e porcas. Este esquema de fixação apresenta uma boa capacidade de adaptação às variações dimensionais e empenamento dos provetes resultantes das tolerâncias de fabrico e do condicionamento para se atingir os teores em água desejados.

A carga axial é imposta na extremidade da perna por um sistema de duas almofadas de ar em

paralelo, sendo transmitida à perna através de uma placa de aço (placa de encosto), que está dotada de dois batentes para limitar a abertura e fecho das almofadas, e dois parafusos de imobilização que facilitam a montagem e evitam que se desvie daquela posição durante o ensaio. A força de reacção é transmitida ao suporte por intermédio da placa de reacção e de dois tirantes rotulados. Cada tirante está munido de um esticador que permite ajustar o seu comprimento aos das pernas dos provetes a ensaiar.

O circuito pneumático (Figura 3.18) utilizado para alimentar as almofadas de ar tem origem num compressor com um reservatório de 24 L de capacidade e respectivos acessórios de manobra. A pressão de funcionamento, para se atingir a força axial pretendida, é de 8 bar. O volume total do circuito, que inclui o depósito, assegura que as variações de volume das almofadas que ocorrem durante o ensaio não se traduzem em variações significativas da pressão e consequentemente da força aplicada.

A aplicação da deformação na extremidade da perna da asna faz-se através de uma **alonga rotulada**, cujo comprimento (600 mm) foi estudado por forma a minimizar as variações de carga axial durante o ensaio devido à variação da geometria da ligação. Pela mesma razão, os eixos verticais das rótulas da alonga devem estar desalinhados de 7,5 mm na posição inicial do ensaio. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamentos, sendo os parâmetros introduzidas na consola do equipamento.



**Figura 3.18** - Circuito pneumático para aplicação da carga axial na perna (adaptado do esquema original de F. Oliveira)

### 3.3.2.2 Medições e verificações/calibrações

As grandezas medidas durante os ensaios foram a força exercida pelas almofadas de ar (de formas indirecta), a força exercida pelo actuador (por intermédio de um transdutor de força instalado entre a haste do actuador e a alonga metálica), o deslocamento do actuador (através do sensor instalado no próprio actuador), a pressão no circuito de ar (utilizando um transdutor de pressão) e os deslocamentos de alguns pontos na zona dos entalhes (com três transdutores de deslocamento do tipo *LVD7*).

O **valor da força axial exercida na perna** é obtido por via indirecta a partir da pressão interna instalada nas almofadas de ar e da sua geometria. O fabricante (Parker 2006) indicava que para se atingirem os 15 kN seria necessário instalar uma pressão interna de aproximadamente 7,5 bar com uma altura das almofadas de 55 mm. No entanto, os ensaios realizados às almofadas de ar revelaram que aquelas condições estavam longe de cumprir estes requisitos. Estes ensaios foram efectuados numa máquina de ensaios universal (LPM/EQ07), submetendo o conjunto (composto pela placa de encosto, placa de reacção e almofadas de ar) a diferentes combinações de pressão interna e altura das almofadas de ar e medindo-se as forças de restituição respectivas. Com base nos resultados destes ensaios verificou-se que para se impor a carga axial de 15 kN era necessário instalar uma pressão de 8 bar com uma altura da almofada de ar de 52 mm. Por outro lado, mesmo que durante os ensaios ocorressem deformações nas almofadas, a variação do volume do circuito (almofadas e compressor, em série) seria suficientemente pequena para que não houvesse alterações da sua pressão interna e conseqüente variação significativa das forças de restituição. Por outro lado, as variações de altura das molas durante os ensaios eram reduzidas, para além do que a alteração da altura (a pressão constante) tem menores implicações na força de restituição do que a variação de pressão (com a altura constante).

A **medição da força exercida pelo actuador** tinha de ser realizada com um transdutor que permitisse fazer medições em tracção e em compressão, mas com esta característica apenas estava disponível um transdutor com uma gama nominal de medição até 250 kN. Como o valor máximo esperado da força era inferior a 10 kN, os valores medidos durante os ensaios estavam fora das condições adequadas de funcionamento desse equipamento. Procedeu-se então à verificação do comportamento do transdutor em tracção e em compressão através de um ensaio em que foi colocado o padrão de força de 50 kN do Laboratório de Metrologia de Forças do LNEC em série com o transdutor de força, ligando-se o conjunto ao pavimento. A análise dos resultados permitiu verificar que o transdutor apresenta um bom desempenho entre 2 e 40 kN, com um erro relativo máximo de 1 %.

Foi também verificada a **escala do sensor relativamente à grandeza deslocamento**, colocando-se o actuador em várias posições ao longo da gama de medição (250 mm) e comparando-se os valores lidos na consola do equipamento com os obtidos por intermédio de uma escala graduada com 0,5 mm de resolução. Observou-se uma boa concordância entre as duas medições.

O **transdutor de pressão Druck PDCR 920**, juntamente com a restante cadeia de medição, foi

previamente sujeito a um ensaio de verificação da escala com o padrão de pressão do Laboratório Central de Apoio Metrológico do LNEC.

A utilização dos **LVDTs** (*HBM 1-WA/100MM-T*, *HBM 1-WA/50MM-T* e *HBM 1-WA/20MM-T*) foi realizada segundo as indicações dos respectivos certificados de calibração.

### 3.3.3 Procedimento de ensaio

Os deslocamentos transversais à perna foram impostos a uma velocidade de 0,2 mm/s e a uma distância de aproximadamente 0,950 m do centro geométrico da ligação (intersecção entre os eixos da perna e da linha). A força de compressão de 15 kN aplicada na perna, a que corresponde um nível de tensões de compressão  $\sigma_c$  de cerca de 1,3 MPa, representa o esforço normal de compressão deste elemento nas secções junto ao apoio apenas para as cargas permanentes associadas a uma cobertura tradicional (representado as condições normais de serviço destas ligações).

O procedimento adoptado para o ensaio consiste nos seguintes pontos:

1. fixação da linha da asna ao apoio;
2. colocação da perna na sua posição e ajustamento do comprimento dos tirantes;
3. ajuste da pressão e da altura das almofadas de ar;
4. colocação dos *LVDTs*;
5. posicionamento e fixação da alonga metálica à perna de madeira;
6. imposição de deslocamentos transversais à perna.

A fase de preparação do ensaio (pontos 1 a 5) representou uma quantidade de trabalho entre 1 a 2 pessoa-hora. A duração dos ensaios monotónicos (ponto 6) foi entre 7 a 8 minutos e a dos ensaios cíclicos variou entre 1 e quase 4 horas.

No total foram realizados mais de 110 ensaios (36 cíclicos e cerca de 74 monotónicos).

## 3.4 Resultados

Nos pontos seguintes são apresentados os resultados de ensaios monotónicos das ligações, incluindo a sua resistência, rigidez, modo de rotura, ductilidade e identificação dos principais mecanismos que determinam o comportamento de cada ligação.

As curvas de comportamento apresentadas não correspondem a curvas momento-rotação, mas a curvas força-deslocamento, onde os valores da força são os medidos pelo transdutor montado na haste do actuador e os respectivos valores do deslocamento são os medidos pelo sensor instalado no próprio actuador. De qualquer modo, a configuração do ensaio permite que se considere aproximadamente que  $F = 1$  kN corresponde aproximadamente a  $M = 1$  kN·m e que  $d = 50$  mm corresponde a aproximadamente  $\theta = 3^\circ$ .

### 3.4.1 Definições

#### 3.4.1.1 Comportamento inicial ( $d_y$ , $F_y$ e $k_i$ )

O fim do troço linear inicial é caracterizado pelos valores de deslocamento e força  $d_y$  e  $F_y$ , respectivamente. Os valores apresentados foram obtidos através da aproximação com uma curva bilinear, constituída por um primeiro troço com um declive  $k_i$  igual ao da recta secante à curva do ensaio nos pontos  $(d_{0,1F_{\max}}; F = 0,1 \cdot F_{\max})$  e  $(d_{0,4F_{\max}}; F = 0,4 \cdot F_{\max})$ , tal como estipulado na (EN 12512:2001 + A1:2005), e por um segundo troço ajustado aos dados de forma a minimizar o erro quadrático médio entre a curva bilinear e a curva do ensaio (até à rotura).

A curva bilinear é obtida através de um processo iterativo, baseado nos métodos de “regressão linear segmentada”, que consiste em dividir sucessivamente os dados dos ensaios em dois segmentos e ajustar a cada um deles uma recta, sendo que a curva bilinear adoptada é a que minimiza, neste caso, o erro quadrático médio total (inclui os dois segmentos). A restrição imposta ao declive do troço inicial conduz geralmente a curvas bilineares com um bom ajustamento nessa fase, mas quando o comportamento da ligação se afasta muito do comportamento elasto-plástico ideal, a fase final do ensaio é apenas grosseiramente aproximada.

Na Figura 3.19 é apresentada uma curva  $F-d$  típica e a respectiva curva bilinear.

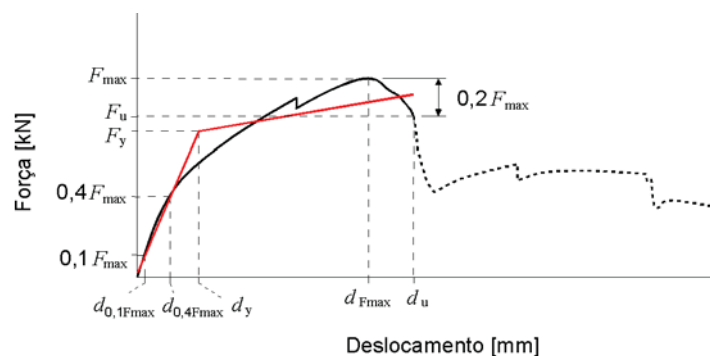


Figura 3.19 - Exemplo de curva  $F-d$  e respectiva curva bilinear

#### 3.4.1.2 Rotura ( $d_u$ e $F_u$ )

As definições de carga última  $F_u$  e do respectivo deslocamento  $d_u$  adoptadas correspondem às situações de rotura súbita da ligação por separação/desencaixe e/ou rotura mecânica dos elementos de madeira ou a uma redução da força actuante superior a 20 % após se atingir a força máxima ( $d_u \geq d_{\max}$  e  $0,8 \cdot F_{\max} \leq F_u \leq F_{\max}$ ). Não é imposto nenhum critério relativo a deslocamentos ou rotações máximas admissíveis.

Nos diagramas força-deslocamento está representado todo o ensaio, mas depois de atingida a carga última  $F_u$  a curva é representada através de uma linha descontínua mais fina.



### 3.4.1.3 Ductilidade estática ( $D$ )

Os valores de ductilidade estática  $D$  apresentados resultam da definição apresentada na expressão (3.1), que corresponde ao rácio entre o deslocamento correspondente ao fim do troço elástico inicial  $d_y$  e o deslocamento último  $d_u$ .

$$D = \frac{d_u}{d_y} \quad (3.1)$$

### 3.4.1.4 Média e desvio padrão

O valor médio  $\bar{x}$  dos resultados dos ensaios de cada configuração foi determinado através da fórmula

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.2)$$

em que  $N$  representa o número de provetes ensaiados e  $x_i$  representa o resultado obtido, para a grandeza em consideração, no ensaio  $i$ .

O valor do desvio padrão  $\sigma_x$  dos resultados dos ensaios de cada configuração foi calculado através da expressão

$$\sigma_x = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.3)$$

onde os símbolos têm os significados já referidos.

## 3.4.2 Ligações simples (sem ferragens e sem respiga)

Nos pontos seguintes são apresentados os resultados dos ensaios das ligações simples, sem respiga e sem ferragens. Na Figura 3.20 apresenta-se uma vista da montagem no início de um destes ensaios.



Figura 3.20 - Vista geral de um ensaio de uma ligação simples

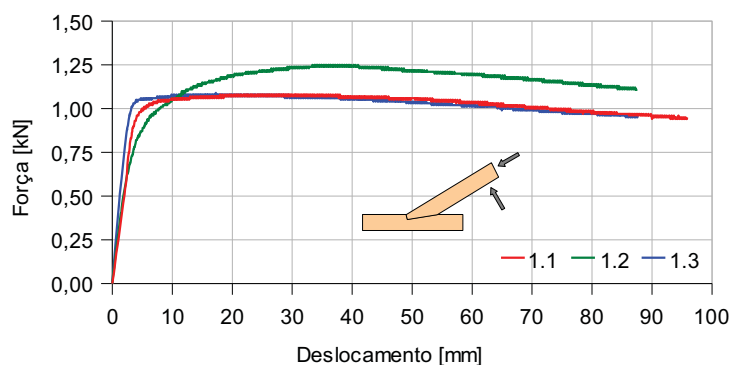
### 3.4.2.1 $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.1 e na Figura 3.21 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações simples, com  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo**, realizados com um teor em água  $w$  de  $12\%$ .



**Quadro 3.1** - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 12\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

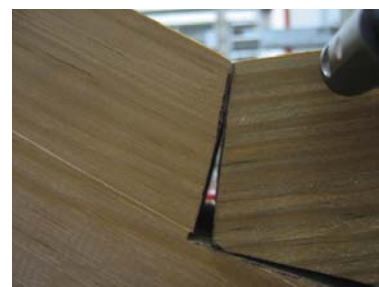
Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{Fmax+}$	$F_{max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{i+}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
1.1	1,35	10	4,4	1,1	27,5	1,1	95,5	0,9	0,25	21,9
1.2	1,26	12	4,4	1,2	36,0	1,2	87,4	1,1	0,26	19,7
1.3	1,27	13	2,7	1,1	17,2	1,1	87,2	1,0	0,41	32,3
<b>Média</b>	<b>1,29</b>	<b>12</b>	<b>3,8</b>	<b>1,1</b>	<b>26,9</b>	<b>1,1</b>	<b>90,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,30</b>	<b>24,6</b>
Desv. padrão	0,05	2	1,0	0,0	9,4	0,1	4,7	0,1	0,09	6,8



**Figura 3.21** - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo



**Figura 3.22** - Sequência (ligação 1.3): a) início do ensaio ; b) durante o ensaio



**Figura 3.23** - Pormenor (ligação 1.3): redução da área de contacto na face frontal do entalhe

No sentido de abrir o ângulo, os ensaios mostram que o contacto entre os elementos é assegurado apenas pela zona frontal do entalhe (Figura 3.22). Essa área de contacto vai-se reduzindo progressivamente durante o ensaio até ocupar apenas cerca de 1/3 da área de contacto inicial (Figura 3.23).

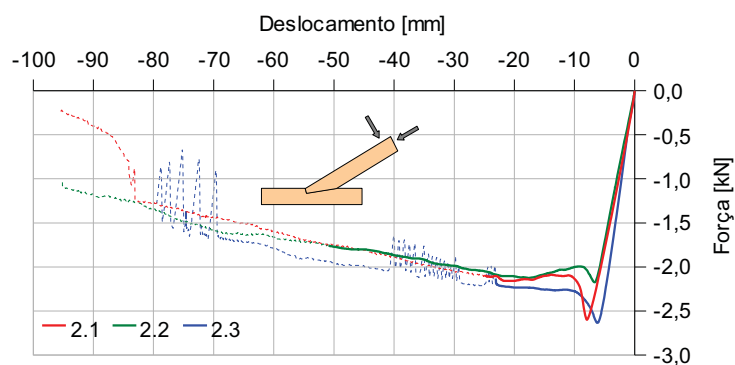
As ligações apresentam curvas de comportamento com dois segmentos bem definidos: um troço elástico linear inicial, seguido de um longo patamar em que a rigidez é praticamente nula. Não ocorreu o desencaixe das peças e o fim dos ensaios foi apenas determinado pelas limitações de curso do equipamento.

O centro de rotação da perna situa-se na face frontal do entalhe e desloca-se para o canto superior dos elementos à medida que a área de contacto se reduz.

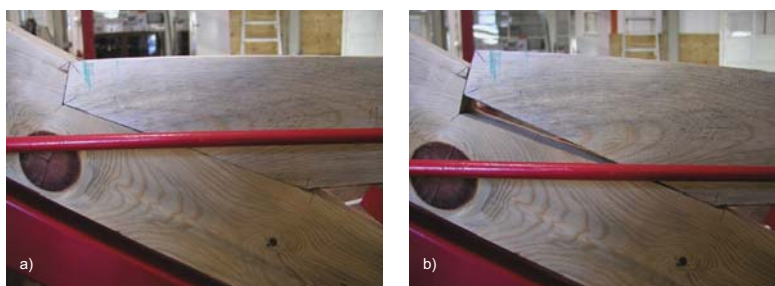
No Quadro 3.2 e na Figura 3.24 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações simples com  $t_v = 45$  mm, no sentido de **fechar o ângulo**, para um teor em água de 12 %.

**Quadro 3.2** - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 12$  % e  $t_v = 45$  mm, a fechar o ângulo

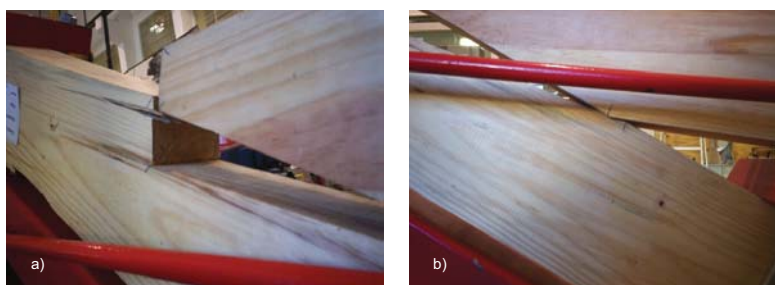
Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
2.1	1,35	10	-6,4	-2,3	-8,0	-2,6	-24,9	-2,1	0,36	3,9
2.2	1,26	12	-6,6	-2,1	-6,6	-2,2	-50,9	-1,8	0,33	7,8
2.3	1,27	13	-5,0	-2,4	-6,2	-2,6	-23,1	-2,1	0,49	4,7
<b>Média</b>	<b>1,29</b>	<b>12</b>	<b>-6,0</b>	<b>-2,3</b>	<b>-6,9</b>	<b>-2,5</b>	<b>-33,0</b>	<b>-2,0</b>	<b>0,39</b>	<b>5,4</b>
Desv. padrão	0,05	2	0,9	0,1	0,9	0,3	15,6	0,2	0,09	2



**Figura 3.24** - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 12$  %,  $t_v = 45$  mm, ensaios a fechar o ângulo



**Figura 3.25** - Sequência (ligação 2.2): a) início do ensaio ; b) durante o ensaio



**Figura 3.26** - Pormenores (ligação 2.1): a) ruptura por tracção perpendicular às fibras na face frontal do entalhe; b) esmagamento na zona posterior do entalhe

Quando o ângulo fecha, a perna roda em torno do vértice na parte posterior do entalhe (Figura 3.25), onde se concentra o esmagamento da madeira em compressão perpendicular às fibras (Figura 3.26 b)), observando-se um deslizamento relativo das superfícies na parte frontal do entalhe. O atrito mobilizado pelo movimento relativo na face frontal do entalhe induz tensões tangenciais na superfície que se traduzem, por equilíbrio, em tensões perpendiculares às fibras na madeira, o que num dos casos resultou na rotura da linha (Figura 3.26 a)). Esta rotura “precoce” conduziu a que a força máxima atingida pela ligação 2.1 fosse inferior (~15 %) às dos outros ensaios.

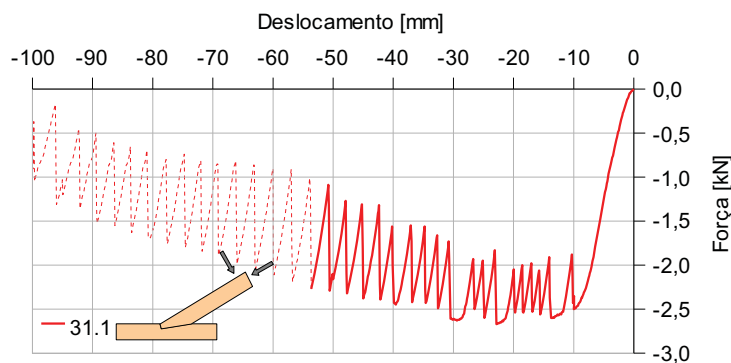
A curva de comportamento (Figura 3.24) apresenta um troço linear inicial até ocorrer o primeiro deslizamento no entalhe. A partir desse instante há uma redução brusca da força transversal aplicada e uma redução da rigidez que conduz a uma perda gradual da força transversal aplicada.

A rotura ocorre porque a ligação perde capacidade de manter a força máxima atingida e o desencaixe das peças só ocorre para níveis de deslocamento transversal imposto muito superiores.

Foi também realizado um ensaio no sentido de fechar o ângulo a uma ligação que tinha sido anteriormente ensaiada a abrir o ângulo (durante a fase de testes do equipamento). Os resultados mostram que a curva de comportamento  $F-d$  apresenta um padrão de “dentes de serra”, consequência de sucessivos deslizamentos na face frontal do entalhe. Após cada movimento a ligação recuperou para níveis de força semelhantes aos que estavam instalados antes do escorregamento. Por ser apenas um ensaio, nada se pode concluir sobre se este efeito se deve a diferenças nos coeficientes de atrito estático e dinâmico, devido ao anterior esmagamento das fibras nas superfícies de contacto (criando uma superfície com relevos nos anéis de Outono e rebaixos nos de Primavera), ou simplesmente a diferenças no rigor de execução dos entalhes.

**Quadro 3.3** - Resultado do ensaio de ligação simples (sem ferragens e sem respiga) anteriormente ensaiada a abrir o ângulo,  $w = 12\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a fechar o ângulo

	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
31.1	1,26	12	-8,6	-2,5	-21,9	-2,6	-53,7	-2,3	0,29	6,2



**Figura 3.27** - Ligação simples (sem ferragens e sem respiga) anteriormente ensaiada a abrir o ângulo,  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaio a fechar o ângulo

### 3.4.2.2 $w = 12\%$ e $t_v = 30\text{ mm}$

No Quadro 3.4 e na Figura 3.28 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações simples com  $t_v = 30\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo**, para um teor em água de 12 %.

**Quadro 3.4** - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 12\%$  e  $t_v = 30\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{Fmax+}$	$F_{max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{i+}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
31.2	1,26	12	3,0	1,1	27,1	1,2	92,1	1,0	0,38	31,0
31.3	1,27	12	5,2	1,1	30,3	1,1	91,7	1,0	0,21	17,5
<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>12</b>	<b>4,1</b>	<b>1,1</b>	<b>28,7</b>	<b>1,1</b>	<b>91,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,30</b>	<b>24,3</b>
Desv. padrão	0,00	0	1,6	0,0	2,3	0,0	0,3	0,0	0,12	9,6

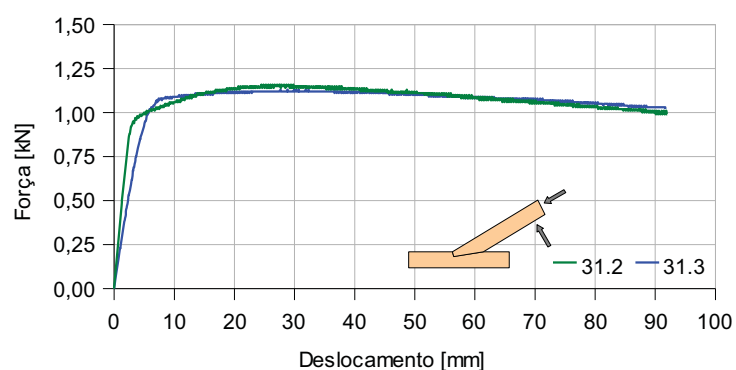


Figura 3.28 - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 12\%$ ,  $t_v = 30\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo

Os mecanismos responsáveis pelo comportamento das ligações são idênticos aos descritos para as ligações com  $t_v = 45\text{ mm}$ , verificando-se igualmente uma redução progressiva da área de contacto na face frontal do entalhe (Figura 3.30).



Figura 3.29 - Sequência (ligação 31.2): a) início do ensaio ; b) fim o ensaio

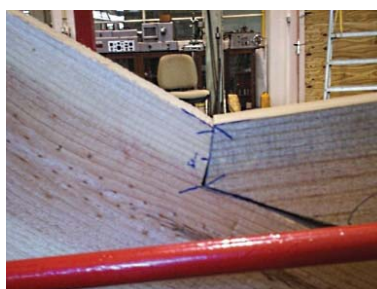
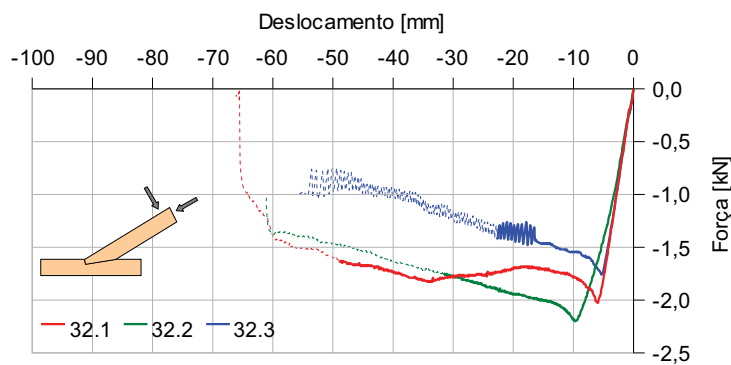


Figura 3.30 - Pormenor (ligação 31.2): área de contacto, na face frontal do entalhe, vai-se reduzindo

No Quadro 3.5 e na Figura 3.31 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações simples com  $t_v = 30$  mm, no sentido de **fechar o ângulo**, para um teor em água de 12 %.

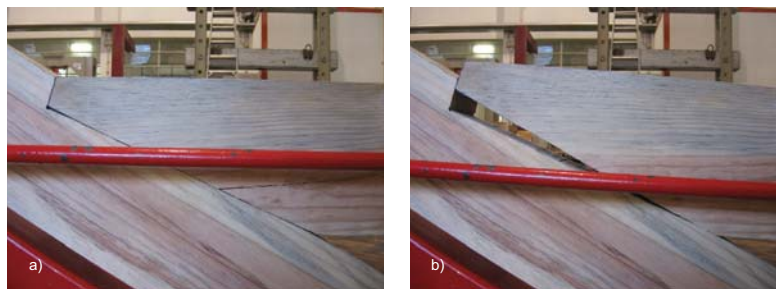
**Quadro 3.5** - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 12$  % e  $t_v = 30$  mm, a fechar o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
32.1	1,27	12	-4,9	-1,8	-6,0	-2,0	-48,9	-1,6	0,37	9,9
32.2	1,27	14	-6,7	-2,1	-9,7	-2,2	-31,7	-1,8	0,32	4,7
32.3	1,27	15	-4,8	-1,7	-5,4	-1,7	-22,7	-1,4	0,35	4,7
<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>14</b>	<b>-5,5</b>	<b>-1,9</b>	<b>-7,1</b>	<b>-2,0</b>	<b>-34,4</b>	<b>-1,6</b>	<b>0,34</b>	<b>6,5</b>
Desv. padrão	0,00	2	1,1	0,2	2,3	0,2	13,3	0,2	0,02	3,0



**Figura 3.31** - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 12$  %,  $t_v = 30$  mm, ensaios a fechar o ângulo

Observou-se que o comportamento era semelhante ao das ligações com  $t_v = 45$  mm, com a diferença de o desencaixe das peças ocorrer para um nível de rotação inferior, uma vez que a profundidade do entalhe é menor.



**Figura 3.32** - Sequência (ligação 32.3): a) início do ensaio ; b) fim o ensaio

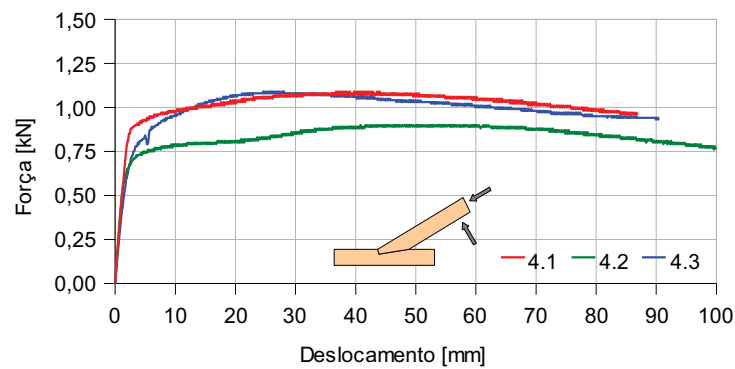
### 3.4.2.3 $w = 20\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.6 e na Figura 3.33 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações simples com  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo**, para um teor em água de 20%.

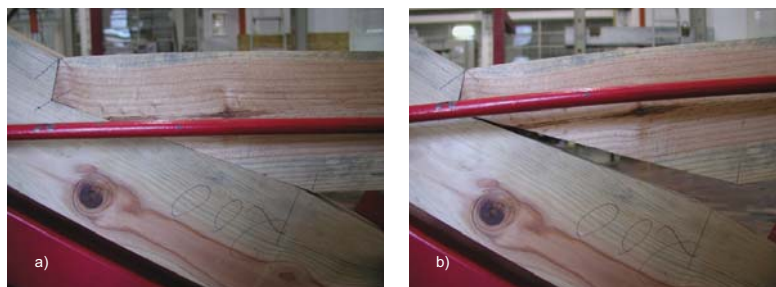
O comportamento destas ligações é semelhante ao das ligações com  $w = 12\%$ , com compressão localizada no dente e redução progressiva da área de contacto.

**Quadro 3.6** - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga), MC = 20% e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{F_{max+}}$	$F_{max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{i+}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
4.1	1,26	18	2,3	1,0	37,5	1,1	86,9	1,0	0,44	37,5
4.2	1,26	19	1,8	0,8	48,5	0,9	100,0	0,8	0,47	56,8
4.3	1,27	20	3,0	1,0	25,8	1,1	90,5	0,9	0,34	30,0
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>19</b>	<b>2,4</b>	<b>1,0</b>	<b>37,3</b>	<b>1,0</b>	<b>92,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,42</b>	<b>41,4</b>
Desv. padrão	0	1	0,6	0,1	11,4	0,1	6,8	0,1	0,07	13,8



**Figura 3.33** - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 20\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo



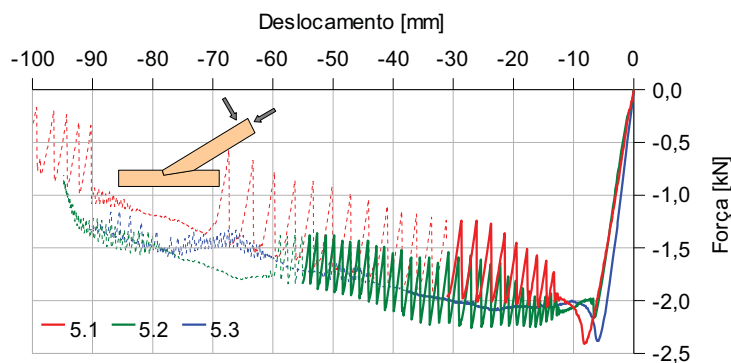
**Figura 3.34** - Sequência (ligação 4.2): a) início do ensaio ; b) fim o ensaio



No Quadro 3.7 e na Figura 3.35 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações simples com  $t_v = 45$  mm, no sentido de **fechar o ângulo**, para um teor em água de 20 %. O comportamento destas ligações é semelhante às da configuração com  $w = 12$  %.

**Quadro 3.7** - Resultados dos ensaios com ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 20$  % e  $t_v = 45$  mm, a fechar o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax-}$	$F_{max-}$	$d_{U-}$	$F_{U-}$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
5.1	1,27	20	-5,8	-2,1	-8,0	-2,4	-31,1	-2,0	0,37	5,4
5.2	1,27	19	-6,5	-2,1	-28,7	-2,2	-55,1	-1,8	0,33	8,5
5.3	1,27	20	-4,6	-2,1	-5,9	-2,4	-37,9	-1,9	0,47	8,3
<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>20</b>	<b>-5,6</b>	<b>-2,1</b>	<b>-14,2</b>	<b>-2,3</b>	<b>-41,4</b>	<b>-1,9</b>	<b>0,39</b>	<b>7,2</b>
Desv. padrão	0,00	1	1,0	0,0	12,6	0,1	12,3	0,1	0,07	2



**Figura 3.35** - Ligações simples (sem ferragens e sem respiga),  $w = 20$  %,  $t_v = 45$  mm, ensaios a fechar o ângulo

Os resultados mostraram um comportamento semelhante ao das ligações com  $w = 12$  %, com um trecho linear inicial seguido de uma perda súbita da força aplicada, que posteriormente continua a reduzir-se. A particularidade encontra-se no padrão “dentes de serra” apresentado pelas ligações 5.1 e 5.2, que segundo McKenzie e Karpovich (1968) se deve ao aumento da diferença entre os coeficientes de atrito estático e dinâmico com o aumento do teor em água. O facto da ligação 5.3 não exibir este comportamento indicia que há outros factores a influenciar este efeito, para além do teor em água, tais como a redução do módulo de elasticidade e da resistência em compressão paralela às fibras com o aumento do teor em água ou eventuais diferenças no rigor de execução das peças.



**Figura 3.36** - Sequência (ligação 5.1): a) início do ensaio ; b) fim do ensaio



**Figura 3.37** - Pormenor (ligação 5.2): rotura localizada da madeira no fim do ensaio

### 3.4.3 Ligações com respiga

Nos pontos seguintes são apresentados os resultados dos ensaios das ligações com respiga. Na Figura 3.38 apresenta-se uma vista da montagem de um ensaio.



Figura 3.38 - Vista geral de um ensaio de uma ligação com respiga

#### 3.4.3.1 $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.8 e na Figura 3.39 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com respiga,  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo**, para um teor em água de 12 %.

Quadro 3.8 - Resultados dos ensaios das ligações com respiga,  $w = 12\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

Ensaíos	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{Fmax+}$	$F_{max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{i+}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
13.1	1,27	12	2,9	1,0	33,6	1,0	92,3	1,0	0,34	32,1
13.2	1,27	12	2,0	0,8	52,5	1,0	86,3	0,9	0,42	42,8
13.3	1,26	13	2,2	1,0	18,7	1,0	88,3	0,9	0,43	39,3
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>12</b>	<b>2,4</b>	<b>0,9</b>	<b>34,9</b>	<b>1,0</b>	<b>89,0</b>	<b>0,9</b>	<b>0,40</b>	<b>38,1</b>
Desv. padrão	0,01	1	0,4	0,1	17,0	0,0	3,1	0,0	0,05	5,5

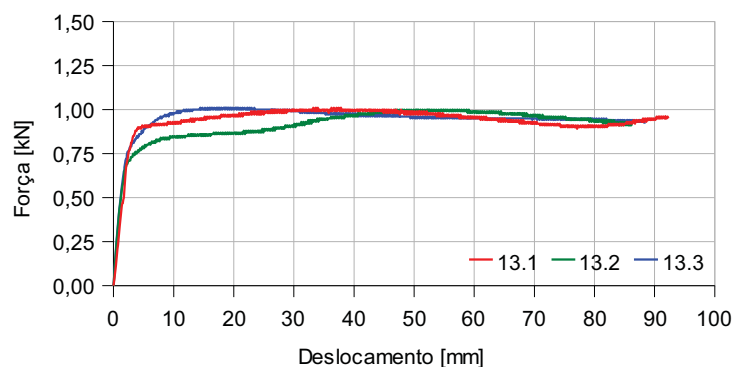


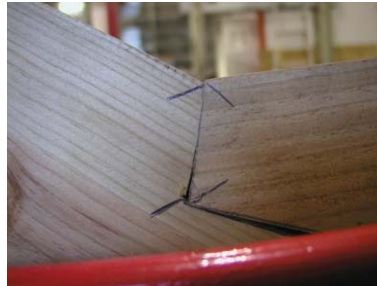
Figura 3.39 - Ligações com respiga,  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo

Nas ligações com respiga, os mecanismos que regem o comportamento da ligação quando o ângulo aumenta são os já identificados para as ligações simples, sem respiga. Nas ligações ensaiadas a 12 % a respiga e a mecha estavam ajustadas, mas sem haver restrição, por atrito, dos movimentos relativos.





**Figura 3.40** - Sequência (ligação 13.2): a) início do ensaio ; b) fim do ensaio

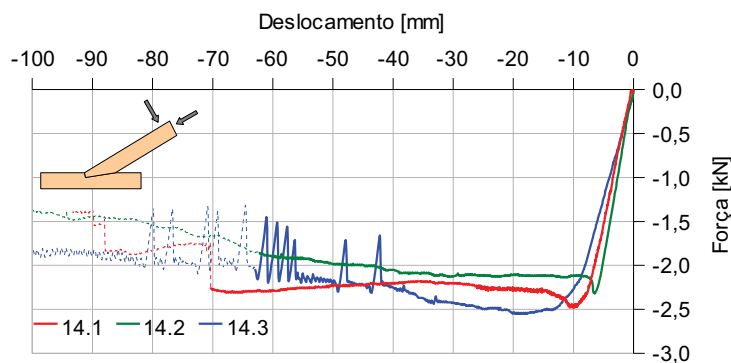


**Figura 3.41** - Pormenor (ligação ): área de contacto, na face frontal do entalhe, vai-se reduzindo (idêntico aos ensaios das ligações sem respiga)

No Quadro 3.9 e na Figura 3.42 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com respiga,  $t_v = 45$  mm, no sentido de **fechar o ângulo**, para um teor em água de 12 %.

**Quadro 3.9** - Resultados dos ensaios das ligações com respiga,  $w = 12$  % e  $t_v = 45$  mm, a fechar o ângulo

	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$	
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]	
<b>Ensaio</b>	<b>14.1</b>	1,27	10	-7,1	-2,3	-10,2	-2,5	-70,3	-2,3	0,32	10,0
	<b>14.2</b>	1,27	12	-5,3	-2,2	-6,3	-2,3	-62,4	-1,9	0,41	11,7
	<b>14.3</b>	1,27	14	-11,1	-2,6	-18,5	-2,5	-63,0	-2,0	0,24	5,7
	<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>12</b>	<b>-7,8</b>	<b>-2,4</b>	<b>-11,7</b>	<b>-2,4</b>	<b>-65,2</b>	<b>-2,1</b>	<b>0,32</b>	<b>9,1</b>
	Desv. padrão	0,00	2	3,0	0,2	6,2	0,1	4,4	0,2	0,09	3,1



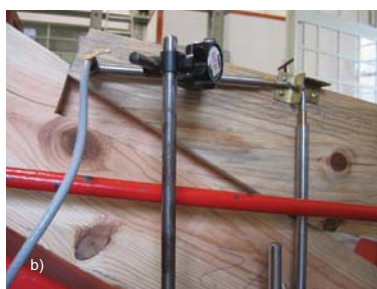
**Figura 3.42** - Ligações com respiga,  $w = 12$  %,  $t_v = 45$  mm, ensaios a fechar o ângulo

Nos ensaios de fechar o ângulo, o comportamento das ligações apresenta um trecho linear inicial seguido de um longo patamar em que a ligação perde totalmente a rigidez e durante o qual ocorrem deslizamentos na face frontal do entalhe. A perna roda em torno do vértice na parte posterior do entalhe, esmagando a madeira em compressão perpendicular às fibras. Nestes ensaios nunca ocorreu o desencaixe das peças, devido ao aumento da área de contacto proporcionado pela respiga.

Na ligação 14.1 a respiga rompeu por tracção perpendicular numa fase inicial do ensaio ( $d \approx 15$  mm), mas apesar disso a ligação manteve o contacto na face frontal do entalhe (Figura 3.44), atingido mesmo assim a força última  $F_u$  mais elevada das três ligações ensaiadas.



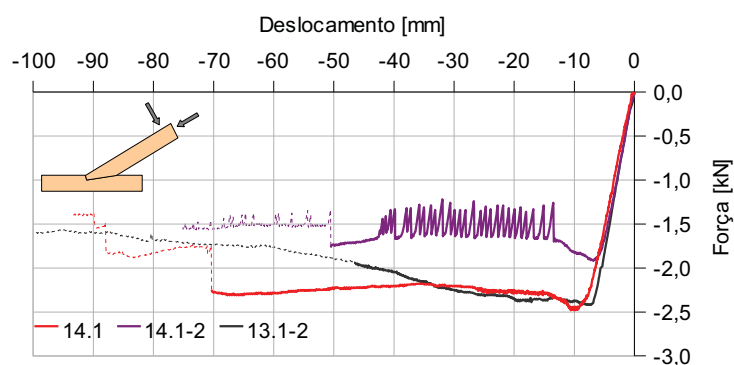
**Figura 3.43** - Sequência (ligação 14.3): a) início do ensaio ; b) fim do ensaio



**Figura 3.44** - Pormenor (ligação 14.1): rotura da respiga por tracção perpendicular às fibras

A ligação 14.1 foi posteriormente ensaiada de novo a fechar o ângulo, sendo observada uma redução de aproximadamente 25 % na resistência e o aparecimento do padrão “dentes de serra” na curva  $F-d$  (Figura 3.45).

A ligação 13.1-2 tinha sido já ensaiada no sentido de abrir o ângulo e ao ser ensaiada a fechar o ângulo não se observaram diferenças significativas na fase inicial do ensaio ( $d < 35-40$  mm) em relação às ligações 14.1, 14.2 e 14.3 (Figura 3.45).



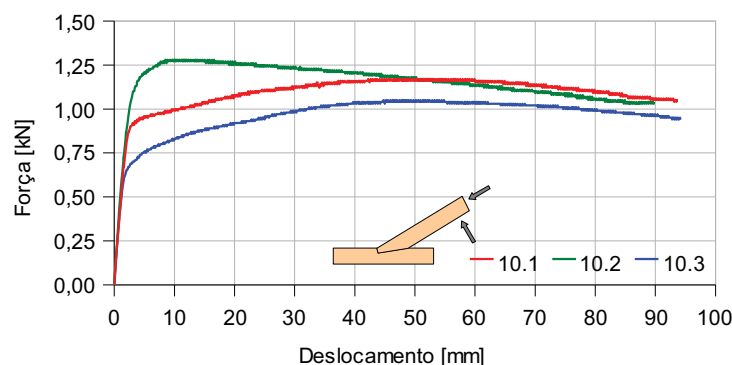
**Figura 3.45** - Ligações com respiga, MC = 12 %,  $t_v = 45$  mm, ensaios a fechar o ângulo de ligações já anteriormente ensaiadas

### 3.4.3.2 $w = 20\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.10 e na Figura 3.46 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com respiga,  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo**, para um teor em água de 20 %.

**Quadro 3.10** - Resultados dos ensaios das ligações com respiga,  $w = 20\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{F_{\max+}}$	$F_{\max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{it}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
10.1	1,27	21	2,5	1,1	49,5	1,2	93,8	1,1	0,43	38,1
10.2	1,27	20	2,6	1,3	10,4	1,3	89,8	1,0	0,49	34,3
10.3	1,27	20	2,1	0,9	47,8	1,0	94,2	0,9	0,43	45,6
<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>20</b>	<b>2,4</b>	<b>1,1</b>	<b>35,9</b>	<b>1,2</b>	<b>92,6</b>	<b>1,0</b>	<b>0,45</b>	<b>39,3</b>
Desv. padrão	0,00	1	0,3	0,2	22,1	0,1	2,4	0,1	0,04	5,8



**Figura 3.46** - Ligações com respiga,  $w = 20\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo

Nestas ligações o comportamento foi semelhante ao das situações sem respiga, com o centro de rotação na face frontal do entalhe e com uma redução progressiva da área de contacto (para  $d \approx 50\text{ mm}$  a área de contacto é cerca de 50 % da inicial e para  $d \approx 75\text{ mm}$  é aproximadamente 30 % (Figura 3.47)). A dispersão dos resultados relativamente ao fim do troço elástico inicial deve-se a diferenças no ajustamento da respiga e da mecha: decorrentes do fabrico das peças e como consequência do inchamento da madeira (as peças foram executadas com  $w \approx 16\%$  e ensaiadas com  $w = 20\%$ ). No caso da ligação 10.2 havia um ajustamento muito apertado no entalhe e a ligação teve que ser montada com recurso a um maço para se encaixarem as peças. O atrito adicional mobilizado, deste modo, nas faces laterais da respiga contribuiu apenas para aumentar a força máxima atingida, mas não provocou alterações na rigidez.

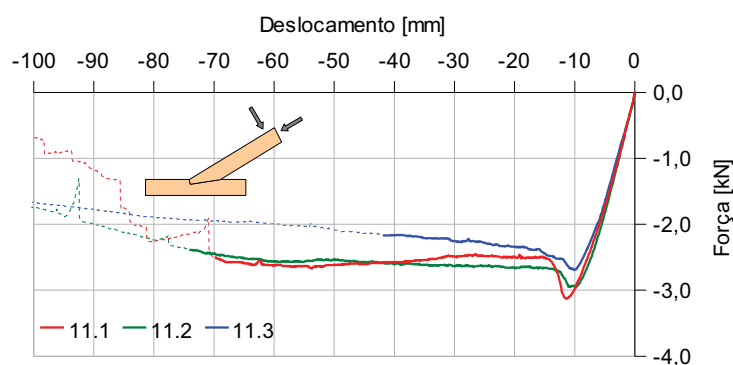


**Figura 3.47** - Pormenor (ligação 10.1): redução da área de contacto na face frontal do entalhe

No Quadro 3.11 e na Figura 3.48 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com respiga,  $t_v = 45$  mm, no sentido de **fechar o ângulo**, para um teor em água de 20 %.

**Quadro 3.11** - Resultados dos ensaios das ligações com respiga,  $w = 20$  % e  $t_v = 45$  mm, a fechar o ângulo

Ensaíos	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
11.1	1,27	19	-7,2	-2,6	-11,3	-3,1	-69,8	-2,5	0,36	9,7
11.2	1,27	19	-7,4	-2,7	-9,9	-2,9	-74,1	-2,4	0,37	10,0
11.3	1,26	19	-8,1	-2,5	-10,1	-2,7	-42,0	-2,2	0,31	5,2
<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>19</b>	<b>-7,6</b>	<b>-2,6</b>	<b>-10,4</b>	<b>-2,9</b>	<b>-62,0</b>	<b>-2,4</b>	<b>0,35</b>	<b>8,3</b>
Desv. padrão	0,00	0	0,5	0,1	0,8	0,2	17,4	0,2	0,03	2,7



**Figura 3.48** - Ligações com respiga,  $w = 20$  %,  $t_v = 45$  mm, ensaios a fechar o ângulo



**Figura 3.49** - Sequência (ligação 11.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio



**Figura 3.50** - Pormenor (ligação 11.1): rotura da respiga

No sentido de fechar o ângulo as ligações rodam em torno do vértice da parte posterior do entalhe, com esmagamento da madeira, enquanto que na face frontal há um deslizamento relativo das superfícies em contacto, que tem início após a fase inicial em que a ligação exibiu um comportamento linear. Após este troço linear inicial as ligações perderam totalmente a rigidez, mantendo a capacidade resistente durante um segmento bastante longo, sem que as peças se desencaixassem.

Apenas na ligação 11.1 se observou a rotura da respiga (Figura 3.50), mas já numa fase bastante avançada do ensaio ( $d \approx 70$  mm). Esta rotura deveu-se ao facto de as tensões estarem a ser essencialmente transmitidas através da respiga e não do dente, devido a uma imperfeição na mecha que estava mais saliente que a zona frontal do entalhe, encaminhando a transmissão das tensões de compressão através da respiga e não da parte frontal do entalhe.

### 3.4.4 Ligações com esquadros metálicos

Nos pontos seguintes são apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos. Na Figura 3.51 apresenta-se uma vista geral do ensaio de uma ligação.



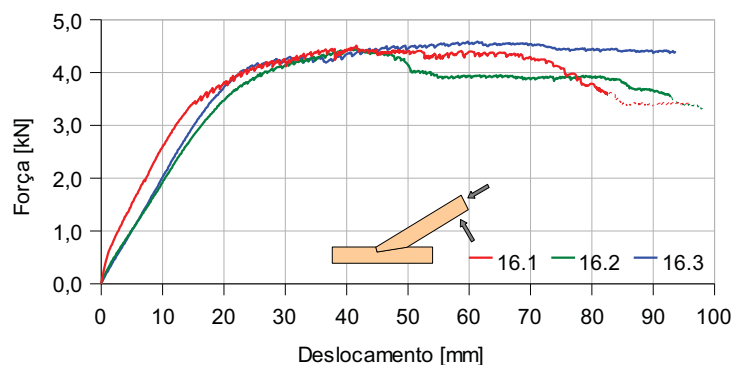
**Figura 3.51** - Vista geral de um ensaio de uma ligação com esquadros metálicos

#### 3.4.4.1 Esquadros aplicados antes de $N$ , $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.12 e na Figura 3.52 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, aplicados antes do carregamento axial da perna, com  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo** e para um teor em água de  $12\%$ .

**Quadro 3.12** - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados antes de  $N$ ,  $w = 12\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{Fmax+}$	$F_{max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{it}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
16.1	1,27	12	18,5	4,4	41,4	4,5	82,5	3,6	0,24	4,4
16.2	1,27	13	24,2	4,3	41,7	4,4	92,9	3,6	0,18	3,8
16.3	1,26	13	21,6	4,3	61,6	4,6	93,6	4,4	0,20	4,3
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>13</b>	<b>21,5</b>	<b>4,3</b>	<b>48,2</b>	<b>4,5</b>	<b>89,7</b>	<b>3,9</b>	<b>0,20</b>	<b>4,2</b>
Desv. padrão	0,0o	1	2,9	0,1	11,6	0,1	6,2	0,5	0,03	0,3



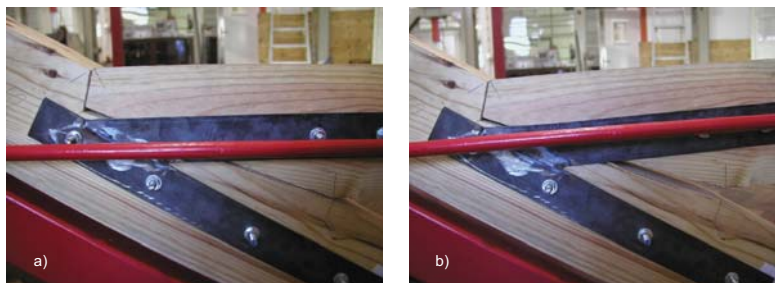
**Figura 3.52** - Ligações com esquadros metálicos aplicados antes de  $N$ ,  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo

As ligações com esquadros metálicos a abrir o ângulo apresentaram um comportamento com um trecho linear inicial seguido de um longo patamar em que exibiram uma rigidez quase nula, mantendo praticamente constante a força aplicada. Ao longo deste último trecho pode-se observar o efeito de “dentes de serra”, que se deve a deslizamentos entre os esquadros e as peças (a já

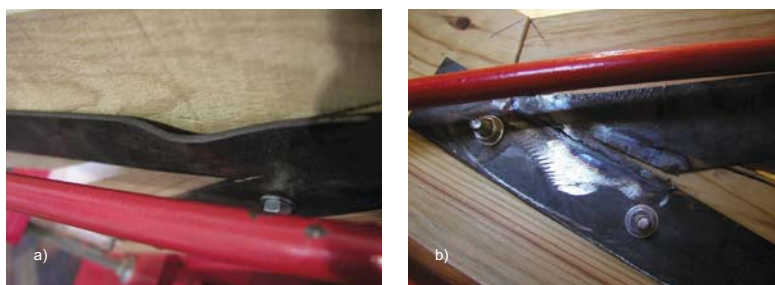


referida montagem dos esquadros com as peças em carga exigiu que os furos, nos esquadros e na madeira, tivessem diâmetros superiores aos admitidos pelo EC5).

A rotura ocorreu por instabilização das barras dos esquadros e/ou rotura das soldaduras (Figura 3.54), mas mesmo nesses casos as ligações mantiveram, quase sempre, a sua capacidade resistente até ao fim dos ensaios.



**Figura 3.53** - Sequência (ligação 16.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio



**Figura 3.54** - Pormenores (ligação 16.2): a) instabilização de uma barra do esquadro; b) rotura da soldadura

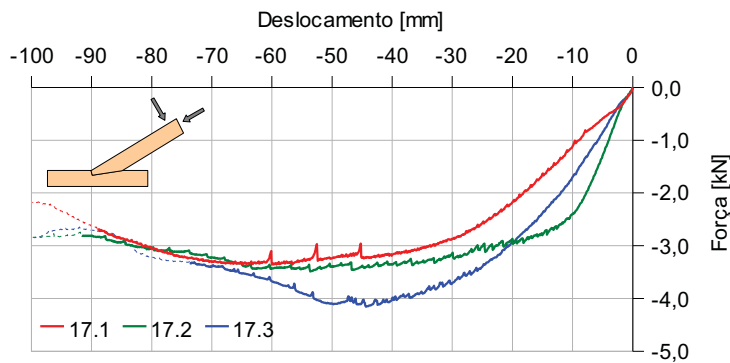
No Quadro 3.13 e na Figura 3.55 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, aplicados antes do carregamento axial da perna, com  $t_v = 45$  mm, no sentido de **fechar o ângulo** e para um teor em água de 12 %.

**Quadro 3.13** - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos,  $w = 12$  % e  $t_v = 45$  mm, a fechar o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
17.1	1,28	10	-32,7	-3,3	-59,6	-3,3	-89,0	-2,7	0,10	2,7
17.2	1,27	13	-10,4	-3,1	-53,3	-3,5	-91,8	-2,8	0,30	8,8
17.3	1,25	13	-21,7	-3,8	-44,0	-4,1	-73,6	-3,3	0,18	3,4
<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>12</b>	<b>-21,6</b>	<b>-3,4</b>	<b>-52,3</b>	<b>-3,7</b>	<b>-84,8</b>	<b>-2,9</b>	<b>0,19</b>	<b>5,0</b>
Desv. padrão	0,01	2	11,2	0,4	7,8	0,4	9,8	0,3	0,10	3,3

A fechar o ângulo o comportamento das ligações caracteriza-se por a linha rodar em torno do vértice da parte posterior do entalhe (Figura 3.57 a)), esmagando a madeira, e haver deslizamentos na face frontal. Estas ligações apresentaram uma maior dispersão de resultados na fase inicial do ensaio, essencialmente devido pequenas folgas entre as peças, tanto na face frontal

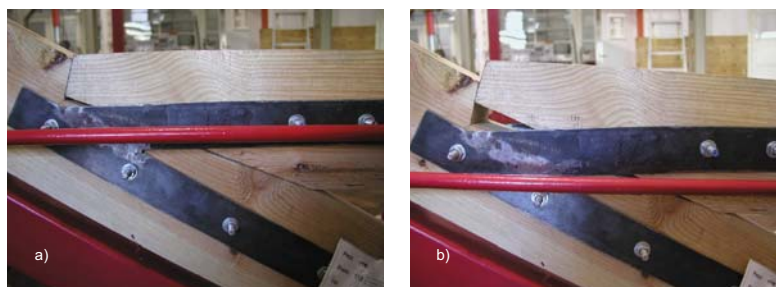
como na zona posterior do entalhe.



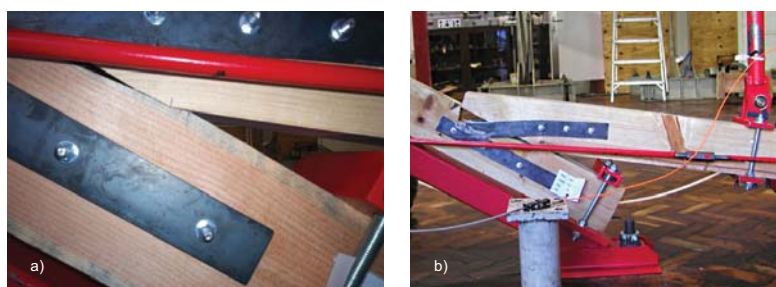
**Figura 3.55** - Ligações com esquadros metálicos aplicados antes de  $N$ ,  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a fechar o ângulo

As curvas  $F-d$  apresentam uma fase inicial linear seguida de uma fase em que há um decréscimo significativo da rigidez até se atingir a força máxima, após o que a força aplicada se reduz progressivamente até à rotura (força aplicada reduz-se abaixo de 80 % da força máxima atingida).

Na fase final dos ensaios os esquadros ficaram deformados, tendo-se observado a formação de uma rótula plástica após o último parafuso da linha (mais perto do entalhe) (Figura 3.57 b)). Os parafusos não apresentavam danos, nem as peças de madeira mostravam sinais de compressão localizada nos furos (*embedding*).



**Figura 3.56** - Sequência (ligação 17.2): a) início do ensaio; b) durante o ensaio



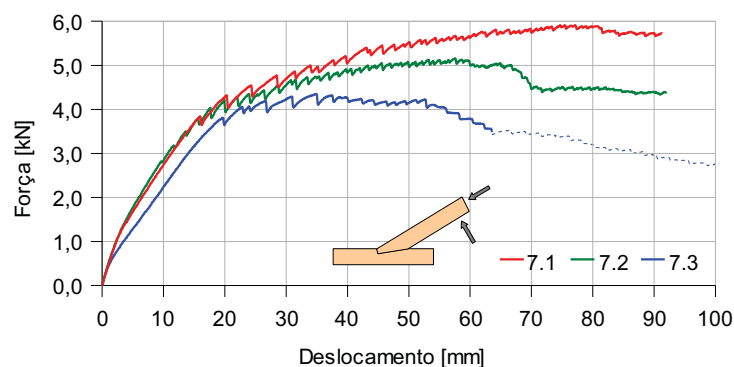
**Figura 3.57** - Pormenores: a) Esmagamento na parte posterior do entalhe (ligação 17.1); b) Deformação dos esquadros (ligação 17.2)

### 3.4.4.2 Esquadros aplicados após $N$ , $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.14 e na Figura 3.58 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, aplicados após o carregamento axial da perna, com  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo** e para um teor em água de  $12\%$ .

**Quadro 3.14** - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados após  $N$ ,  $w = 12\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{Fmax+}$	$F_{max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{i+}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
7.1	1,27	13	18,8	4,6	76,8	5,9	91,3	5,7	0,24	4,9
7.2	1,26	13	15,7	4,6	57,3	5,1	92,0	4,4	0,29	5,9
7.3	1,26	13	21,7	4,3	34,6	4,3	635	3,5	0,20	2,9
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>13</b>	<b>18,7</b>	<b>4,5</b>	<b>56,2</b>	<b>5,1</b>	<b>82,3</b>	<b>4,5</b>	<b>0,24</b>	<b>4,6</b>
Desv. padrão	0,00	0	3,0	0,2	21,1	0,8	16,2	1,1	0,05	1,5



**Figura 3.58** - Ligações com esquadros metálicos aplicados após  $N$ ,  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo

O ensaio com os esquadros aplicados após o carregamento axial foi complexo e exigiu: o carregamento da ligação sem esquadros, a marcação dos furos, a desmontagem da ligação e execução dos furos, novamente o carregamento da ligação e, finalmente, a montagem dos esquadros.

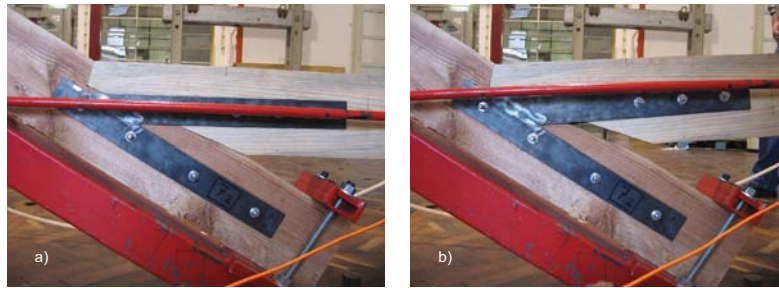
A montagem deste esquadros numa ligação carregada exige um grande rigor na furação das peças e que estas tenham sido executadas com grande exactidão e não apresentem empenos, de modo a que a furação permita aplicar os esquadros nas duas faces. Quando estas condições não se verificam, a alternativa, utilizada neste caso, passa por realizar furos mais largos e, assim, ganhar a folga necessária para conseguir aplicar os esquadros nas duas faces.

Nestas ligações praticamente não há folgas entre os elementos de madeira (são colmatadas com a compressão da perna), pelo que os esquadros só são mobilizados quando se inicia a rotação.

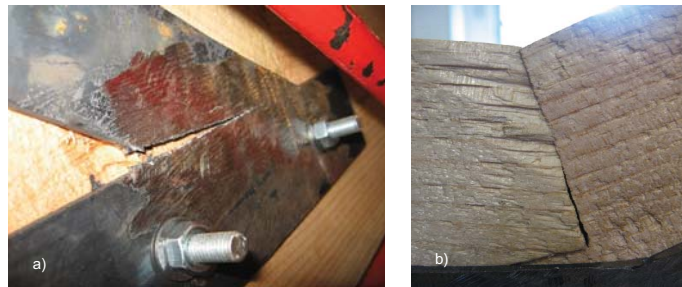
À medida que a rotação aumenta, a perna roda em torno do entalhe frontal, reduzindo-se a área de contacto nessa zona (Figura 3.60 b)). O troço aproximadamente linear inicial termina quando começam a ocorrer deslizamentos entre os esquadros e as peças de madeira, que resultam do excessivo diâmetro dos furos necessário para a montagem dos esquadros.



No final dos ensaios, as ligações apresentavam relativamente poucos danos, à excepção da rotura de algumas soldaduras (Figura 3.60 a)).



**Figura 3.59** - Sequência (ligação 7.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio



**Figura 3.60** - Pormenores (ligação 7.3): a) rotura da soldadura; b) área de contacto, na face frontal do entalhe, vai-se reduzindo (idêntico aos ensaios das ligações simples)

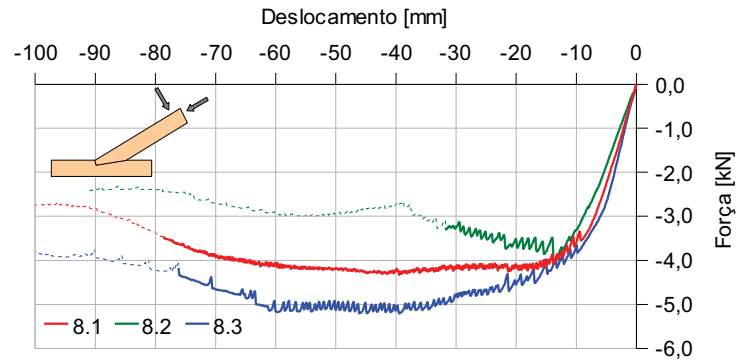
No Quadro 3.15 e na Figura 3.61 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, aplicados após o carregamento axial da perna, com  $t_v = 45$  mm, no sentido de **fechar o ângulo** e para um teor em água de 12 %.

**Quadro 3.15** - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados após  $N$ ,  $w = 12$  % e  $t_v = 45$  mm, a fechar o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
8.1	1,27	13	-8,9	-4,2	-39,1	-4,3	-78,8	-3,5	0,47	8,9
8.2	1,26	12	-10,4	-3,9	-13,4	-4,0	-31,7	-3,3	0,37	3,1
8.3	1,26	13	-7,7	-4,4	-39,2	-5,2	-75,7	-4,4	0,57	9,8
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>13</b>	<b>-9,0</b>	<b>-4,1</b>	<b>-30,6</b>	<b>-4,5</b>	<b>-62,1</b>	<b>-3,7</b>	<b>0,47</b>	<b>7,3</b>
Desv. padrão	0,01	1	1,4	0,3	14,9	0,6	26,3	0,6	0,10	3,7

Estas ligações apresentam um comportamento que se caracteriza por haver uma rotação da perna em torno do vértice da parte posterior do entalhe, com esmagamento da madeira, e deslizamentos entre as peças no entalhe frontal.

Após um troço linear inicial, há uma perda gradual de rigidez seguida de um longo patamar com rigidez nula. A perda de rigidez ocorre simultaneamente com os deslizamentos na face frontal do entalhe e entre os esquadros e a madeira, introduzindo na curva  $F-d$  o padrão “dentes de serra”. Observou-se a formação de uma rótula plástica nos esquadros (Figura 3.62 b)).



**Figura 3.61** - Ligações com esquadros metálicos aplicados após  $N$ ,  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45$  mm, ensaios a fechar o ângulo

A rotura das ligações ocorreu para níveis de deslocamento bastante elevado ( $d > \sim 75$  mm) e deveu-se à redução da força aplicada para níveis inferiores a 80 % da força máxima atingida, embora as ligações não apresentassem danos evidentes, para além das deformações dos esquadros. A excepção é a ligação 8.2, em que o colapso ocorreu muito mais cedo ( $d \approx 30$  mm) por tracção perpendicular às fibras no dente da perna (Figura 3.63). Esta rotura deveu-se às tensões geradas pelo atrito nas superfícies em contacto na face frontal do entalhe.



**Figura 3.62** - Sequência (ligação 8.3): a) início do ensaio; b) fim do ensaio



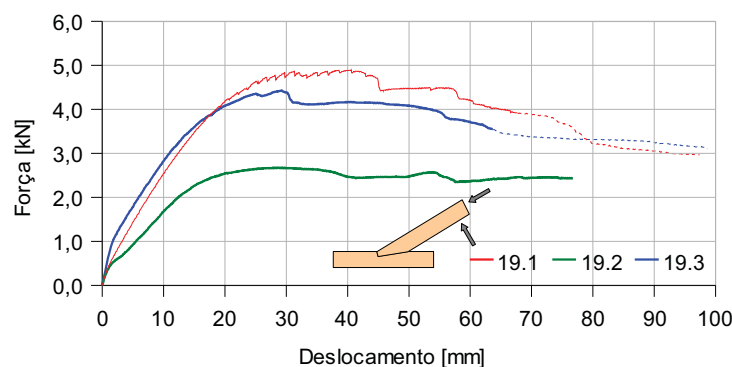
**Figura 3.63** - Pormenor (ligação 8.2): rotura do dente

### 3.4.4.3 Esquadros aplicados antes de $N$ , $w = 20\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.16 e na Figura 3.64 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, aplicados antes do carregamento axial da perna, com  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo** e para um teor em água de  $20\%$ .

**Quadro 3.16** - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados antes de  $N$ ,  $w = 20\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{F_{\max+}}$	$F_{\max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{it}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
19.1	1,26	20	20,1	4,8	40,2	4,9	67,7	3,9	0,24	3,4
19.2	1,27	20	19,7	2,6	28,5	2,7	76,7	2,4	0,13	3,9
19.3	1,27	22	14,8	4,2	29,0	4,4	63,7	3,6	0,29	4,3
<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>21</b>	<b>18,2</b>	<b>3,9</b>	<b>32,6</b>	<b>4,0</b>	<b>69,4</b>	<b>3,3</b>	<b>0,22</b>	<b>3,9</b>
Desv. padrão	0,00	1	3,0	1,1	6,6	1,2	6,7	0,8	0,08	0,5

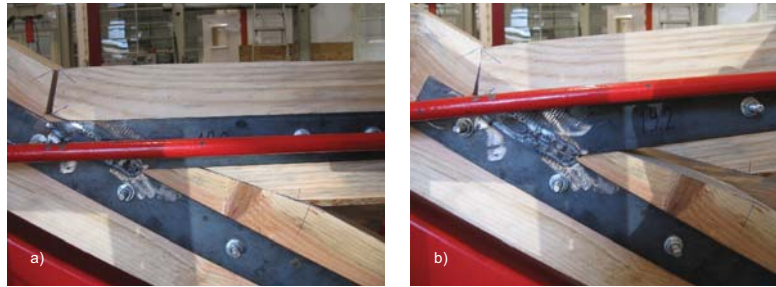


**Figura 3.64** - Ligações com esquadros metálicos aplicados antes de  $N$ ,  $w = 20\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo

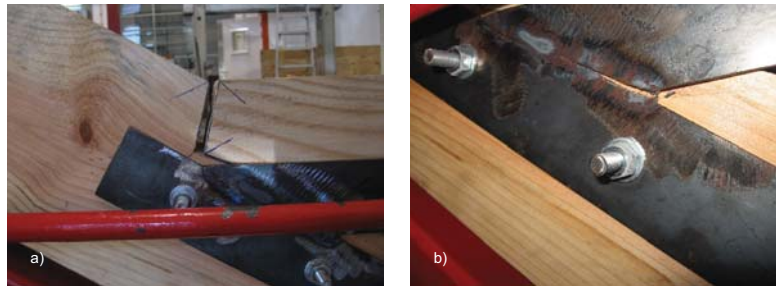
Estas ligações exibem um comportamento semelhante ao das ligações análogas com  $w = 12\%$ , com um trecho inicial linear seguido de uma perda gradual de rigidez até se atingir a força máxima.

As ligações foram montadas quando a madeira apresentava teores em água próximo de  $16\%$  e depois foram condicionadas até perto dos  $8\%$ , altura em que os parafusos dos esquadros foram apertados. Após o inchamento da madeira (com o aumento para  $w = 20\%$ ), os esquadros ficaram muito bem ajustados às peças, praticamente retirando o efeito “dentes de serra” das curvas  $F-d$ . A rotura ocorreu por instabilização dos esquadros e/ou rotura das soldaduras.

As consequências de um mau ajustamento das superfícies nos entalhes é revelado pelos resultados da ligação 19.2. Problemas na montagem desta ligação conduziram a que houvesse folgas significativas nos entalhes (Figura 3.66 a), fazendo com que a transmissão de esforços (compressão e flexão) entre peças fosse apenas assegurada pelos esquadros. Comparativamente às outras ligações, a sua rigidez inicial é inferior em mais de  $50\%$  e a sua resistência é apenas cerca de  $60\%$ .



**Figura 3.65** - Sequência (ligação 19.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio

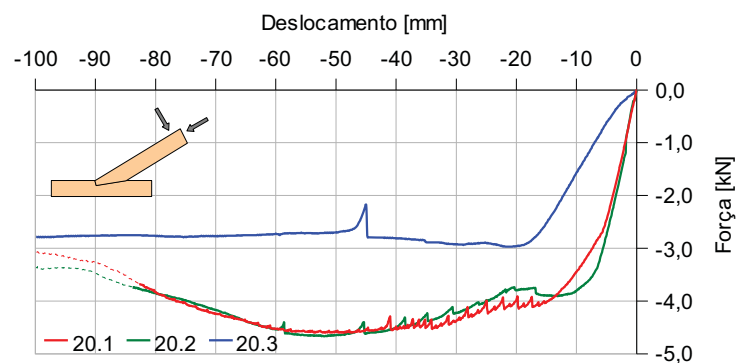


**Figura 3.66** - Pormenores (ligação 19.2): a) folga entre as faces no entalhe; b) rotura da soldadura

No Quadro 3.17 e na Figura 3.67 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, aplicados antes do carregamento axial da perna, com  $t_v = 45$  mm, no sentido de **fechar o ângulo** e para um teor em água de 20 %.

**Quadro 3.17** - Resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos aplicados antes de  $N$ ,  $w = 20$  % e  $t_v = 45$  mm, a fechar o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
20.1	1,26	20	-8,0	-4,1	-49,2	-4,6	-82,8	-3,7	0,52	10,3
20.2	1,27	20	-6,0	-4,0	-51,9	-4,7	-83,9	-3,7	0,67	14,0
20.3	1,27	21	-15,9	-2,9	-21,3	-3,0	-100,0	-2,8	0,18	6,3
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>20</b>	<b>-10,0</b>	<b>-3,7</b>	<b>-40,8</b>	<b>-4,1</b>	<b>-88,9</b>	<b>-3,4</b>	<b>0,45</b>	<b>10,2</b>
Desv. padrão	0,00	1	5,2	0,7	16,9	1,0	9,6	0,5	0,25	3,8

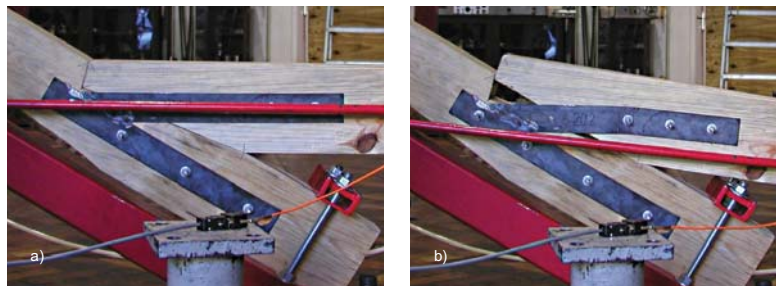


**Figura 3.67** - Ligações com esquadros metálicos aplicados antes de  $N$ ,  $w = 20$  %,  $t_v = 45$  mm, ensaios a fechar o ângulo

O comportamento destas ligações é semelhante ao das ligações com  $w = 12\%$ , com rotação da perna em torno do vértice na parte posterior do entalhe, com esmagamento da madeira, e deslizamentos na zona frontal.

A curva  $F-d$  revela um segmento linear inicial seguido de um trecho não linear em que a rigidez se reduz até zero, após o que se verifica um aumento da resistência, atingindo-se a força máxima para  $d \approx 50$  mm. Observou-se a formação de rótulas plásticas nos esquadros.

A ligação 20.3 apresentava, à semelhança da ligação 19.2, folgas significativas nos entalhes (Figura 3.69), fazendo com que a transmissão de esforços (compressão e flexão) entre a perna e a linha fosse apenas assegurada pelos esquadros. Comparativamente às outras ligações, a sua rigidez inicial é inferior em aproximadamente 30% e a sua resistência é apenas cerca de 65%.



**Figura 3.68** - Sequência (ligação 20.2): a) início do ensaio; b) fim do ensaio



**Figura 3.69** - Pormenor (ligação 20.3): folga entre as faces no entalhe

### 3.4.5 Ligações com braçadeira metálica

Nos pontos seguintes são apresentados os resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica. Na Figura 3.70 apresenta-se uma vista da montagem de um destes ensaio.



Figura 3.70 - Vista geral de um ensaio de uma ligação com braçadeira metálica

#### 3.4.5.1 Braçadeira aplicada antes de $N$ , $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.18 e na Figura 3.71 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica aplicada antes do carregamento axial da perna, com  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo** e para um teor em água de 12 %.

Devido a um problema com o computador do sistema de aquisição, o ficheiro com os dados do ensaio 25.1 ficou corrompido e não pôde ser recuperado. De qualquer modo, a força máxima atingida (segundo as anotações tiradas durante o ensaio) foi cerca de 3,5 kN, o que se enquadra nos resultados obtidos nos outros ensaios.

Quadro 3.18 - Resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica aplicada antes de  $N$ ,  $w = 12\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{Fmax+}$	$F_{max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{i+}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
25.2	1,27	8	15,1	3,7	56,0	5,2	56,5	4,9	0,25	3,7
25.3	1,27	8	10,2	3,4	36,1	4,6	36,2	4,6	0,33	3,5
<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>8</b>	<b>12,6</b>	<b>3,6</b>	<b>46,1</b>	<b>4,9</b>	<b>46,3</b>	<b>4,8</b>	<b>0,29</b>	<b>3,6</b>
Desv. padrão	0,00	0	3,4	0,2	14,1	0,4	14,4	0,2	0,06	0,2

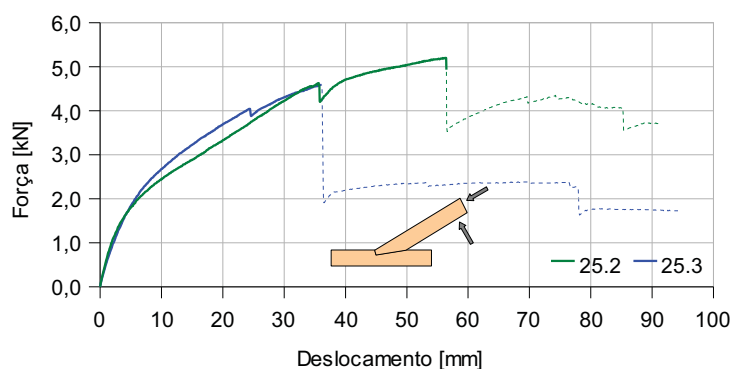


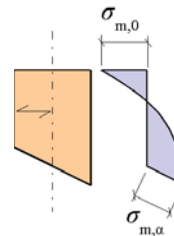
Figura 3.71 - Ligações com braçadeira metálica aplicada antes de  $N$ ,  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo



A braçadeira funciona como um grampo, restringindo as rotações relativas entre as peças. As barras rectangulares espessas são solicitadas em flexão (Figura 3.79 b)) e os varões em tracção, que em conjunto configuram um mecanismo de elevada rigidez e resistência. As ligações com braçadeira exibem um comportamento, no sentido de abrir de ângulo, caracterizado por rotura frágil da madeira na perna (Figura 3.75).

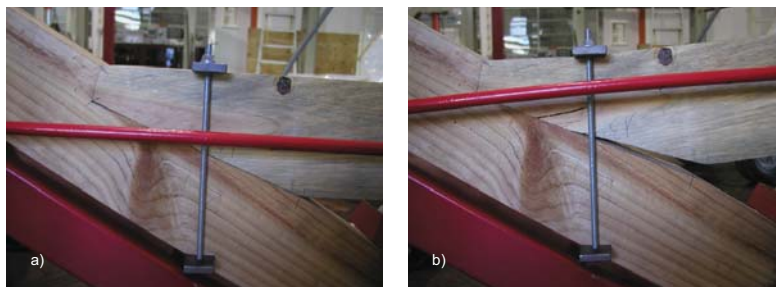


**Figura 3.73** - Diagrama de corpo livre da perna, quando o ângulo tende a abrir, e exemplo de um padrão de rotura

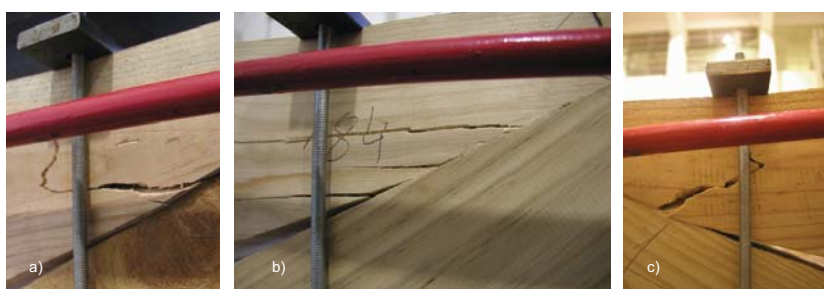


**Figura 3.72** - Tensões de flexão num elemento de secção variável

A braçadeira rigidifica uma zona relativamente pequena da ligação junto à zona frontal do entalhe, concentrando as tensões mais elevadas na zona de secção variável (Figura 3.73). Nos elementos de secção variável em flexão, a distribuição de tensões nas secções transversais tem uma componente perpendicular ao eixo da peça (Figura 3.72), uma vez que as fibras extremas não são paralelas entre si (Porteous e Kermani 2007). Isto induz tensões de tracção perpendicular e tensões de corte paralelo às fibras, que neste caso conduziram à rotura da madeira (Figura 3.75).



**Figura 3.74** - Sequência (ligação 25.1): a) início do ensaio; b) fim do ensaio

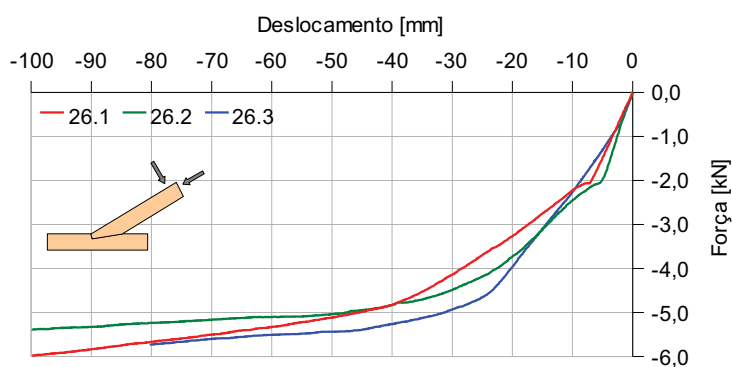


**Figura 3.75** - Pormenores: a) rotura da ligação 25.1; b) rotura da ligação 25.2; c) rotura da ligação 25.3

No Quadro 3.19 e na Figura 3.76 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, aplicados antes do carregamento axial da perna, com  $t_v = 45$  mm, no sentido de **fechar o ângulo** e para um teor em água de 12 %.

**Quadro 3.19** - Resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica aplicada antes de  $N$ ,  $w = 12$  % e  $t_v = 45$  mm, a fechar o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
26.1	1,26	14	-22,6	-4,2	-99,9	-6,0	-100,0	-6,0	0,18	4,4
26.2	1,27	11	-12,8	-4,0	-99,8	-5,4	-100,0	-5,4	0,31	7,8
26.3	1,25	13	-25,3	-5,0	-80,1	-5,7	-80,3	-5,7	0,20	3,2
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>13</b>	<b>-20,2</b>	<b>-4,4</b>	<b>-93,3</b>	<b>-5,7</b>	<b>-93,4</b>	<b>-5,7</b>	<b>0,23</b>	<b>5,1</b>
Desv. padrão	0,01	1	6,6	0,5	11,4	0,3	11,4	0,3	0,07	2,4



**Figura 3.76** - Ligações com braçadeira metálica aplicada antes de  $N$ ,  $w = 12$  %,  $t_v = 45$  mm, ensaios a fechar o ângulo

Ao fechar o ângulo, a perna destas ligações roda em torno do vértice na parte posterior do entalhe e ocorre, logo no início do ensaio, uma perda de contacto entre as superfícies na face frontal do entalhe (Figura 3.79 a)), passando, a partir desse instante, a perna a estar sujeita a flexão e à compressão localizada sob a chapa (Figura 3.79 b)), no vértice da parte posterior do entalhe e na zona de aplicação da carga transversal (Figura 3.77).

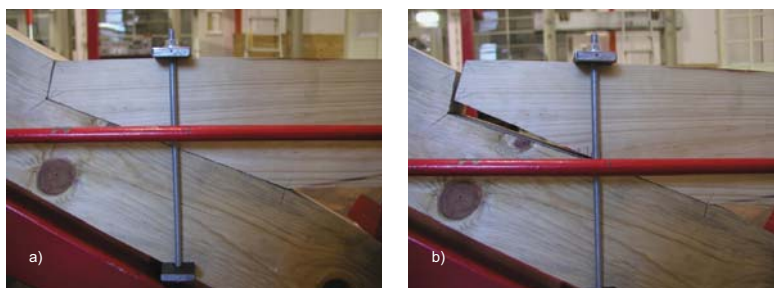


**Figura 3.77** - Diagrama de corpo livre da perna, nos ensaios de fechar o ângulo

Nas curvas  $F-d$  a perda de contacto na zona frontal corresponde ao fim do trecho linear inicial. Uma vez que estas curvas apresentam três segmentos aproximadamente lineares, o processo de ajustar uma curva bilinear para determinar  $d_y$  e  $F_y$  dá resultados um pouco grosseiros.

As propriedades da madeira em compressão perpendicular às fibras reflectem-se nas curvas  $F-d$ , designadamente as grandes deformações atingidas e o facto da força aplicada ser sempre crescente até ao fim do ensaio, pelo que o valor da forças máximas atingidas tem de ser considerado simultaneamente com as enormes deformações que implica.





**Figura 3.78** - Sequência (ligação ): a) início do ensaio; b) durante o ensaio

Outro aspecto que deve ser referido prende-se com a pouca rigidez para fora do plano da ligação que a braçadeira introduz. De facto, após a perda de contacto na zona frontal, a braçadeira não impede que a perna tenha movimentos para fora do plano da ligação (Figura 3.79 c)). As imperfeições iniciais da perna implicaram que a força transversal aplicada tivesse uma componente perpendicular ao plano da ligação, conduzindo à sua instabilização.



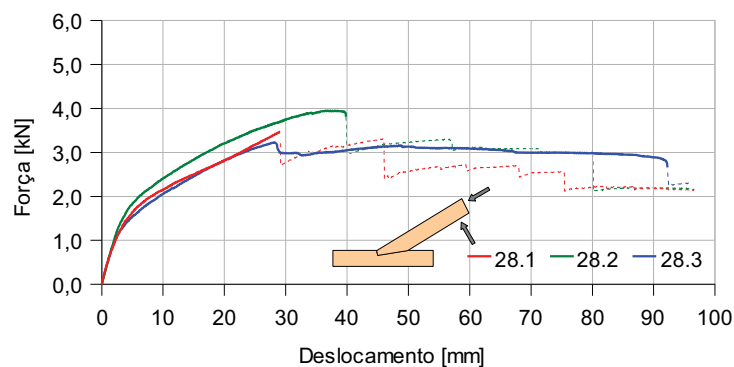
**Figura 3.79** - Pormenores: a) perda de contacto na face frontal do entalhe; b) esmagamento da madeira sob a chapa espessa; c) instabilização lateral da perna.

### 3.4.5.2 Braçadeira aplicada antes de $N$ , $w = 20\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.20 e na Figura 3.80 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, aplicados antes do carregamento axial da perna, com  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **abrir o ângulo** e para um teor em água de  $20\%$ .

**Quadro 3.20** - Resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica aplicada antes de  $N$ ,  $w = 20\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

	$\sigma_c$ [MPa]	$w$ [%]	$d_{y+}$ [mm]	$F_{y+}$ [kN]	$d_{Fmax+}$ [mm]	$F_{max+}$ [kN]	$d_{u+}$ [mm]	$F_{u+}$ [kN]	$k_{it}$ [kN/mm]	$D_+$ [mm/mm]
<b>Ensaio 28.1</b>	1,26	20	4,4	1,5	29,0	3,5	29,1	3,5	0,34	6,7
<b>Ensaio 28.2</b>	1,26	22	5,6	2,2	36,8	3,9	39,8	3,8	0,40	7,2
<b>Ensaio 28.3</b>	1,27	20	7,8	2,7	28,0	3,2	92,2	2,7	0,35	11,9
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>21</b>	<b>5,9</b>	<b>2,1</b>	<b>31,3</b>	<b>3,5</b>	<b>53,7</b>	<b>3,3</b>	<b>0,36</b>	<b>8,6</b>
Desv. padrão	0,01	1	1,7	0,6	4,8	0,4	33,8	0,6	0,03	2,9



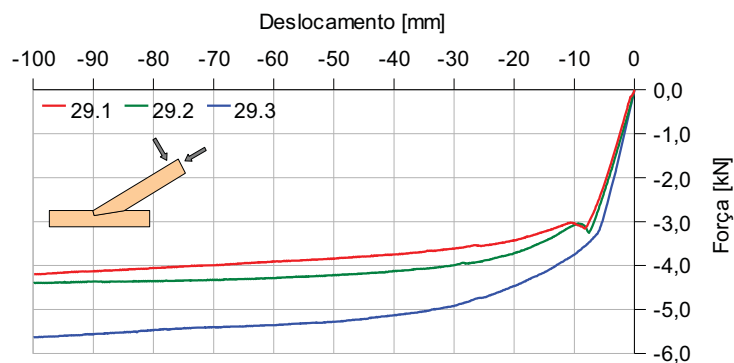
**Figura 3.80** - Ligações com braçadeira metálica aplicadas antes de  $N$ ,  $w = 20\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo

O comportamento destas ligações é idêntico ao descrito para as ligações com  $w = 12\%$ . Tal como no caso das ligações com esquadros metálicos e  $w = 20\%$ , as braçadeiras foram reajustadas quando a madeira se encontrava com  $w \approx 8\%$  e ao aumentar de volume até atingir os  $20\%$ , a madeira foi sendo esmagada sob a barra espessa (antes do ensaio já se notava a rotura por compressão perpendicular).

No Quadro 3.21 e na Figura 3.81 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações com esquadros metálicos, aplicados antes do carregamento axial da perna, com  $t_v = 45\text{ mm}$ , no sentido de **fechar o ângulo** e para um teor em água de  $20\%$ .

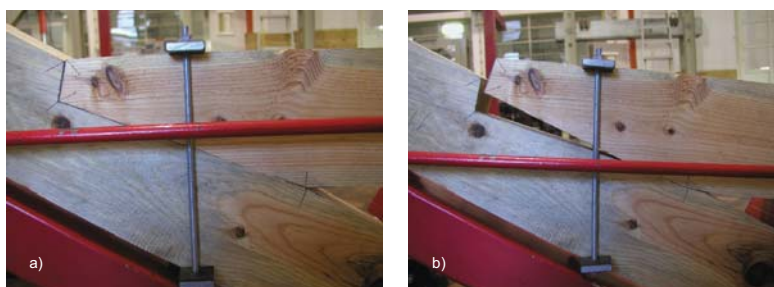
**Quadro 3.21** - Resultados dos ensaios das ligações com braçadeira metálica aplicada antes de  $N$ ,  $w = 20\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a fechar o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y-}$	$F_{y-}$	$d_{Fmax-}$	$F_{max-}$	$d_{u-}$	$F_{u-}$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
29.1	1,26	20	-7,0	-3,3	-100,0	-4,2	-100,0	-4,2	0,47	14,2
29.2	1,27	22	-7,8	-3,6	-100,0	-4,4	-100,0	-4,4	0,46	12,8
29.3	1,27	21	-7,5	-4,3	-100,0	-5,6	-100,0	-5,6	0,58	13,4
<b>Média</b>	<b>1,27</b>	<b>21</b>	<b>-7,4</b>	<b>-3,7</b>	<b>-100,0</b>	<b>-4,8</b>	<b>-100,0</b>	<b>-4,8</b>	<b>0,50</b>	<b>13,5</b>
Desv. padrão	0,00	1	0,4	0,5	0,0	0,8	0,0	0,8	0,07	0,7

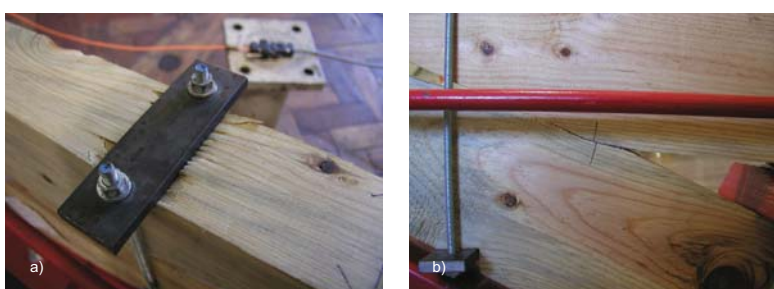


**Figura 3.81** - Ligações com braçadeira metálica aplicada antes de  $N$ ,  $w = 20\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a fechar o ângulo

O comportamento é semelhante ao das ligações com  $w = 12\%$ , com perda de contacto na zona frontal do entalhe (Figura 3.82), esmagamento na zona posterior (Figura 3.83 b)) e esmagamento das fibras sob a chapa (Figura 3.83 a)).



**Figura 3.82** - Sequência (ligação 29.1): a) início do ensaio; b) fim do ensaio



**Figura 3.83** - Pormenores (ligação 29.1): a) esmagamento sob a chapa espessa; b) esmagamento na parte posterior do entalhe

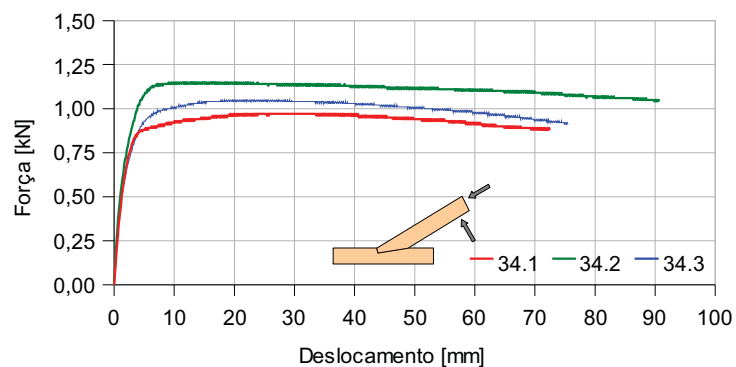
### 3.4.6 Ligações simples (sem respiga nem ferragens) com degradação por caruncho pequeno

#### 3.4.6.1 $w = 12\%$ e $t_v = 45\text{ mm}$

No Quadro 3.22 e na Figura 3.84 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações simples, sem ferragens e sem respiga, com  $t_v = 45\text{ mm}$ , degradação por caruncho pequeno, no sentido de **abrir o ângulo** e para um teor em água de  $12\%$ .

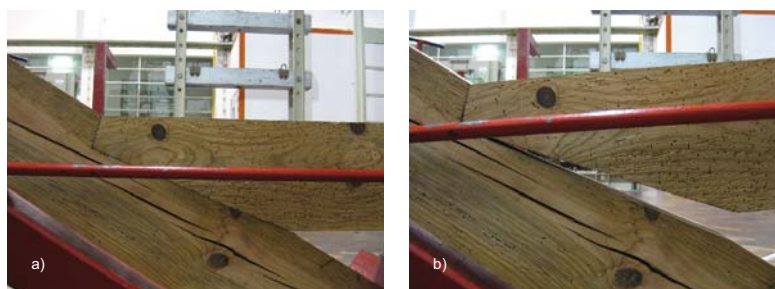
**Quadro 3.22** - Resultados dos ensaios com ligações simples, com degradação por caruncho pequeno,  $w = 12\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a abrir o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_{y+}$	$F_{y+}$	$d_{Fmax+}$	$F_{max+}$	$d_{u+}$	$F_{u+}$	$k_{it}$	$D_+$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
<b>34.1</b>	1,26	13	2,3	0,9	24,2	1,0	72,6	0,9	0,40	30,9
<b>34.2</b>	1,27	13	2,4	1,1	14,1	1,1	90,7	1,0	0,48	37,9
<b>34.3</b>	1,26	13	2,4	1,0	21,5	1,0	75,5	0,9	0,42	31,0
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>13</b>	<b>2,4</b>	<b>1,0</b>	<b>20,0</b>	<b>1,1</b>	<b>79,6</b>	<b>0,9</b>	<b>0,43</b>	<b>33,3</b>
Desv. padrão	0,01	0	0,0	0,1	5,2	0,1	9,7	0,1	0,04	4,0



**Figura 3.84** - Ligações simples, com degradação por caruncho pequeno,  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a abrir o ângulo

O comportamento destas ligações é semelhante ao das ligações executadas com madeira sã, observando-se que a perna roda em torno do entalhe frontal e que a área de contacto se reduz ao longo do ensaio (Figura 3.86).



**Figura 3.85** - Sequência (ligação 34.1): a) início do ensaio; b) fim do ensaio

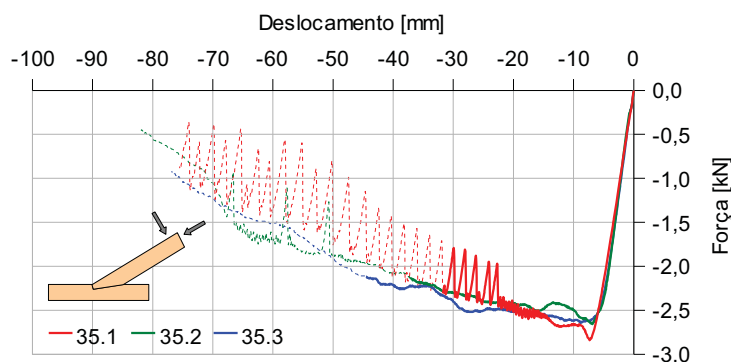


**Figura 3.86** - Pormenor (ligação 34.3): área de contacto, na face frontal do entalhe, vai-se reduzindo (idêntico aos outros ensaios com  $t_v = 45\text{ mm}$ )

No Quadro 3.23 e na Figura 3.87 estão apresentados os resultados dos ensaios das ligações simples, sem ferragens e sem respiga, com  $t_v = 45\text{ mm}$ , degradação intensa por caruncho pequeno, no sentido de **fechar o ângulo** e para um teor em água de  $12\%$ .

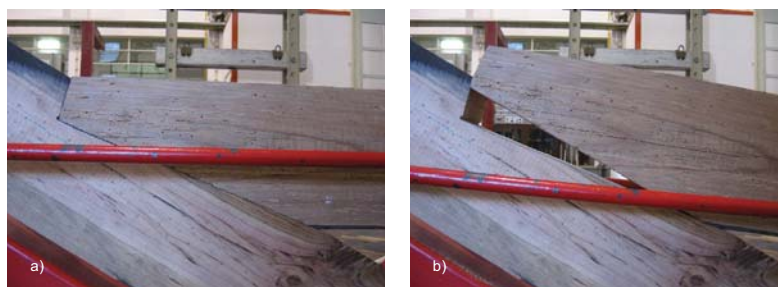
**Quadro 3.23** - Resultados dos ensaios com ligações simples, com degradação por caruncho pequeno,  $w = 12\%$  e  $t_v = 45\text{ mm}$ , a fechar o ângulo

Ensaio	$\sigma_c$	$w$	$d_y$	$F_y$	$d_{Fmax}$	$F_{max}$	$d_u$	$F_u$	$k_i$	$D$
	[MPa]	[%]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[kN/mm]	[mm/mm]
35.1	1,27	12	-6,3	-2,8	-7,3	-2,8	-31,8	-2,3	0,44	5,0
35.2	1,25	13	-5,1	-2,6	-7,0	-2,6	-37,2	-2,1	0,51	7,3
35.3	1,27	12	-5,3	-2,7	-8,7	-2,6	-44,7	-2,1	0,51	8,5
<b>Média</b>	<b>1,26</b>	<b>12</b>	<b>-5,6</b>	<b>-2,7</b>	<b>-7,7</b>	<b>-2,7</b>	<b>-37,9</b>	<b>-2,2</b>	<b>0,49</b>	<b>6,9</b>
Desv. padrão	0,01	1	0,7	0,1	0,9	0,1	6,5	0,1	0,04	1,7



**Figura 3.87** - Ligações simples, com degradação por caruncho pequeno,  $w = 12\%$ ,  $t_v = 45\text{ mm}$ , ensaios a fechar o ângulo

O comportamento destas ligações é semelhante ao das ligações executadas com madeira sã, observando-se que a perna roda em torno do vértice na zona posterior do entalhe, esmagando a madeira, e que ocorrem deslizamentos relativos entre as superfícies na zona frontal do entalhe. Num dos casos observou-se, à semelhança do que ocorreu na ligação 2.1 (Figura 3.26 a)), uma rotura da madeira na linha, por tracção perpendicular às fibras, devido ao atrito mobilizado no entalhe (Figura 3.89).



**Figura 3.88** - Sequência (ligação 35.1): a) início do ensaio; b) fim do ensaio



**Figura 3.89** - Pormenor (ligação 35.2): rotura, por tracção perpendicular, do troço da linha após o entalhe



## 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E APLICAÇÃO DE MODELOS EXISTENTES

### 4.1 Discussão dos resultados

Nos pontos seguintes é apresentada uma análise comparativa do desempenho das várias tipologias ensaiadas, destacando-se os efeitos do teor em água, profundidade do entalhe, presença de respiga, degradação por caruncho pequeno, tipo de ferragens e procedimento de montagem.

#### 4.1.1 Ligações sem ferragens

##### 4.1.1.1 Efeito do teor em água

As curvas de comportamento das ligações simples (sem ferragens e sem respiga), com  $t_v = 45$  mm, para os casos com  $w = 12$  e  $20$  %, são apresentadas na Figura 4.1.

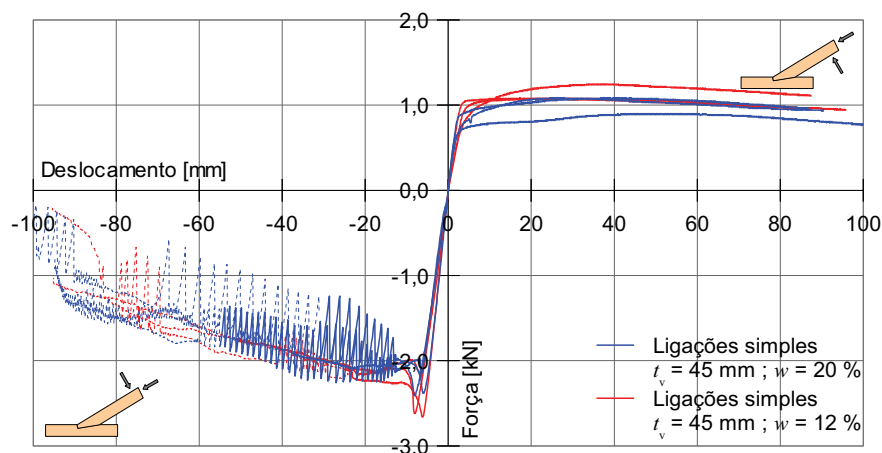


Figura 4.1 - Ligações simples: efeito do teor em água

Quando o ângulo  $\beta$  aumenta, o aumento do teor em água conduz a uma pequena redução da resistência (cerca de 10 %), embora essa diferença não seja significativa face à dispersão dos resultados.

No sentido tido de fechar o ângulo, a principal diferença reside no já referido padrão “dentes de serra” exibido pelas curvas de comportamento das ligações com  $w = 20\%$ . Este efeito pode dever-se à redução da resistência à compressão com o aumento do teor em água, que conduz a um esmagamento diferenciado dos anéis de Primavera face aos anéis de Outono (observado nas superfícies dos entalhes das peças ensaiadas), dando origem a superfícies mais irregulares e dificultando o seu deslizamento relativo. De resto, os valores médios e a dispersão dos resultados dos ensaios, em particular  $k_i$ ,  $F_y$  e  $F_{max}$ , a 12 e a 20 % são muito semelhantes.

#### 4.1.1.2 Efeito da profundidade do entalhe

O efeito da profundidade do entalhe apenas pode ser aferido para as ligações com madeira com 12 % de teor em água. As curvas de comportamento das ligações simples com  $t_v = 30$  e 45 mm são apresentadas na Figura 4.2.

No sentido de abrir o ângulo, a profundidade do entalhe não influencia o desempenho da ligação, uma vez que a área de contacto no entalhe frontal se reduz progressivamente ao longo do ensaio em ambas as tipologias.

No sentido de fechar o ângulo, o modelo de comportamento é semelhante, mas com a redução da profundidade do entalhe (cerca de 33 %) verifica-se uma diminuição dos valores médios da força aplicada no fim do troço linear inicial  $F_y$  (cerca de 18 %), da força máxima aplicada  $F_{max}$  (aproximadamente 20 %), embora o deslocamento último  $d_{Fmax}$  não apresente diferenças significativas (~3 %), e da força última  $F_u$  (também cerca de 20 %). A rigidez inicial também é idêntica em ambos os casos. O desencaixe das peças das ligações com entalhe menos profundo ocorre para deslocamentos impostos muito inferiores ( $d \approx 55$  a 65 mm para  $t_v = 30$  mm e  $d \approx 75$  a 95 mm para  $t_v = 45$  mm). Observa-se uma redução de 1/3 na profundidade do entalhe implicou uma redução de aproximadamente 1/3, em média, no deslocamento transversal que provoca o desencaixe das peças.

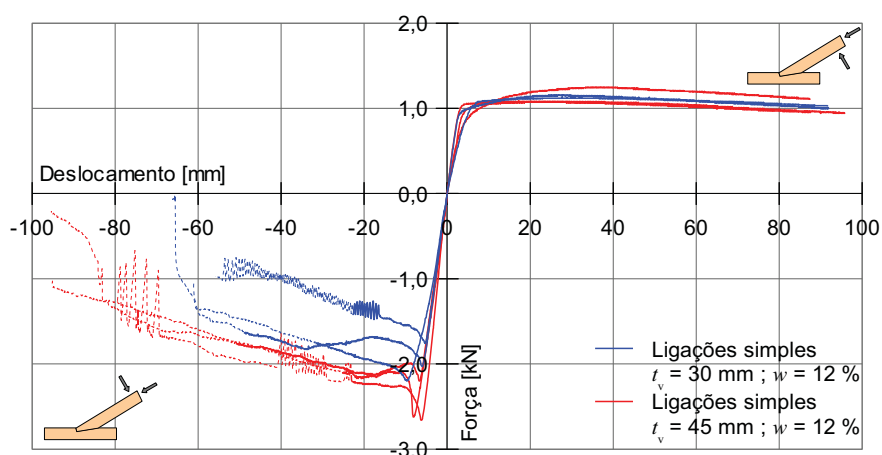


Figura 4.2 - Ligações simples: efeito da profundidade do entalhe, madeira com  $w = 12\%$



#### 4.1.1.3 Efeito da presença de respiga e mecha

As curvas de comportamento das ligações simples e das ligações com respiga, com  $t_v = 45$  mm e  $w = 12$  e  $20$  % são apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4.

A presença da respiga não provoca alterações significativas ao comportamento das ligações quando o ângulo  $\beta$  tende a aumentar, mas no sentido de fechar o ângulo, tanto a  $12$  como a  $20$  %, a respiga altera significativamente o comportamento das ligações.

Para um o teor em água a  $12$  %, no sentido de fechar o ângulo, observa-se que nas ligações com respiga o valor médio do deslocamento último  $d_u$  aumenta quase  $100$  %. Isto deve-se ao facto da respiga introduzir um patamar quase horizontal no fim do troço elástico inicial, que permite manter a força aplicada sem reduções significativas até níveis de rotação bastante elevados, pois a respiga garante. Em termos dos parâmetros  $d_y$ ,  $F_y$ ,  $k_i$  e  $F_{max}$  não há alterações significativas.

Nas ligações com madeira a  $20$  % e respiga não se observa o efeito “dentes de serra” e há aumentos de cerca de  $25$  % nos valores médios de  $F_y$ ,  $F_{max}$  e  $F_u$  relativamente às ligações sem respiga. O deslocamento último  $d_u$  aumente  $50$  %.

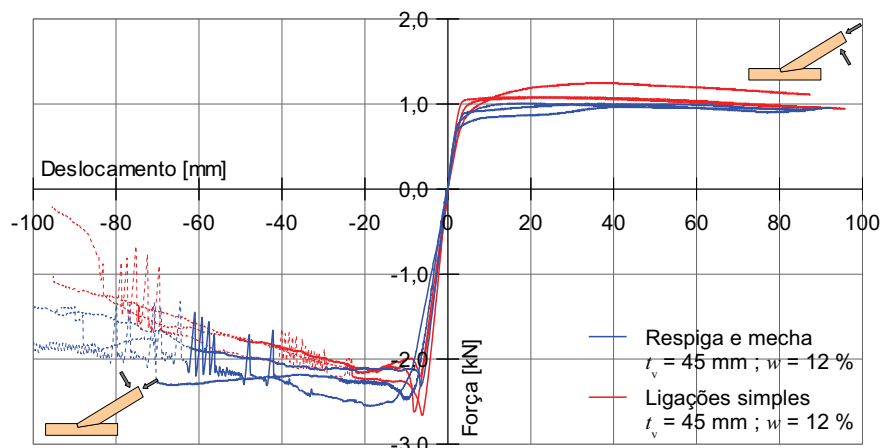


Figura 4.3 - Ligações sem ferragens: efeito da respiga, madeira com  $w = 12$  %

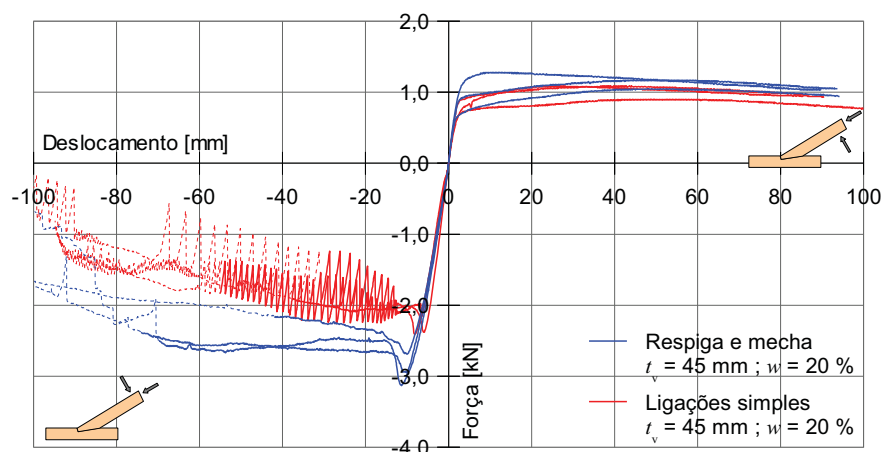


Figura 4.4 - Ligações sem ferragens: efeito da respiga, madeira com  $w = 20$  %

Estes resultados demonstram que a respiga, com o adequado rigor de execução, melhora substancialmente o desempenho da ligação. Esta conclusão deve ser extrapolada com as devidas

precauções para o caso da avaliação de ligações de estruturas em serviço, uma vez que pode ser muito difícil aferir a geometria e o ajustamento da respiga, sendo que por vezes a sua função é apenas a de impedir o desencaixe lateral das peças.

#### 4.1.1.4 Efeito da degradação por caruncho pequeno

As curvas de comportamento das ligações simples, com  $t_v = 45$  mm e  $w = 12$  %, de madeira sã e de madeira com degradação por caruncho pequeno estão representadas na Figura 4.5.

A degradação por caruncho pequeno não introduz diferenças significativas relativamente às ligações sãs, quando o ângulo  $\beta$  aumenta.

No sentido de fechar o ângulo há aumentos de 17, 8 e 10 % nos valores médios de  $F_y$ ,  $F_{\max}$  e  $F_u$ , respectivamente, mas que provavelmente se devem a diferenças no rigor da execução das peças. A madeira degradada estava, ao contrário da madeira sã, estabilizada em termos dimensionais e, como os elementos salvos de demolições apresentavam uma secção transversal superior à adoptada nestes ensaios, foi necessário aparelhar as peças, o que conduziu a um maior rigor de execução e a um melhor ajustamento das superfícies nos entalhes. Estes aspectos explicam, em grande parte, os valores de resistência mais elevados que as ligações com madeira degradada apresentam. Contudo, é importante frisar que a dispersão dos resultados não pode ser desprezada e que a simples comparação dos valores médios, face ao reduzido número de ensaios, pode induzir conclusões erradas.

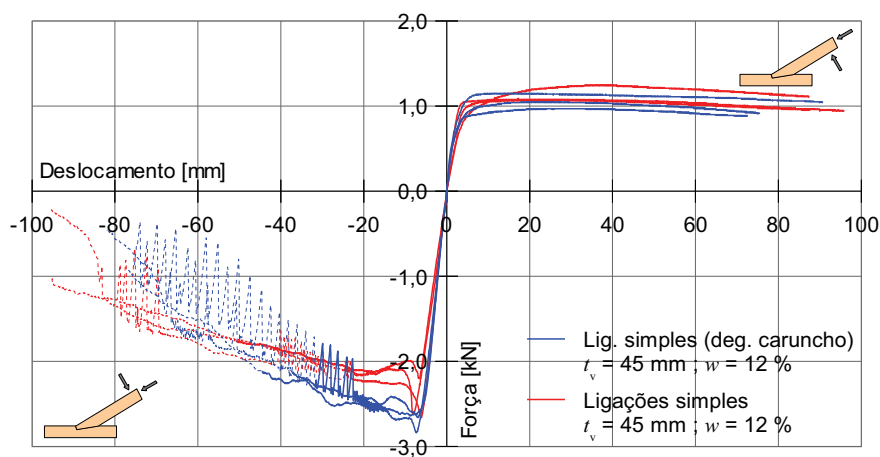


Figura 4.5 - Ligações sem ferragens: efeito da degradação por caruncho pequeno

## 4.1.2 Ligações com ferragens

### 4.1.2.1 Efeito da presença de esquadros

A presença dos esquadros metálicos teve efeitos notórios no comportamento das ligações, tanto a abrir como a fechar o ângulo e para os dois teores em água analisados (Figuras 4.6 e 4.7).

Nas peças com  $w = 12$  % e no sentido de abrir o ângulo, comparando as ligações com esquadros aplicados antes da compressão da perna com as ligações simples observa-se que os valores médios de  $F_y$ ,  $F_{\max}$  e  $F_u$  aumentaram cerca de 300 %, enquanto que o valor médio de  $k_i$  não sofreu

alterações significativas (face à dispersão dos resultados obtidos).

No sentido de fechar o ângulo, o efeito dos esquadros nos valores médios de  $F_y$ ,  $F_{max}$  e  $F_u$  é menor, conduzindo ainda assim a aumentos de 45 a 48 %. Embora os esquadros introduzam um aumento muito significativo da capacidade resistente da ligação, é importante ter em consideração que também há um aumento igualmente muito significativo de  $d_y$ ,  $d_{Fmax}$  e  $d_u$ . Isto significa que os níveis de deformação que se exigem à ligação para desenvolver toda a sua capacidade resistente são totalmente diferentes dos das ligações simples e que para se tirar partido de toda essa resistência é necessário que o resto da estrutura seja capaz de acomodar esses deslocamentos. Note-se que para os níveis de deslocamento em que as ligações sem ferragens atingem  $F_{max}$ , as ligações com esquadros apresentam níveis de força aplicada semelhantes.

Nas configurações com  $w = 20\%$ , no sentido de abrir o ângulo observam-se igualmente aumentos de 270 a 300 % no valores médios de  $F_y$ ,  $F_{max}$  e  $F_u$ , enquanto que no sentido de fechar o ângulo se observam aumentos de 76 a 105 % desses parâmetros. Mantém-se, no entanto, a ressalva assinalada no parágrafo anterior relativa ao aumento de  $d_y$ ,  $d_{Fmax}$  e  $d_u$  e as consequências que daí advêm.

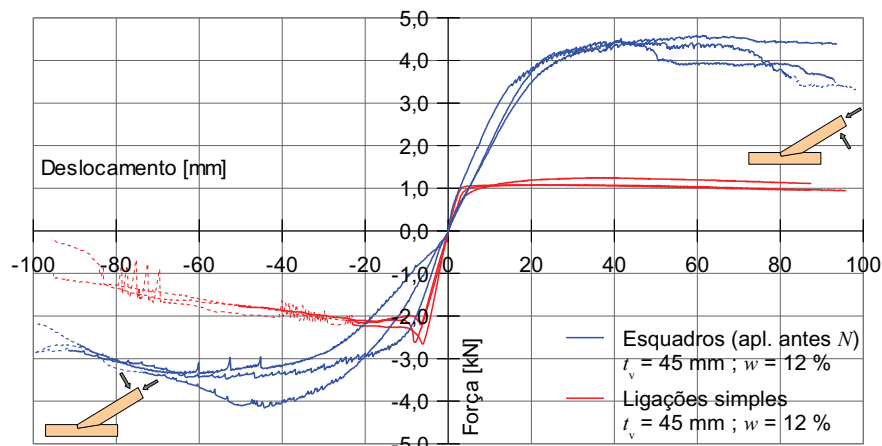


Figura 4.6 - Ligações com ferragens: efeito dos esquadros, madeira com  $w = 12\%$

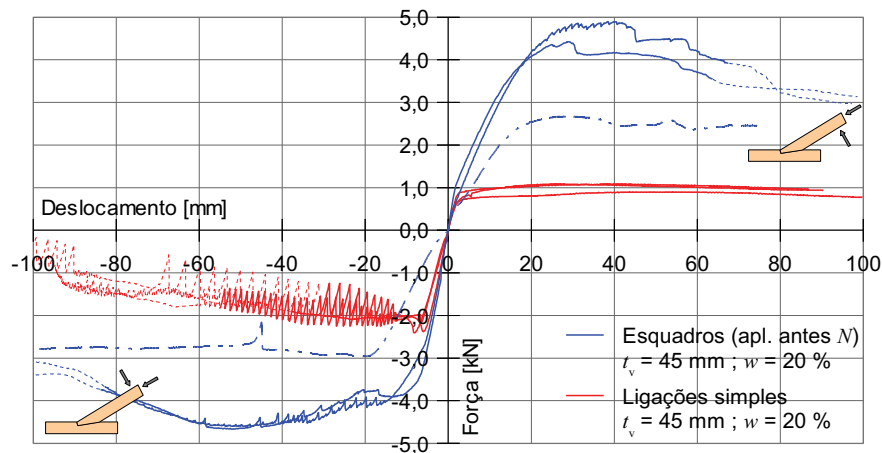


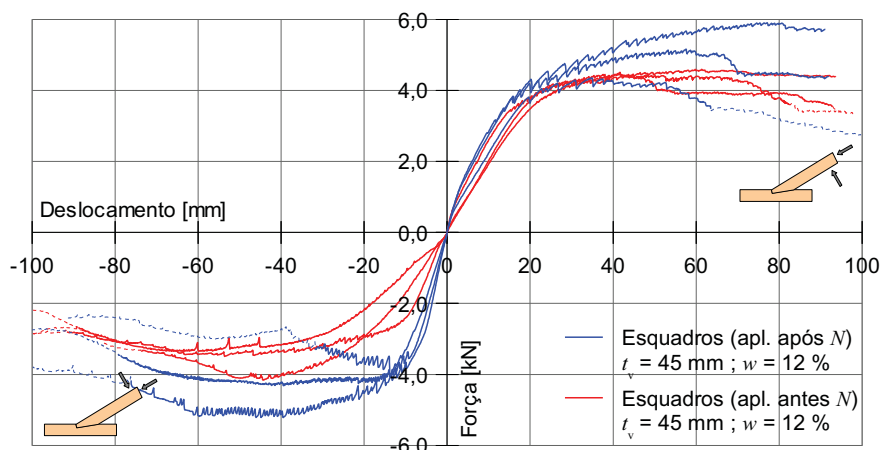
Figura 4.7 - Ligações com ferragens: efeito dos esquadros, madeira com  $w = 20\%$

#### 4.1.2.2 Efeitos da aplicação dos esquadros antes e depois de $N$

As curvas de comportamento das ligações com esquadros aplicados antes e depois do carregamento axial da perna são apresentadas na Figura 4.8.

Comparando os resultados observa-se, no sentido de abrir o ângulo, um aumento de aproximadamente 15 % dos valores médios de  $F_{\max}$ ,  $F_u$  quando os esquadros são aplicados após o carregamento, embora a dispersão dos resultados relativize essa diferença. Os valores de  $k_i$ ,  $d_y$ ,  $F_y$  e  $d_u$  são semelhantes em ambas as situações, não havendo variações significativas.

No sentido de fechar o ângulo, observa-se um aumento de cerca de 150 % da rigidez inicial  $k_i$  e aumentos de 20, 21 e 27 % dos valores médios de  $F_y$ ,  $F_{\max}$  e  $F_u$ , respectivamente, quando se comparam os resultados das ligações com esquadros aplicados após o carregamento axial da perna com o outro grupo. Neste caso, há um aumento de 47 % do valor médio de  $k_i$  e uma redução de 40 % no valor de  $d_{F_{\max}}$ .



**Figura 4.8** - Ligações com ferragens: efeitos da aplicação dos esquadros antes e depois de  $N$

A aplicação dos esquadros após o carregamento axial da perna conduz a um aumento da resistência da ligação, relativamente à situação em que os esquadros são aplicados antes desse carregamento, e, no caso de fechar o ângulo, também a um aumento da rigidez inicial. Isto significa que a aplicação dos esquadros numa estrutura em serviço, ou seja, com carregamento suficiente para ajustar as peças nos entalhes, pode conduzir a aumentos de rigidez da ligação muito superiores ao que os ensaios com os esquadros aplicados antes do carregamento axial faziam prever. Isto pode ter consequências em termos da distribuição de esforços, em particular em estruturas e/ou carregamentos assimétricos. Contudo, a força máxima mobilizada na ligação também ocorreria, neste caso, para níveis de deformações muito inferiores, o que pode ser benéfico uma vez que não exige uma deformabilidade excessiva ao resto da estrutura.

A norma americana relativa ao fabrico de asnas de madeira com chapas metálicas denteadas (ANSI/TPI 1-2007) contém disposições específicas sobre as folgas entre elementos de madeira, limitando-as a 1,5 ou 3 mm conforme o tipo de ligação. Quando estes limites são ultrapassados este documento estipula que devem ser aplicados calços metálicos, após a aplicação dos outros ligadores metálicos, para garantir que o contacto entre elementos de madeira permite desenvolver

as resistências pretendidas, sem instabilização das chapas.

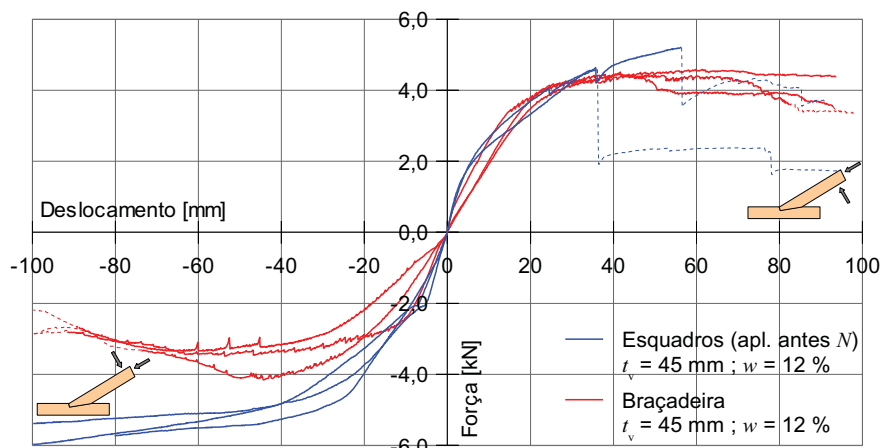
#### 4.1.2.3 Comparação entre esquadros e braçadeira

A comparação entre os resultados dos ensaios de ligações com esquadros metálicos aplicados antes da compressão da perna e das ligações com braçadeira (aplicadas nas mesmas condições) está representada nas Figuras 4.9 e 4.10.

Para  $w = 12\%$ , no sentido de abrir o ângulo, a força máxima aplicada às ligações é semelhante (resistência das braçadeiras é cerca de 9 % superior), mas no caso da braçadeira a rotura é frágil e ocorre imediatamente após se atingir  $F_{max}$ , enquanto que as ligações com esquadros têm capacidade de manter a força máxima aplicada durante um troço bastante longo. No primeiro caso, a braçadeira constitui um mecanismo muito rígido e de elevada resistência, solicitando a madeira em tracção perpendicular às fibras (na zona de secção transversal variável, no entalhe da perna) conduzindo a roturas frágeis; no segundo caso a madeira é solicitada em compressão localizada (*embedding*) pelos parafusos, tirando partido da deformabilidade dos esquadros (que apresentam uma secção bastante esbelta), sendo possível atingir níveis de carga e rotações elevadas sem roturas frágeis. Em termos de rigidez inicial a braçadeira apresenta valores médios um pouco mais elevados, mas dada a dispersão dos resultados e o reduzido número de ensaios, os resultados não apontam uma distinção clara entre as duas tipologias.

No sentido de fechar o ângulo, com  $w = 12\%$ , as ligações com braçadeira apresentam resistências muito superiores (cerca de 55 %) às das ligações com esquadros. Tal como no caso de abrir o ângulo, a força máxima atingida nas ligações com braçadeira coincide com a força última, embora neste caso, ao contrário da situação de abrir o ângulo, não se verifique uma rotura frágil da ligação; a madeira é apenas solicitada em compressão perpendicular às fibras (sob a barra espessa e na zona anterior do entalhe), o que configura um mecanismo resistente limitado apenas pelas deformações eventualmente atingidas, uma vez que a resistência da madeira aumenta continuamente (não se aplica nenhuma das definições de rotura apresentadas no capítulo 3.4.1.2, página 35). O aspecto anterior, aliado ao fraco ajustamento das superfícies no entalhe das ligações com esquadros aplicados antes do carregamento axial, explica as diferenças observadas nos resultados das duas tipologias.

Não há diferenças consistentes em termos de rigidez inicial e relativamente a  $d_y$  e  $F_y$  os valores apresentados não são comparáveis, na medida em que nenhuma das curvas de comportamento se aproxima do modelo bilinear adoptado para o cálculo destas grandezas.



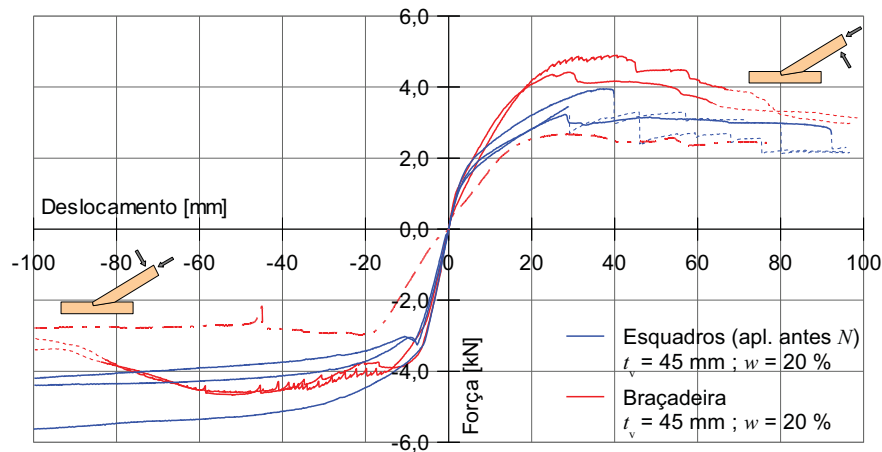
**Figura 4.9** - Ligações com ferragens: esquadros aplicados antes de  $N$  e braçadeiras, madeira com  $w = 12\%$

O aumento do teor em água para  $w = 20\%$  conduz, no sentido de abrir o ângulo, a uma redução muito significativa (25%) da resistência das ligações com braçadeira e a um pequeno aumento na resistência das ligações com esquadros (5%), pelo que comparativamente estas últimas são cerca de 34% mais resistentes, embora os valores de  $d_{Fmax}$  sejam idênticos. As ligações com braçadeira exibem, tal como para  $w = 12\%$ , uma rotura frágil imediatamente após se aplicar a força máxima. A braçadeira foi ajustada, através do aperto das porcas dos varões, quando a madeira apresentava um teor em água perto de 8% e restringiu o seu posterior aumento de volume devido ao aumento do teor em água (até cerca de 20%), induzindo tensões de compressão perpendiculares às fibras sob a barra rectangular espessa (era visível o esmagamento da madeira mesmo antes do início dos ensaios). Assim, as tensões internas associadas ao aumento de volume da madeira conjugadas com as roturas frágeis características desta tipologia de ligação levaram à redução da resistência atingida pelas ligações com braçadeira. Pelo contrário, nas ligações com esquadros aplicados antes do carregamento axial (cujos ligadores também foram apertados quando a madeira apresentava um teor em água perto de 8%), o inchamento da madeira contribuiu para melhorar o ajustamento das superfícies nos entalhes e confinar lateralmente a ligação, aumentando a sua resistência.

O aperto dos ligadores após o Verão, altura em que os elementos de madeira atingem geralmente os teores em água mais baixos, é uma recomendação usual que visa garantir um ajustamento adequado das ligações, em particular nos casos em que os elementos são montados com teores em água superiores aos de serviço. Na situação da braçadeira metálica, apesar do posterior aumento de teor em água ser muito elevado, o reaperto dos ligadores teve um efeito contrário, pelas razões já explicitadas, ao pretendido, enquanto que nas ligações com esquadros o reaperto resultou numa melhoria do seu desempenho. Assim, o aperto dos ligadores deve ser ponderado caso a caso, em função dos modos de rotura expectáveis.

No sentido de fechar o ângulo, ocorre paralelamente uma redução da capacidade resistente das ligações com braçadeiras e um aumento da resistência das ligações com esquadros metálicos, com o aumento do teor em água (e do volume) das peças de madeira. De qualquer modo, a força

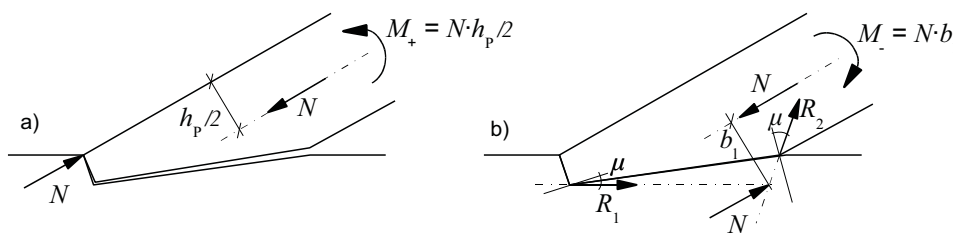
aplicada às ligações com braçadeiras aumenta continuamente ao longo do ensaio, ou seja  $F_{max} = F_u$ , o que não se observa nas ligações com esquadros.



**Figura 4.10** - Ligações com ferragens: esquadros aplicados antes de  $N$  e braçadeiras, madeira com  $w = 20\%$

## 4.2 Aplicação de Modelos Existentes

Os modelos existentes para determinação da capacidade resistente destas ligações (Parisi e Piazza 2000) aplicam-se apenas a ligações simples (sem ferragens) e baseiam-se na interpretação física do comportamento observado, em termos de equilíbrio de forças na configuração inicial das peças, imediatamente antes da separação ou deslizamento relativo das superfícies em contacto no entalhe. Como o comportamento das ligações é assimétrico, pois os mecanismos envolvidos na abertura/fecho do ângulo  $\beta$  são diferentes, os seus autores propõem dois modelos interpretativos (Figura 4.11).



**Figura 4.11** - Estados limite: a) no sentido de abrir o ângulo; b) no sentido de fechar o ângulo.

Neste capítulo são aplicados estes modelos e os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais.

### 4.2.1 Abrir o ângulo

A proposta de Parisi e Piazza (2000) para estimar a capacidade resistente destas ligações, quando o ângulo tende a abrir, baseia-se no equilíbrio da perna em torno do vértice superior do entalhe frontal (Figura 4.11 a)) e depende do esforço axial de compressão na perna ( $N$ ) e da altura da secção transversal da perna (4.1).

$$M_{\max+} = N \cdot \frac{h_p}{2} \quad (4.1)$$

Segundo esta expressão, a capacidade resistente da ligação é independente da profundidade do entalhe  $t_v$ , o que é confirmado pelos resultados dos ensaios realizados.

No Quadro 4.1 são apresentadas as estimativas do momento resistente  $M_{\max+,est}$  obtidas por aplicação da expressão (4.1). O valor da força axial aplicada foi obtido através das curvas de calibração das almofadas, em função da pressão aplicada cujo valor médio dos três ensaios de cada configuração, também se apresenta.

**Quadro 4.1** - Estimativa do momento resistente  $M_{\max+,est}$  das configurações ensaiadas em função do valor médio da pressão do ar nas almofadas  $p$

	$p$ [bar]	$N$ [kN]	$e_N$ [mm]	$M_{\max+,est}$ [kNm]
<b>Ensaio</b> 1.x	8,2	15,0	76	1,1
4.x	8,0	14,7	78	1,1
31.x	8,0	14,7	70	1,0
34.x	8,0	14,7	78	1,1

No Quadro 4.2 é apresentado o momento máximo (valor médio dos três ensaios de cada configuração) aplicado às ligações durante os ensaios. Estes valores foram obtidos considerando que o centro de rotação da perna se situava no vértice superior do entalhe frontal, tal como foi observado durante os ensaios.

**Quadro 4.2** - Momento máximo atingido nas ligações  $M_{\max+}$  [kNm] (valor médio dos três ensaios de cada configuração)

	$p$ [bar]	$N$ [kN]	$e_N$ [mm]	$M_{\max+}$ [kNm]
<b>Ensaio</b> 1.x	8,2	15,0	890	1,1
4.x	8,0	14,7	890	0,9
31.x	8,0	14,7	890	1,0
34.x	8,0	14,7	890	0,9

No Quadro 4.3 é apresentado o quociente entre a estimativa do momento resistente e o momento máximo obtido durante os ensaios  $M_{\max+,est} / M_{\max+}$ .

**Quadro 4.3** - Quociente entre a estimativa do momento resistente e o momento máximo obtido durante os ensaios  $M_{\max+,est} / M_{\max+}$ .

	$M_{\max+,est} / M_{\max+}$
<b>Ensaio</b> 1.x	1,1
4.x	1,3
31.x	1,0
34.x	1,1



Observa-se que todas as estimativas sobrestimam a resistência da ligação, sendo que o melhor ajustamento se verifica para as ligações com  $t_v = 30$  mm e  $w = 12$  %, com uma diferença de apenas 2 % do valor obtido nos ensaios. No caso das ligações com  $t_v = 45$  mm e  $w = 20$  % (ensaios 4.x) há uma diferença maior, que se deve essencialmente ao menor valor médio de  $M_{max}$  induzido pelo desempenho da ligação 4.2.

#### 4.2.2 Fechar o ângulo

No sentido de fechar o ângulo Parisi e Piazza (2000) consideram que as forças, mobilizadas no entalhe, que actuam sobre a perna são as reacções na face frontal e na zona posterior do entalhe, respectivamente  $\vec{R}_1$  e  $\vec{R}_2$ , representadas na Figura 4.11 b), o que está de acordo com o comportamento observado durante os ensaios. Estas reacções têm, para além da componente normal à superfície do entalhe, uma componente tangencial que se deve ao atrito (na Figura 4.11 b) o ângulo de atrito está representado com o símbolo  $\mu$ . Os autores adoptam o mesmo coeficiente de atrito para as duas zonas do entalhe para simplificar o modelo de cálculo, o que acaba por estar de acordo com McKenzie e Karpovich (1968), que referem que embora haja diferenças consistentes devido à orientação das fibras, estas não são significativas.

Os valores absolutos das reacções são obtidos de modo a que a direcção da sua soma vectorial seja paralela ao esforço de compressão normal da perna, ou seja,  $\vec{R}_1 + \vec{R}_2 = \vec{N}$ . O ponto de aplicação desta resultante é obtido pela intersecção das linhas de acção das duas reacções. A excentricidade mobilizada no entalhe para resistir à rotação das peças é, assim, a distância desse ponto de aplicação à linha de acção de  $\vec{N}$ , tal como representado na (Figura 4.11 b)).

A expressão apresentada por Parisi e Piazza (2000) para determinar a capacidade resistente da ligação quando o ângulo tende a fechar é

$$M_{max} = N \cdot b_1 \quad (4.2)$$

em que  $b_1$  representa a excentricidade referida no parágrafo anterior. A sua determinação analítica é complexa, mas Parisi e Piazza (2000) apresentam as expressões necessárias, em função da geometria do entalhe, da geometria da perna e do ângulo de atrito.

No caso em estudo, a localização da excentricidade  $b_1$  foi realizada com recurso a um programa de desenho assistido por computador, obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 4.1 (em função do coeficiente de atrito). Note-se que, quanto maior for este coeficiente, maior será o valor da reacção na zona posterior do entalhe e, conseqüentemente, o esmagamento da madeira, embora este aspecto não seja tido em conta por esta metodologia.

**Quadro 4.4** - Excentricidade  $b_1$  entre a resultante das reacções no entalhe e o esforço axial na perna, em função da geometria e do atrito, para cada configuração de ensaio.

	$\mu = 0,0$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,6$
<b>Ensaio</b> 2.x	47	86	148
5.x	47	86	148
32.x	43	104	138
35.x	47	86	148

No Quadro 4.5 são apresentadas, em função do coeficiente de atrito, as estimativas do momento resistente  $M_{\max,est}$  obtidas por aplicação da metodologia descrita.

**Quadro 4.5** - Estimativa do momento resistente  $M_{\max,est}$  das configurações ensaiadas em função do atrito (considerando os valores médios, para cada configuração, da pressão do ar nas almofadas  $p$ ).

	$p$	$N$	$M_{\max,est}$		
			$\mu = 0,0$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,6$
	[bar]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
<b>Ensaio</b> 2.x	8,2	15,0	-0,7	-1,3	-2,2
5.x	8,0	14,8	-0,7	-1,3	-2,2
32.x	8,0	14,8	-0,5	-1,5	-2,0
35.x	8,0	14,7	-0,7	-1,3	-2,2

No Quadro 4.6 é apresentado o momento máximo (valor médio dos três ensaios de cada configuração) aplicado às ligações durante os ensaios. Estes valores foram obtidos considerando que o centro de rotação da perna se situa no vértice da parte posterior do entalhe.

**Quadro 4.6** - Momento máximo atingido na ligação  $M_{\max}$  (valor médio dos três ensaios de cada configuração)

	$e_{F_{\max}}$	$F_{\max}$	$M_{\max}$
	[mm]	[kN]	[kNm]
<b>Ensaio</b> 2.x	622	-2,5	-1,5
5.x	652	-2,3	-1,4
32.x	622	-2,0	-1,3
35.x	622	-2,7	-1,7

A comparação dos resultados anteriores é apresentada no Quadro 4.7, onde está o quociente entre a estimativa do momento resistente e o momento máximo obtido durante os ensaios  $M_{\max,est} / M_{\max}$ , em função do atrito, para cada configuração.

**Quadro 4.7** - Quociente entre a estimativa do momento resistente e o momento máximo obtido durante os ensaios  $M_{\max,est} / M_{\max}$ , em função do atrito.

	$\mu = 0,0$	$\mu = 0,3$	$\mu = 0,6$
<b>Ensaio</b> 2.x	0,46	0,85	1,46
5.x	0,48	0,88	1,52
32.x	0,38	1,20	1,59
35.x	0,41	0,75	1,30
<b>Média</b>	<b>0,43</b>	<b>0,92</b>	<b>1,47</b>
Desv. padrão	0,05	0,19	0,12

Observa-se que, de entre os valores analisados, o coeficiente de atrito  $\mu = 0,3$  é o que fornece a melhor aproximação aos resultados obtidos nos ensaios, embora subestimando a capacidade resistente real das ligações em todos os casos com  $t_v = 45$  mm (ensaios 2.x, 5.x e 35.x) e sobrestimando-a nas ligações com  $t_v = 30$  mm (ensaios 32.x).

No caso das ligações simples com  $t_v = 45$  mm e  $w = 12$  e 20 % (ensaios 2.x e 5.x, respectivamente) observa-se uma diferença inferior a 15 % entre a estimativa e a capacidade resistente das ligações, o que representa uma boa aproximação. Parisi e Piazza (2000) consideraram  $\mu = 0,3$  e reportam diferenças inferiores a 10 %, embora as geometrias e carregamentos envolvidos sejam diferentes das do programa de ensaios presente.

### **4.2.3 Considerações**

A metodologia proposta por Parisi e Piazza (2000) para estimar a capacidade resistente das ligações apresentou bons resultados face aos valores obtidos nos ensaios, sendo que no caso de abrir o ângulo sobrestimou a capacidade resistente entre 2 e 26 % e no caso de fechar o ângulo a subestimou entre 12 e 25 %, excepto nas ligações com  $t_v = 30$  mm em que a capacidade resistente foi sobrestimada em 20 %. No caso de fechar o ângulo, um coeficiente de atrito  $\mu = 0,3$  conduziu a melhores estimativas que  $\mu = 0,0$  ou 0,6.



## 5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este trabalho permitiu aprofundar o conhecimento sobre o comportamento mecânico de ligações tradicionais com entalhes. Destacando-se seguidamente os aspectos principais.

### **Regras de dimensionamento**

Apesar da regulamentação vigente não contemplar as ligações tradicionais com entalhes, na bibliografia específica encontram-se, embora dispersos e muitas vezes pouco fundamentados, vários modelos de cálculo e disposições construtivas. Contudo, estes modelos contemplam apenas ligações sem ferragens, pelo que seria útil desenvolvê-los para incluírem as tipologias de ferragens mais comuns.

### **Sistema de ensaio**

O sistema de ensaio desenvolvido e utilizado durante a campanha experimental correspondeu positivamente às exigências e permitiu realizar os ensaios de forma relativamente expedita. Este sistema pode ser facilmente instalado e posto em funcionamento, dotando o Núcleo de Estruturas de Madeira da capacidade de avaliar experimentalmente o comportamento de ligações estruturais semelhantes.

### **Desempenho das ligações**

As principais conclusões/observações relativamente ao comportamento das ligações são as seguintes:

#### *Ligações sem ferragens*

- o aumento do teor em água não influenciou a resistência nem a rigidez das ligações, mas introduziu um padrão “dentes de serra” nas curvas

força-deslocamento;

- a profundidade do entalhe não influenciou o desempenho da ligação para rotações no sentido de abrir o ângulo, mas a sua diminuição reduziu a resistência e limitou as rotações máximas atingidas pelas ligações no sentido de fechar o ângulo, devido ao desencaixe precoce das peças;
- a presença da respiga não alterou o comportamento das ligações para rotações no sentido de aumentar o ângulo, mas no sentido de fechar o ângulo contribuiu para manter a capacidade resistente até níveis de rotação muito elevados, evitando o desencaixe prematuro das peças. A respiga atenuou o efeito “dentes de serra” nas ligações com madeira a 20 %, possivelmente devido à maior área de contacto no entalhe e, devido ao inchamento da madeira e consequente ajustamento das superfícies do entalhe, aumentou a sua resistência;
- a degradação por caruncho pequeno não alterou o comportamento das ligações.

#### *Ligações com ferragens*

- a aplicação de esquadros metálicos antes da compressão axial da perna conduziu a um grande aumento da resistência da ligação;
- é essencial garantir um ajustamento adequado entre as superfícies em contacto no entalhe, uma vez que uma montagem de ligações com folgas reduziu drasticamente a sua rigidez e resistência;
- a aplicação de esquadros metálicos após a compressão axial da perna conduziu a um aumento da resistência e da rigidez, relativamente aos esquadros aplicados antes do carregamento, em particular para rotações no sentido de fechar o ângulo, devido à colmatação das folgas e mobilização das superfícies de madeira antes da aplicação das ferragens;
- com teores em água de 12 %, as braçadeiras apresentaram resistência idênticas às dos esquadros, mas introduziram um modo de rotura frágil para rotações no sentido de abrir o ângulo. No sentido de fechar o ângulo conduziram à separação das superfícies na face frontal do entalhe, facilitando a instabilização da perna para fora do plano da asna, embora neste caso a madeira seja apenas solicitada em compressão perpendicular às fibras. O aumento do teor em água provocou uma redução da resistência para rotações em ambos os sentidos.

#### **Aplicação de modelos existentes**

Os modelos para estimar a capacidade das ligações, em termos de momento resistente, apresentaram resultados satisfatórios e constituem, para as dimensões e carregamentos estudados, uma opção viável para obter uma estimativa inicial da resistência das ligações sem ferragens, com apenas um entalhe

### **Necessidades de investigação**

Este trabalho constitui uma primeira abordagem na análise do comportamento de ligações estruturais em madeira, mas, na perspectiva das intervenções de reabilitação ou reforço, seria importante proceder à análise do comportamento de ligações com anomalias (roturas, folgas, etc.) e avaliar posteriormente o desempenho de diversas técnicas de reforço, para determinar a sua eficácia e facilidade de execução. Para tal poder-se-iam reforçar as ligações utilizadas nesta campanha experimental e ensaiá-las novamente.

Outro aspecto interessante seria a aplicação dos resultados obtidos, em particular as curvas de comportamento das ligações, em modelos numéricos de estruturas reais (casos de estudo) para aferir até que ponto a consideração da rigidez e resistência rotacional das ligações permite explorar mais profundamente a capacidade de carga das estruturas (através da transmissão de esforços entre elementos) e melhorar as estimativas dos deslocamentos fornecidas por esses modelos.





## Referências bibliográficas

- ANSI/TPI 1-2007. National design standard for metal plate connected wood truss construction. (2007). Truss Plate Institute, Alexandria, USA, 84.
- Blass, H. J., Ehlbeck, J., Kreuzinger, H., e Steck, G. (2004). *Erläuterungen zu DIN 1052: 2004-08 (Notes on DIN 1052: 2004-0)*. Informationsdienst Holzbau, Bruderverlag, 215.
- Branco, J. (2008). "Influence of the joints stiffness in the monotonic and cyclic behaviour of traditional timber trusses. Assessment of the efficacy of different strengthening techniques.." PhD, Universidade do Minho.
- Cenci, G. (1987). *Strutture in legno. Calcolo e costruzione con riferimento alla DIN 1052*. Palutan, 240.
- Chilton, J. (1995). "History of timber structures." *Timber Engineering - STEP 2*, Centrum Hout, Almere, Netherlands, E1/1-E1/13.
- DIN 4074-1. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz (Strength grading of wood - Part 1: Coniferous sawn timber). (2008). Deutsches Institut für Normung (DIN).
- Dolan, J. (Ed.). (1994). "Timber structures in seismic regions RILEM state-of-the-art report." *Materials and Structures*, 27(3), 157-184.
- Ehlbeck, J. (1995). "Carpentry joints." *Timber Engineering - STEP 1*, Centrum Hout, Almere, Netherlands.
- Ehlbeck, J. (1999). *DIN 1052 - Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau (DIN 1052 - Planning, calculation and design of timber structures. Common design rules and design rules for buildings)*. IRB Verlag, 201.
- EN 1193:1997. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of shear strength and mechanical properties perpendicular to the grain. (1997). European Committee for Standardization (CEN), Bruxelles, 10.
- EN 12512:2001 + A1:2005. Timber structures - Test methods - Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. (2005). European Committee for Standardization (CEN), Bruxelles, 14.
- EN 1995-1-1:2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. (2004). European Committee for Standardization (CEN), Bruxelles, 123.

- EN 1995-1-1:2004/A1. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. (2008). European Committee for Standardization (CEN), Bruxelles, 16.
- EN 1995-2:2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 2: Bridges. (2004). European Committee for Standardization (CEN), Bruxelles, 28.
- EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. (2004). European Committee for Standardization (CEN), Bruxelles, 229.
- EN 338:2003. Structural timber. Strength classes. (2003). European Committee for Standardization (CEN), Bruxelles, 14.
- EN 384:2004. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. (2004). European Committee for Standardization (CEN), Bruxelles, 15.
- Faye, C. (2007). “Assemblages bois/bois.”
- Feio, A. (2006). “Inspection and diagnosis of historical timber structures: NDT correlations and structural behaviour.” PhD, Universidade do Minho.
- Foliente, G. C. (2000). “History of timber construction.” *Wood Structures: A Global Forum on the Treatment, Conservation, and Repair of Cultural Heritage*, ASTM International.
- Forest Products Laboratory (Ed.). (1999). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Forest Products Society, 428.
- Götz, K., Hoor, D., Möhler, K., e Natterer, J. (1983). *Construire en bois : Choisir, concevoir, réaliser*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 283.
- Guide des assemblages de charpente*. (2000). Centre Technique du Bois et de l'Ameublement (CTBA).
- Hirsi, H. (2008). “The carpentry joints in timber structures.” Course lecture, Helsinki University of Technology.
- Hirst, E., Brett, A., Thomson, A., e Harris, R. (2008). “The structural performance of traditional oak tension and scarf joints.” *Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering (WCTE2008)*
- ICOMOS. (1999). *Principles for the Preservation of Historic Timber Buildings*. ICOMOS, 3.
- Koch, H., e Schäfers, M. (2008). “Traditional timber joints – experimental investigation on tapered tenons.” *Proceedings of the 10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering (WCTE2008)*
- Köhler, N., e Heimeshoff, B. (1989). *Untersuchung über das Tragverhalten von zimmermannsmäßigen Holzverbindungen (Study on the structural behavior of timber carpentry joints)*. Technischen Universität München, 116.
- Lóbez, F. (1898). *Tratado de Construcción Civil*. 681.
- Malhotra, S. K., e Jin, Y. (1989). “Behaviour of mortise and tenon joints used in traditional Chinese timber frame construction.” *Proceedings of the second Pacific Timber Engineering Conference*, Centre for Continuing Education, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 31-36.
- Matana, M. (2003). *Charpentes: Bois, assemblages, charpentes, lucarnes et fenêtres de toit, planchers bois, escaliers, maison à ossatures bois*. Editions Alternatives.
- McKenzie, W. M., e Karpovich, H. (1968). “The frictional behaviour of wood.” *Wood Science and Technology*, 2(2), 139-152.
- NS-INSTA 142:1997. Nordiske regler for visuell styrkesortering av trelast (Nordic visual strength grading rules for timber). (1997). Norges standardiseringsforbund, Lysaker, Norge, 28.
- Palladio, A. (2002). *The Four Books on Architecture*. (traduzido por R. Tavernor e R. Schofield), 472.

- Palma, P., e Cruz, H. (2006). "Comportamento de ligações tradicionais em estruturas de madeira." *4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, LNEC, Lisboa, Portugal.
- Palma, P., e Cruz, H. (2007). "Mechanical behaviour of traditional timber carpentry joints in service conditions – results of monotonic tests." *From Material to Structure - Mechanical behaviour and failures of the timber structures*, ICOMOS, Firenze, Italia.
- Palma, P., Cruz, H., Oliveira, F., e Morais, P. (2007). "Sistema para ensaio de ligações estruturais em madeira." *A Instrumentação Científica e a Metrologia Aplicadas à Engenharia Civil*, LNEC, Lisboa, Portugal, 146-153.
- Parisi, M., e Piazza, M. (2000). "Mechanics of plain and retrofitted traditional timber connections." *Journal of Structural Engineering*, 126(12), 1395-1403.
- Parisi, M., e Piazza, M. (2002). "Seismic behavior and retrofitting of joints in traditional timber roof structures." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 1183-1191.
- Parker. (2006). "Catalogue PDE2576TCUK-ul: Air Bellows series 9109 (size Ø70 to Ø660 mm)." Parker Hannifin Ltd.
- Piazza, M., e Tomasi, R. (2004). "I sistemi di connessione e le connessioni di carpenteria."
- Pierce, P. C., Brungraber, R. L., Lichtenstein, A., e Sabol, S. (2005). *Covered Bridge Manual*. 341.
- Porteous, J., e Kermani, A. (2007). *Structural Timber Design to Eurocode 5*. Wiley Blackwell.
- prEN 1998-1:2003. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. (2003). European Committee for Standardization (CEN), Bruxelles, 215.
- Racher, P. (2007). *Assemblages traditionnels: comportement des assemblages par queues d'aronde*. Complexe Universitaire des Cégeaux (CUST), 22.
- Sandberg, L. B., Bulleit, W. M., e Reid, E. H. (2000). "Strength and Stiffness of Oak Pegs in Traditional Timber-Frame Joints." *Journal of Structural Engineering*, 126(6), 717-723.
- SE-M. Seguridad estructural - Estructuras de Madera. (2006). Código Técnico de la Edificación, Ministério de Vivienda.
- Senno, M., e Piazza, M. (2003). "Behaviour and rehabilitation of queen post timber trusses : A case study." *Structural studies, repairs and maintenance of heritage architecture VIII*, Advances in architectures, WIT, Southampton, 803-814.
- Shanks, J., e Walker, P. (2005). "Experimental performance of mortice and tenon connections in green oak." *The Structural Engineer*, 83(17), 40-45.
- Thoma, H., Togni, M., e Uzielli, L. (2007). "Full-size truss joints made of old wood - laboratory tests on shear failures." *From Material to Structure - Mechanical behaviour and failures of the timber structures*, ICOMOS, Firenze, Italia.
- U.T.I. (1998). *Règles de calcul et de conception des charpentes en bois : Règles C.B. 71*. Construire sa maison, Eyrolles, 196.
- UNI 11138:2004. Building load bearing structures - Criteria for the preliminary evaluation, the design and the execution of works. (2004). UNI, 14.

