

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA  
ARQUITECTÓNICA**



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE ARQUITECTURA DE MADRID**

**RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN  
PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN  
ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA  
CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS  
METÁLICAS**

**TESIS DOCTORAL (TOMO I)**

**CARLOS GONZÁLEZ BRAVO**

**Arquitecto**

**Director: LUIS MALDONADO RAMOS**

**Codirector: MODESTO RAFAEL DÍEZ BARRA**

**2007**

**A mi mujer y mis hijos**

Tribunal nombrado por el Mgfco. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día .....de.....de.....

Presidente D. ....

Vocal D. ....

Vocal D. ....

Vocal D. ....

Secretario D. ....

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....  
de.....en.....

Calificación:  
.....

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

## AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han ayudado de alguna forma a que este trabajo saliera adelante y las cuales debo agradecer su intervención:

A Luís Maldonado Ramos, que me apoyó e impulsó desde el primer momento que entré en su despacho y ha sabido reorientar este trabajo en los momentos más críticos. Sin su intervención estoy seguro que nunca habría escrito estas líneas.

A Modesto Rafael Díez Barra, gran profesional y sin duda, mejor persona. Su paternal actitud ha convertido una investigación científica ardua en una experiencia de disfrute personal. Su paciencia y consejo constante ha sido de inestimable ayuda.

A Francisco Arriaga Martitegui, por su desinteresada ayuda y valiosos consejos durante todo el proceso.

A Juan Monjo Carrió, que me enseñó hace ya años, a visionar mentalmente la construcción y su patología.

A Luís Labiano Regidor de Vicuña, que me transmitió parte de su dilatada experiencia en patología edificatoria.

A Salvador Rovira Llorens, que me vio crecer profesionalmente y que siempre ha estado a mi lado cuando lo he necesitado.

Quiero agradecer también a la Cátedra de Estructuras de Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes su colaboración y disposición para que pudiera acceder a la bibliografía necesaria.

A mi equipo de Lycea, Olga Gómez Ramos e Isabel Fernández Águila por las horas dedicadas al desarrollo de este trabajo y a Manuel Fernández Collado por materializar los montajes de los distintos ensayos y por los momentos en obra que hemos compartido.

Finalmente a mi mujer, Loreto. A pesar de lo atareada y dedicada que ha estado estos últimos años a su profesión y a nuestros hijos, ha tenido horas de inestimable calidad centradas en discutir y mejorar las soluciones constructivas de esta tesis. Finalmente a Loreto, Iria y Beltrán por las horas que les he robado y que nunca me han reprochado.

## INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

RESUMEN

SUMMARY

1. HIPÓTESIS PLANTEADA.....	2
2. OBJETIVOS.....	4
3. ESTADO DEL ARTE.....	6
3.1. RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN DE FORJADOS EN EDIFICIOS ANTIGUOS.....	7
3.2. ETIOLOGÍA Y DIAGNOSIS EN FORJADOS DE MADERA ACTUANDO POR LA CARA SUPERIOR.....	10
3.3. PROCESOS PATOLÓGICOS DE ORIGEN BIÓTICO Y SU INCIDENCIA EN FORJADOS DE MADERA	13
3.3.1. Introducción.....	13
3.3.2. Mohos y hongos.....	16
3.3.3. Hongos xilófagos.....	16
3.3.3.1. Pudrición parda.....	19
3.3.3.1.1. Pudrición parda "humeda".....	20
3.3.3.1.2. Pudrición parda "seca".....	25
3.3.3.2. Pudrición blanca.....	26
3.3.3.3. Pudrición blanda.....	26
3.3.4. Xilófagos de ciclo larvario.....	26
3.3.5. Ataque en estructuras de madera.....	29
3.3.5.1. Anóbidos.....	30
3.3.5.2. Cerambícidos.....	32
3.3.5.3. Curculiónidos.....	34
3.3.6. Xilófagos de origen entomológico. Termitas.....	35
3.4. PROCESOS PATOLÓGICOS DE ORIGEN ABIÓTICO Y SU INCIDENCIA EN FORJADOS DE MADERA.....	37
3.4.1. Agentes atmosféricos o meteorológicos.....	37

3.4.2. Productos químicos.....	38
3.4.3. Fuego.....	38
3.5. ANÁLISIS MICROSCÓPICO COMPARATIVO DE MUESTRAS DE MADERA ESTRUCTURAL.....	40
3.7. ANTECEDENTES EN EL REFUERZO DE FORJADOS DE MADERA.....	48
4. METODOLOGÍA.....	53
4.1. MATERIALES Y MEDIOS EMPLEADOS.INTRODUCCIÓN.....	54
4.2. MADERA. CARACTERÍSTICAS Y PROCEDENCIA DE LAS PIEZAS.....	54
4.3. ACERO .....	57
4.4. MEDIOS DE UNIÓN.....	60
4.4. REFUERZOS Y PRÓTESIS ENSAYADOS.....	61
4.5. PROGRAMAS INFORMÁTICOS, EQUIPOS Y MEDIO EMPLEADOS .....	64
4.5.1. Programa de simulación estructural. Modelo matemático de MEF.....	65
4.5.2. Programas, equipos y medios empleados en el Laboratorio de Estructuras del INIA.....	68
4.5.3. Métodos estadísticos. Descripción de los datos y análisis de la varianza.....	72
4.6. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD RESIDUAL MECÁNICA EN ESCUADRÍAS DE MADERA ATACADAS POR AGENTES BIOTICOS Y ABIÓTICOS CUANDO SE ENCUENTRAN SOMETIDAS A ESFUERZOS DE FLEXIÓN Y CORTANTE.....	75
4.6.1. Reducción de la resistencia mecánica de vigas y viguetas de madera.....	75
4.6.2. Incremento de la deformación y disminución de la capacidad a flexión y cortante.....	79
4.6.3. Reducción de la sección y su comportamiento mecánico.....	81
4.4. MEJORA DE LA CAPACIDAD MECÁNICA MEDIANTE REFUERZO METÁLICO DE PIEZAS DE MADERA SOMETIDAS A FLEXIÓN.....	87
4.4.1. Parámetros de diseño. Adaptación constructiva y comportamiento mecánico.....	87
4.4.2. Proceso selectivo de elección de refuerzo. Variantes y variables estudiadas.....	89
4.4.2.1. Geometría y características mecánicas. Elección del refuerzo.....	89
4.4.2.2. Comportamiento diferencial acero-madera.....	100
4.4.2.3. Estudio de uniones y montaje de piezas en laboratorio.....	109
4.4.2.3.1. Estudio de uniones.....	110
4.4.2.3.2. Montaje en laboratorio.....	117

4.5.	APLICACIÓN DE PRÓTESIS METÁLICAS EN PIEZAS DE MADERA SOMETIDAS A FLEXIÓN Y ATACADAS POR PUDRICIÓN EN EL APOYO.....	124
4.5.1.	Parámetros de diseño. Adaptación constructiva y comportamiento mecánico de la prótesis metálica.....	125
4.5.2.	Montaje de prótesis metálica.....	130
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	133
5.1.	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	134
5.1.1.	Módulo de elasticidad y tensión de rotura en las muestras ensayadas.....	136
5.1.2.	Análisis de resultados.....	138
5.1.3.	Análisis post-rotura de refuerzo metálico en piezas de madera sometidas a flexión..	143
5.1.3.1.	Comportamiento del refuerzo metálico.....	143
5.1.3.2.	Comportamiento de los elementos de unión.....	147
5.1.3.3.	Comportamiento de la madera.....	149
5.1.4.	Análisis post-rotura de prótesis metálica en piezas de madera sometidas a flexión...	155
5.1.4.1.	Comportamiento de la prótesis metálica .....	156
5.1.4.2.	Comportamiento de los elementos de unión.....	159
5.1.4.3.	Comportamiento de la madera.....	162
5.1.4.4.	Rango de uso y mejora del sistema de prótesis.....	163
5.2.	ENSAYOS DE CAMPO.....	170
5.2.1.	Descripción de la obra.....	170
5.2.2.	Análisis de la capacidad residual del forjado.....	172
5.2.3.	Estudio de la geometría del forjado.....	175
5.2.4.	Tipo de refuerzo empleado .....	177
5.2.5.	Montaje y adaptación a la obra .....	179
5.2.6.	Análisis de costes y viabilidad del sistema .....	193
6.	CONCLUSIONES.....	195
7.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.....	199
	BIBLIOGRAFÍA.....	201
	ANEXO DOCUMENTAL (TOMO II)	

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura nº 3.1</b>	Tipología del forjado de madera	10
<b>Figura nº 3.2</b>	Forjados de viguetas de madera antigua	11
<b>Figura nº 3.3</b>	Entrevigado de botes cerámicos	12
<b>Figura nº 3.4</b>	Capas que conforman las fibras de la madera	15
<b>Figura nº 3.5</b>	Esquema de degradación de fibras por ataque de hongos	17
<b>Figura nº 3.6</b>	Pudrición cúbica	21
<b>Figura nº 3.7</b>	Pudrición cúbica (ampliación)	21
<b>Figura nº 3.8</b>	Descuelgue de viguetas por ataque de hongos	22
<b>Figura nº 3.9</b>	Detalle de ataque en apoyo por hongos	23
<b>Figura nº 3.10</b>	Fotografía microscópica de un ataque por hongos	24
<b>Figura nº 3.11</b>	Fotografía microscópica de madera sana	24
<b>Figura nº 3.12</b>	Ataque en extremo de viga por hongos de pudrición	25
<b>Figura nº 3.13</b>	Ataque de anóbidos en viga de madera	28
<b>Figura nº 3.14</b>	Detalle de orificios de anóbidos	29
<b>Figura nº 3.15</b>	Testa de vigueta atacada por insectos	30
<b>Figura nº 3.16</b>	Sección de madera sana	31
<b>Figura nº 3.17</b>	Ataque de anóbidos	31
<b>Figura nº 3.18</b>	Ataque de anóbidos	32
<b>Figura nº 3.19</b>	Insecto adulto de <i>Hylotrupes bajulus</i> L.	33
<b>Figura nº 3.20</b>	Galerías de cerámbridos	33
<b>Figura nº 3.21</b>	Perforaciones de cerámbridos	34
<b>Figura nº 3.22</b>	Perforaciones de curculiónidos	35
<b>Figura nº 3.23</b>	Galería de termitas	36
<b>Figura nº 3.24</b>	Testa de madera	37
<b>Figura nº 3.25</b>	Microfotografía 200x de madera de pino nueva. Corte paralelo	41
<b>Figura nº 3.26</b>	Microfotografía 200x de madera de pino nueva. Corte perpendicular	42
<b>Figura nº 3.27</b>	Microfotografía 200x de madera antigua. Corte paralelo	43
<b>Figura nº 3.28</b>	Microfotografía 200x de madera antigua. Corte perpendicular	43
<b>Figura nº 3.29</b>	Microfotografía 200x de madera antigua atacada. Corte paralelo	44
<b>Figura nº 3.30</b>	Microfotografía 200x de madera antigua atacada. Corte perpendicular	45
<b>Figura nº 3.31</b>	Microfotografía 200x de madera antigua atacada. Corte paralelo	46
<b>Figura nº 3.32</b>	Microfotografía 200x de madera antigua atacada. Corte perpendicular	47
<b>Figura nº 3.33</b>	Refuerzo metálico convencional en ataque por hongos	48
<b>Figura nº 3.34</b>	Refuerzo de madera convencional en ataque de hongos	49
<b>Figura nº 3.35</b>	Refuerzo por placas en pieza atacada por hongos	50
<b>Figura nº 3.36</b>	Refuerzo de madera por la cara inferior	51
<b>Figura nº 3.37</b>	Refuerzo de madera lateralmente	52
<b>Figura nº 4.1</b>	Muestras de madera laminada en el laboratorio	54
<b>Figura nº 4.2</b>	Muestras de madera aserrada en el laboratorio	55
<b>Figura nº 4.3</b>	Muestras de madera antigua en el laboratorio	56
<b>Figura nº 4.4</b>	Plancha de acero de 4 mm. en el corte por plasma	58
<b>Figura nº 4.5</b>	Cabezal del corte por plasma	59

<b>Figura nº 4.6</b>	Tirafondos empleado en los refuerzos	60
<b>Figura nº 4.7</b>	Refuerzo ensayado en las piezas de madera antigua	61
<b>Figura nº 4.8</b>	Refuerzo ensayado en las piezas de madera laminada y aserrada	62
<b>Figura nº 4.9</b>	Prótesis ensayadas en las muestras de madera	63
<b>Figura nº 4.10</b>	Esquema constitutivo del desarrollo del diseño	64
<b>Figura nº 4.11</b>	Ventana del programa informático de cálculo	66
<b>Figura nº 4.12</b>	Detalle del apoyo de pieza reforzada y mallada	66
<b>Figura nº 4.13</b>	PCG de cálculo	67
<b>Figura nº 4.14</b>	Máquina universal de ensayos Ibertest	69
<b>Figura nº 4.15</b>	Célula de carga de máquina universal de ensayo Ibertest	69
<b>Figura nº 4.16</b>	Ensayo a rotura de viga de madera sin refuerzo	70
<b>Figura nº 4.17</b>	Esquema de cargas y apoyos según UNE EN 408	70
<b>Figura nº 4.18</b>	Diagrama carga-refuerzo registrado durante los ensayos	71
<b>Figura nº 4.19</b>	Corrosión de viguetas metálicas de forjado	75
<b>Figura nº 4.20</b>	Ataque por pudrición en viguetas de madera	76
<b>Figura nº 4.21</b>	Grieta en arco de descarga en tabique sobre forjado de madera	79
<b>Figura nº 4.22</b>	Esquema de pérdida de sección en pieza de madera	82
<b>Figura nº 4.23</b>	Gráfico de disminución de resistencia y rigidez (perimetral)	85
<b>Figura nº 4.24</b>	Gráfico de disminución de resistencia y rigidez (parcial)	86
<b>Figura nº 4.25</b>	Zona superior de influencia del refuerzo	88
<b>Figura nº 4.26</b>	Brazo de palanca del refuerzo	88
<b>Figura nº 4.27</b>	Variante nº 1 del refuerzo	91
<b>Figura nº 4.28</b>	Variante nº 2 del refuerzo	92
<b>Figura nº 4.29</b>	Variante nº 3 del refuerzo	93
<b>Figura nº 4.30</b>	Variante nº 4 del refuerzo	93
<b>Figura nº 4.31</b>	Variante nº 5 del refuerzo	94
<b>Figura nº 4.32</b>	Variante nº 6 del refuerzo	94
<b>Figura nº 4.33</b>	Esquema de deformaciones por soldadura en refuerzo	96
<b>Figura nº 4.34</b>	Imagen de prototipo de refuerzo	96
<b>Figura nº 4.35</b>	Variante nº 7 del refuerzo	97
<b>Figura nº 4.36</b>	Variante nº 8 del refuerzo	97
<b>Figura nº 4.37</b>	Variante nº 9 del refuerzo	98
<b>Figura nº 4.38</b>	Variante nº 10 del refuerzo	98
<b>Figura nº 4.39</b>	Variante nº 11 del refuerzo	99
<b>Figura nº 4.40</b>	Variante nº 12 del refuerzo	99
<b>Figura nº 4.41</b>	Esquema de deformación y tensión en flexión	101
<b>Figura nº 4.42</b>	Croquis de la solución y tensión empleada	103
<b>Figura nº 4.43</b>	Esquema del refuerzo	104
<b>Figura nº 4.44</b>	Imagen del cálculo del refuerzo asilado	104
<b>Figura nº 4.45</b>	Imagen del refuerzo aislado y mallado	105
<b>Figura nº 4.46</b>	Esquema de deformación diferencial entre madera y acero	105
<b>Figura nº 4.47</b>	Tronogenización de la sección de madera y refuerzos	106
<b>Figura nº 4.48</b>	Rasantes de tirafondos y placa de refuerzo	107
<b>Figura nº 4.49</b>	Croquis de sucesión de presiones en el refuerzo	107

<b>Figura nº 4.50</b>	Imagen del modelo en programa MEF	108
<b>Figura nº 4.51</b>	Imagen del modelo en programa MEF (detalle)	109
<b>Figura nº 4.52</b>	Imagen del montaje del refuerzo	110
<b>Figura nº 4.53</b>	Imagen del montaje del refuerzo (detallada)	110
<b>Figura nº 4.54</b>	Imagen del modelo sin refuerzo y con acanaledura (alzado)	111
<b>Figura nº 4.55</b>	Imagen del modelo sin refuerzo y con acanaledura (perspectiva)	112
<b>Figura nº 4.56</b>	Imagen del modelo sin refuerzo y con acanaledura (detalle)	112
<b>Figura nº 4.57</b>	Cortante según el ensayo UNE EN 408	113
<b>Figura nº 4.58</b>	Distintas versiones de unión de madera refuerzo	113
<b>Figura nº 4.59</b>	Modelo MEF con tirafondos en los extremos de la pieza	114
<b>Figura nº 4.60</b>	Modelo MEF con tirafondos en toda la parte superior	114
<b>Figura nº 4.61</b>	Modelo MEF con mallado sólido tridimensional	115
<b>Figura nº 4.62</b>	Alzado MEF con pieza atornillada en los extremos	116
<b>Figura nº 4.63</b>	Alzado MEF con pieza atornillada en toda la cara superior	116
<b>Figura nº 4.64</b>	Perspectiva de modelos MEF con distinta configuración de unión	117
<b>Figura nº 4.65</b>	Pieza de gran escuadría y su refuerzo	117
<b>Figura nº 4.66</b>	Corte de pieza de madera con disco	118
<b>Figura nº 4.67</b>	Limpieza de la acanaladura	118
<b>Figura nº 4.68</b>	Corte de pieza de madera con motosierra eléctrica	119
<b>Figura nº 4.69</b>	Corte de pieza de madera con motosierra eléctrica en suelo	120
<b>Figura nº 4.70</b>	Ensamble del refuerzo y pieza de madera de gran escuadría	120
<b>Figura nº 4.71</b>	Esquema de afilado del refuerzo en el extremo.	121
<b>Figura nº 4.72</b>	Pretaladro de pieza de madera	121
<b>Figura nº 4.73</b>	Esquema de atornillado de pieza	122
<b>Figura nº 4.74</b>	Atornillado de refuerzo con tirafondos	122
<b>Figura nº 4.75</b>	Vueltas finales del atornillado	122
<b>Figura nº 4.76</b>	Piezas reforzadas y atornilladas	123
<b>Figura nº 4.77</b>	Pieza de madera antigua reforzada	123
<b>Figura nº 4.78</b>	Esquema de corte de prótesis	124
<b>Figura nº 4.79</b>	Pieza de madera con acanaladuras para recibir prótesis	125
<b>Figura nº 4.80</b>	Prótesis ensamblada sobre pieza de madera	125
<b>Figura nº 4.81</b>	Corte de prótesis por los tirafondos	126
<b>Figura nº 4.82</b>	Corte de prótesis por tubo en zona libre de madera	126
<b>Figura nº 4.83</b>	Corte de prótesis por zona próxima al apoyo	127
<b>Figura nº 4.84</b>	Corte de prótesis por zona de apoyo	127
<b>Figura nº 4.85</b>	MEF de prótesis	128
<b>Figura nº 4.86</b>	MEF de prótesis (alzado)	129
<b>Figura nº 4.87</b>	MEF de prótesis (perspectiva)	130
<b>Figura nº 4.88</b>	Imagen de prótesis ensambladas en laboratorio	130
<b>Figura nº 4.89</b>	Imagen de prótesis ensambladas en laboratorio (alzado)	131
<b>Figura nº 4.90</b>	Imagen de prótesis ensambladas en laboratorio (perspectiva)	131
<b>Figura nº 4.91</b>	Imagen de prótesis ensambladas en laboratorio (detalle)	132
<b>Figura nº 5.1</b>	Máquina universal de ensayos Ibertest	134
<b>Figura nº 5.2</b>	LVDT para medición de deformaciones según UNE EN 408	135

<b>Figura nº 5.3</b>	Detalle de cargas sobre pieza reforzada	135
<b>Figura nº 5.4</b>	Alzado de ensayo UNE EN 408	135
<b>Figura nº 5.5</b>	Deformación de madera laminada reforzada	138
<b>Figura nº 5.6</b>	Deformación de madera laminada con prótesis	139
<b>Figura nº 5.7</b>	Deformación de madera de sierra reforzada	139
<b>Figura nº 5.8</b>	Deformación de madera de sierra con prótesis	140
<b>Figura nº 5.9</b>	Deformación de madera antigua reforzada	141
<b>Figura nº 5.10</b>	Deformación de madera antigua con prótesis	142
<b>Figura nº 5.11</b>	Ensayo de pieza de madera antigua reforzada	143
<b>Figura nº 5.12</b>	Deformación durante ensayo de pieza de madera antigua	144
<b>Figura nº 5.13</b>	Análisis post-rotura de pieza reforzada	144
<b>Figura nº 5.14</b>	Análisis post-rotura de pieza reforzada de madera antigua	145
<b>Figura nº 5.15</b>	Análisis post-rotura de pieza reforzada de madera de sierra	145
<b>Figura nº 5.16</b>	Pandeo lateral del cordón comprimido	146
<b>Figura nº 5.17</b>	Análisis de soldadura en la fase post-rotura	146
<b>Figura nº 5.18</b>	Detalle de deformación de refuerzo tras ensayo	147
<b>Figura nº 5.19</b>	Levantamiento de tirafondos tras ensayo	148
<b>Figura nº 5.20</b>	Deformada de pieza de gran escuadría tras ensayo	148
<b>Figura nº 5.21</b>	Análisis del rozamiento de arandelas en refuerzo tras ensayo	149
<b>Figura nº 5.22</b>	Análisis del rozamiento de arandelas en refuerzo tras ensayo (detalle)	149
<b>Figura nº 5.23</b>	Estudio de las acanaladuras en la madera tras ensayo	150
<b>Figura nº 5.24</b>	Estudio de las acanaladuras en la madera tras ensayo (detalle)	151
<b>Figura nº 5.25</b>	Rotura de pieza de madera reforzada	151
<b>Figura nº 5.26</b>	Rotura de pieza de madera reforzada (detalle)	152
<b>Figura nº 5.27</b>	Serie de imágenes en rotura de piezas de refuerzo 1	152
<b>Figura nº 5.28</b>	Serie de imágenes en rotura de piezas de refuerzo 2	152
<b>Figura nº 5.29</b>	Serie de imágenes en rotura de piezas de refuerzo 3	152
<b>Figura nº 5.30</b>	Imagen de la rotura de pieza de gran escuadría	153
<b>Figura nº 5.31</b>	Rotura forzada de pieza de gran escuadría	153
<b>Figura nº 5.32</b>	Prótesis montada sobre máquina de ensayos	155
<b>Figura nº 5.33</b>	Detalle de prótesis ensamblada en madera antigua	156
<b>Figura nº 5.34</b>	Serie de imágenes de deformación de prótesis ensayada	156
<b>Figura nº 5.35</b>	Análisis de prótesis tras ensayo	157
<b>Figura nº 5.36</b>	Detalle de análisis de soldaduras en prótesis	157
<b>Figura nº 5.37</b>	Rotura de soldadura en prótesis	157
<b>Figura nº 5.38</b>	Pandeo lateral del cordón comprimido en prótesis	158
<b>Figura nº 5.39</b>	Serie de imágenes durante ensayo de prótesis 1	159
<b>Figura nº 5.40</b>	Serie de imágenes durante ensayo de prótesis 2	159
<b>Figura nº 5.41</b>	Serie de imágenes durante ensayo de prótesis 3	159
<b>Figura nº 5.42</b>	Detalle de levantamiento de tirafondos en prótesis	160
<b>Figura nº 5.43</b>	Rotura de soldadura en prótesis de madera antigua	160
<b>Figura nº 5.44</b>	Análisis de la deformación de tirafondos tras los ensayos	161
<b>Figura nº 5.45</b>	Análisis post-rotura de prótesis tras ensayo	162
<b>Figura nº 5.46</b>	Detalle de ensamble en madera de prótesis	162

<b>Figura nº 5.47</b>	Gráfico de proceso de diseño	163
<b>Figura nº 5.48</b>	Comparativa de análisis MEF en prótesis	164
<b>Figura nº 5.49</b>	Esquema de montaje de prótesis mejorada (perspectiva)	165
<b>Figura nº 5.50</b>	Esquema de montaje de prótesis mejorada (alzado)	166
<b>Figura nº 5.51</b>	Comparativa del análisis MEF en prótesis mejorada	167
<b>Figura nº 5.52</b>	Comparativa del análisis MEF en prótesis mejorada (perspectiva)	168
<b>Figura nº 5.53</b>	Cala realizada en baño de edificio antiguo	171
<b>Figura nº 5.54</b>	Vigueta de madera de edificio antiguo con ataque de pudrición	171
<b>Figura nº 5.55</b>	Deformación en forjado de madera de edificio antiguo (detalle)	172
<b>Figura nº 5.56</b>	Paño de forjado de madera antiguo	172
<b>Figura nº 5.57</b>	Alzado de vigueta deformada	176
<b>Figura nº 5.58</b>	Planta de vigueta deformada	176
<b>Figura nº 5.59</b>	Sección de vigueta deformada	177
<b>Figura nº 5.60</b>	Refuerzo empleado en forjado de edificio antiguo	178
<b>Figura nº 5.61</b>	Refuerzo empleado en forjado de edificio antiguo (medidas)	178
<b>Figura nº 5.62</b>	Apertura de entregas a los muros de carga	179
<b>Figura nº 5.63</b>	Marcado de la acanaladura en vigueta de forjado	180
<b>Figura nº 5.64</b>	Marcado de la acanaladura en vigueta de forjado (detalle)	180
<b>Figura nº 5.65</b>	Corte de acanaladura con disco	181
<b>Figura nº 5.66</b>	Corte de acanaladura con motosierra eléctrica	181
<b>Figura nº 5.67</b>	Corte de acanaladura con motosierra eléctrica en entrega	182
<b>Figura nº 5.68</b>	Detalle de acanaladura en vigueta de madera	182
<b>Figura nº 5.69</b>	Sucesión en el afilado de extremo del refuerzo	182
<b>Figura nº 5.70</b>	Montaje de refuerzo en obra	183
<b>Figura nº 5.71</b>	Refuerzo montado en obra antes del atornillado	183
<b>Figura nº 5.72</b>	Desfase entre refuerzo antes del atornillado en vano	184
<b>Figura nº 5.73</b>	Altura del tirafondos de referencia durante el atornillado	185
<b>Figura nº 5.74</b>	Atornillado en obra	185
<b>Figura nº 5.75</b>	Tirafondos durante el proceso de montaje de la pieza en obra	186
<b>Figura nº 5.76</b>	Altura diferencial de refuerzos	186
<b>Figura nº 5.77</b>	Paño de forjado reforzado	186
<b>Figura nº 5.78</b>	Entrevigado en un paño reforzado	187
<b>Figura nº 5.79</b>	Acanaladura practicada en vigueta	187
<b>Figura nº 5.80</b>	Cabeza de vigueta con refuerzo	188
<b>Figura nº 5.81</b>	Distancia entre refuerzo y pieza de madera	188
<b>Figura nº 5.82</b>	Retacado de refuerzo con mortero de cemento	189
<b>Figura nº 5.83</b>	Esquema de nervio final en obra	189
<b>Figura nº 5.84</b>	Paño de forjado retacado	190
<b>Figura nº 5.85</b>	Relleno de hormigón aligerado	191
<b>Figura nº 5.86</b>	Paño completo con relleno de hormigón aligerado	191
<b>Figura nº 5.87</b>	Detalle de paño completo con relleno de hormigón aligerado	192
<b>Figura nº 5.88</b>	Hormigonado final del paño	192

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b>	Agentes xilófagos de origen biótico	13
<b>Tabla 3.2</b>	Hongos de pudrición	19
<b>Tabla 3.3</b>	Xilófagos de ciclo larvario	27
<b>Tabla 4.1</b>	Muestras de madera ensayadas	56
<b>Tabla 4.2</b>	Modulo de elasticidad de las muestras ensayadas	56
<b>Tabla 5.1</b>	Resultados de ensayos	136
<b>Tabla 5.2</b>	Incremento del módulo de elasticidad	136
<b>Tabla 5.3</b>	Incremento de tensión de rotura	137
<b>Tabla 5.4</b>	Características mecánicas de forjado de luz L <sub>1</sub>	173
<b>Tabla 5.5</b>	Características mecánicas de forjado de luz L <sub>2</sub>	173
<b>Tabla 5.6</b>	Características mecánicas de forjado de luz L <sub>3</sub>	173

## RESUMEN

El objetivo principal de esta Tesis es el diseño de un procedimiento constructivo para el refuerzo y consolidación de viguetas de madera en forjados de edificios antiguos utilizando perfiles metálicos que se instalan desde la cara superior del piso.

El sistema tiene dos aplicaciones bien diferenciadas que son analizadas en este trabajo. La primera es el refuerzo de las piezas que han sufrido procesos patológicos centrados en la merma de resistencia y rigidez, y la segunda consiste en la recuperación o consolidación de los apoyos de las piezas que han perdido la estabilidad necesaria como consecuencia de una degradación intensiva de uno de los extremos.

El estudio se ha desarrollado en dos fases. La primera ha consistido en el estudio previo de soluciones propuestas mediante el análisis por el método de los elementos finitos, utilizando el programa informático COSMOSWORKS. Esta fase ha servido para orientar la segunda fase experimental de comprobación. La segunda fase ha consistido en el ensayo en el laboratorio de un total de 45 piezas de distinto tipo y procedencia: 15 piezas de gran escuadría de madera laminada, 15 piezas de madera aserrada y 15 piezas de mediana escuadría de madera procedente de edificios antiguos. Cada grupo de 15 piezas se subdividió en 3 subgrupos de 5 piezas con el siguiente criterio. El primer subgrupo, denominado de referencia, sirvió de testigo de las piezas sin ningún tipo de refuerzo o prótesis. Los otros dos subgrupos restantes para el estudio del refuerzo y de la prótesis respectivamente.

Finalmente, se ha procedido a realizar una experiencia real en obra, en un paño de forjado de un edificio de finales del siglo XIX del centro de Madrid. Se ejecutaron ensayos de campo mediante la aplicación de uno de los refuerzos sobre 32 viguetas de madera de mediana escuadría con distintas longitudes, obteniendo resultados coincidentes con las experiencias del laboratorio. Se concluye que este sistema presenta una sencilla aplicación en la obra, con un coste razonable y con resultados mecánicos de los refuerzos y las prótesis de alta eficacia. El aumento de la rigidez a flexión obtenida es del 200 % y el aumento de la capacidad portante en las piezas reforzadas es del 150 %, respecto a las probetas testigo. La recuperación de los apoyos mediante la prótesis metálica alcanza una capacidad portante aceptable, para la función requerida. La utilización de la herramienta del análisis por elementos finitos ha sido de gran valor y eficacia para el proyecto de las soluciones de refuerzo.

## SUMMARY

The primary target of this Thesis is the design of a constructive procedure for the reinforcement and consolidation of lumber in wood floor slabs of ancient buildings using metallic profiles that settle from the superior face of the floor.

The system has two differentiated applications affluent that are analyzed in this work. First it is the reinforcement of the pieces that have degradation in lost resistance and rigidity, and second consists of the recovery or consolidation of the supports of the pieces that are lost the necessary stability as a result of an intensive degradation.

The study has been developed in two phases. First it has consisted of the previous study of propose solutions by means of the analysis of the finite elements method (FEM), using COSMOSWorks. This phase has served to orient the second experimental phase of verification. The second phase is oriented to group the test in laboratory of 45 different type and origin pieces: 15 pieces of great squareness of laminated wood, 15 sawn timber pieces and 15 pieces of ancient buildings. Each group of 15 pieces subdivided itself in 3 sub-groups of 5 pieces with the following criterion. The first sub-group, served as witness of the pieces without no type of reinforcement or prothesis. The other two remaining sub-groups for the study of the reinforcement and the prothesis respectively.

Finally, it has been come to make a real experience in work, in a wood floor slab of an ancient building (XIX century) in the historic town of Madrid. Tests of field by means of the application the reinforcements were executed on 32 lumber with different lengths, obtaining coincident results with the experiences of the laboratory. The conclusion of this system displays a simple application in the work, with a reasonable cost and mechanical results of the reinforcements and the prothesis of high effectiveness. The increase of the stiffness is 200% and the increase of the load capacity in the reinforced pieces is 150%. The recovery of the supports by means of the metallic prothesis reaches an acceptable load capacity. The use of FEM has been of great value and effectiveness for the project of the reinforcement solutions.



Actualmente existe desplazado y concentrado sobre la rehabilitación de inmuebles antiguos un volumen económico considerable. Entre todas las actividades existentes en este ámbito la rehabilitación y recuperación de la estructura es una parte significativa. La voluntad actual de reconocer el valor histórico de los sistemas constructivos antiguos y la recuperación de los mismos por medios no destructivos fundamentan este trabajo.

Así como en la Arquitectura la *idea* es el camino trazado para llegar a la concepción del espacio y por ende, de su materialización constructiva, a la luz del estudio científico nuestra *hipótesis directriz* guiará el camino hacia aquello que ideamos. En palabras del insigne científico Don Santiago Ramón y Cajal:

*“Buena o mala, una conjetura, un intento de explicación cualquiera, será siempre nuestro guía, pues nadie busca sin plan”* (Ramón y Cajal, 1941).

Con la intención de ser fieles en todo momento a esa hipótesis y ponerla a prueba para validarla, empleamos los medios tecnológicos necesarios para llevar a cabo este estudio. Parafraseando a Feynman *“...porque tenemos la duda es por lo que podemos proponer una búsqueda de nuevas ideas en nuevas direcciones. El ritmo del desarrollo de la ciencia no es solamente el ritmo al que se hacen las investigaciones sino, y mucho más importante, el ritmo al que se idean nuevas cosas que poner a prueba...”* (Feynman, 1999).

A la luz de esto planteamos nuestra hipótesis de la siguiente forma:

**Es posible recuperar los sistemas constructivos de edificios antiguos, concretamente las estructuras de madera de forjados, aplicando mínima incisión en la intervención, sin medios auxiliares convencionales de derribo y apeo, y mejorar con ello la capacidad mecánica de las piezas de madera sometidas a flexión.**

O como se propuso en el Curso Internacional para la Conservación de la Madera en Noruega en 1984:

*“Las técnicas utilizadas en restauración, deben permitir devolver a la madera a su punto inicial”*



El objetivo de toda Tesis es demostrar la hipótesis de partida. Dada la complejidad del tema tratado vamos a realizar una división entre objetivos de primer orden y de segundo orden.

Objetivos de primer orden:

1. Diseño de un perfil metálico que cumpla con los requisitos necesarios para poder implantarse en las piezas de madera y conseguir su recuperación mecánica.
2. Validación de los resultados obtenidos del programa de análisis por elementos finitos al contrastarlos con los resultados de los ensayos de laboratorio.

Objetivos de segundo orden:

1. Estudio de la capacidad residual de la estructura de forjados de madera, tras la degradación sufrida por agentes bióticos o abióticos.
2. Viabilidad del sistema de refuerzo o prótesis de cara a su implantación en obra analizando los factores técnico-económicos.



### 3.1 RESTAURACIÓN Y REHABILITACIÓN DE FORJADOS EN EDIFICIOS ANTIGUOS.

Los primeros forjados de madera (siglo III a.c.) se realizan en Egipto, cuna de aplicación de numerosos materiales constructivos (Maldonado et al., 2002), y que para su construcción se utilizó troncos de maderas de bambú y palmera de baja calidad estructural.

En Caldea se repetirá el uso de troncos de palmera a diferencia de Asiria en el que la existencia de bosques propiciará el uso de forjados en viviendas de hasta tres plantas.

En Grecia se emplean vigas y tableros de forjado ensamblando dos a dos las piezas. Roma, como en casi todos los ámbitos, es una evolución de la tecnología griega. La reducción de escuadrías observada en las cerchas se extiende a evolucionados forjados en las *domus* e *insulae*, siendo estas últimas muestras plausibles de la vivienda en la que se serían los forjados hasta tres alturas.

Los forjados de viviendas en la Edad Media son entramados vistos, al igual que el resto de la estructura. En la vivienda (Chilton, 1995) en la que la madera es solución estructural y decoración protagonista, despunta la carpintería de armar (Nuere, 2000).

Mención especial merece sin duda la arquitectura japonesa y su tradición maderera. Las soluciones de unión entre estructuras sin el empleo de elementos metálicos habla de la riqueza de los detalles constructivos y de la filosofía del *Bushido*, fiel reflejo de la búsqueda incansable de la perfección.

El Renacimiento alumbra las leyes de cálculo que aún hoy son herramienta inseparable del arquitecto. Da Vinci con la mecánica estática y Galileo con el estudio de la flexión harán que las vigas pasen de cilíndricas a rectangulares.

En el XVII L'Orme se anticipa la madera laminada con el primer arco de camones adosados y fijados mecánicamente.

A partir de 1784 con el perfeccionado del alto horno empieza la competición por el primer puesto entre el acero y la madera.

Desde entonces y hasta nuestros días la madera ha sido relegada y arrinconada. Hoy podemos decir que esta época oscura y triste está llegando a su fin. Con la estandarización desde mediados del siglo XX de la madera laminada y con la publicación de normativas estatales y europeas, de muy reciente aparición, la madera estructural vive quizá su mejor momento desde hace siglos.

Hoy en día el número de obras de rehabilitación de edificios, en el interior de los cascos urbanos de las ciudades, es abrumador. Mientras que la obra nueva sigue un avance imparable en los ensanchamientos de las ciudades, los planes urbanísticos, sensibles a la recuperación del tejido urbano (Maldonado y Vela Cossío, 1998), centran muchas veces sus esfuerzos en recuperar los edificios históricos y los cascos de las ciudades revitalizando así los espacios que en su día se dispusieron de una forma más o menos ordenada.

Es la arquitectura del pasado vista como monumento, hito e incluso a veces, objeto de culto. Queda atrás, en el siglo XX, las premisas del Movimiento Moderno (Zevi, 1991) y de sus adalides que consiguieron, hoy lo podemos afirmar, crear una generación de nuevos edificios con nuevos materiales.

También se quedaron en el camino teorías revolucionarias de la restauración con eco francés de finales del XIX. Hoy esa actitud interdisciplinar se asienta en los estudios de arquitectura en los que se reúnen los arquitectos y arqueólogos con una voluntad común, la “recuperación del pasado arquitectónico”.

Esta recuperación es generalmente muy delicada desde el punto de vista constructivo. Los condicionantes y limitaciones se solapan unos a otros convirtiendo el edificio en un verdadero cuadro clínico, en el que la *microhistoria* (Fernández Alba, 1997) recorrida por el edificio se asemeja a la vida de un paciente. Es la reunión del conocimiento histórico y los conocimientos científico-técnicos necesarios para abordar la intervención.

Dado que esa intervención implica actuar en algo preexistente, es necesario en esa operación ir guiados por las técnicas menos destructivas y más certeras (Monjo y Maldonado, 2001). Una de ellas, sino la más importante, es la información, que hace que las obras a veces se conviertan en un guión relativamente preciso de lo que nos vamos a ir encontrando.

Podríamos entender por tanto el acceso a los forjados como una patología curativa (Monjo, 1999) en la que una investigación se acaba convirtiendo en la obtención de un diagnóstico.

Los forjados de madera donde centramos esta investigación se encuentran indefectiblemente unidos al resto del edificio condicionando de esta forma su intervención al comportamiento mecánico de los mismos.

Muros de carga, jácenas, carreras, durmientes, aparecen una y otra vez en las operaciones de saneado y recuperación de los forjados. Este elevado porcentaje de material leñoso no hace sino arredrar a los responsables de las intervenciones como si de una leyenda negra se tratara.

Ya a mediados de los años cincuenta del pasado siglo, se empezó a penalizar el uso de la madera en las estructuras de los edificios de viviendas debido al poco conocimiento del material y sobre todo al temor de su degradación ruinososa.

La confianza en otros materiales más jóvenes como el hormigón armado o el acero arrinconaron a la madera hacia usos no estructurales.

Actualmente sigue existiendo ese temor que comentábamos antes, y eso lleva en numerosas ocasiones a los arquitectos a la sustitución del forjado como solución definitiva.

La madera se demuele junto con el resto del forjado y es sustituida por forjados de hormigón o de acero, de forma indiscriminada. Pese a lo expuesto al comienzo de nuestra exposición, los medios empleados para la reparación no suelen pasar por el análisis de resultados y depuración continua (Monjo y Lacambra, 2007).

Nos planteamos analizar con las técnicas de que disponemos en nuestros días, al material colocado en obra y responsable de la estabilidad de los forjados de un porcentaje altísimo de viviendas localizadas en los centros urbanos.

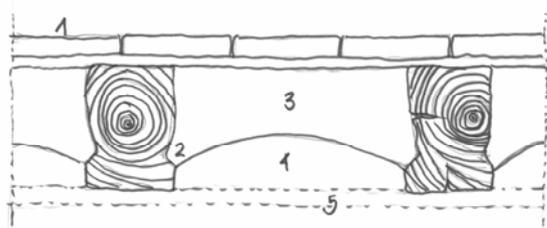
Este es uno de los motivos para el empleo de madera de derribo de edificios en parte de los ensayos de laboratorio y de campo. Madera perteneciente a forjados con más de 100 años de antigüedad.

### 3.2 ETIOLOGÍA Y DIAGNOSIS DE FORJADOS DE MADERA ACTUANDO POR LA CARA SUPERIOR.

El estudio de los procesos patológicos que sufren las estructuras de los forjados de madera, colocadas en obra y con cierta antigüedad, es un paso fundamental de cara a una reparación efectiva y duradera de dichas estructuras (Lasheras Merino, 1998).

Cada vez es más completo el instrumental disponible para la evaluación de las estructuras portantes de madera, tanto los portátiles como en laboratorio (Abásolo, 1998).

Aunque lo fundamental es conocer la tipología constructiva de los elementos objeto de estudio e intervención (Maldonado, 1999) y su comportamiento mecánico (**Figura nº 3.1**).



**Figura nº 3.1**

En este forjado tipo se pueden observar 5 variables muy comunes en la construcción tradicional de este tipo de estructuras.

- 1 Puede variar desde un entablado clavado directamente a las viguetas de madera, a un pavimento sobre capa de agarre.
- 2 La escuadría en viguetas de madera varía de dimensiones en función de la luz y puede ser incluso madera de rollizo.
- 3-4 El entrevigado puede ser un relleno, botes cerámicos, yeso en forma de bovedilla, cascotes, yeso con paja o estar hueco.
- 5 El cielorraso puede ser de yeso, entablado o no existir.

Mientras que las piezas verticales (pilares, pies derechos, etc) introducidas en la fábrica pueden colaborar en mayor o menor medida con el muro, en las estructuras horizontales el trabajo es responsabilidad exclusiva de las piezas de madera horizontales (vigas o viguetas) que con mayor o menor éxito, se encuentran localizadas en un forjado sin capa de reparto o compresión, y en él las deformaciones son independientes unas de otras. Existe una transmisión de esfuerzos que sufren las viguetas hacia los extremos.

La constitución de los forjados de madera suele ser heterogénea aunque coinciden en determinadas características.

Habitualmente contienen viguetas de madera de pequeña escuadría (**Figura nº 3.2**) 100-150 mm de ancho y variable de dimensión de unas de otras en el mismo paño.



Figura nº 3.2

Extremo de forjado situado junto a una terraza plana y descansando sobre un cerramiento. La humedad a la que ha estado expuesto desde hace más de 100 años y la falta de mantenimiento ha llevado a la aparición de hongos de pudrición parda húmeda afectando la cara superior de las escuadrías pero conservando la consistencia pasados 2 centímetros hacia el interior de la pieza. Como puede comprobarse la distancia entre las viguetas es reducida (37 cm en este caso) si la comparamos con los 65 cm usados actualmente en estructuras de hormigón y metálicas. Así mismo es observable la variabilidad de dimensiones entre dos piezas contiguas en lo que al ancho se refiere.

Este tipo de forjados carecen de la “*capa de compresión*” dispuesta actualmente en los forjados de hormigón y mixtos de acero-hormigón denominada “*losa superior de forjado*”<sup>1</sup> por la normativa actual.

Este es uno de los motivos por el que las deformaciones en forjados antiguos son tan acusadas. El fallo de una o varias de estas piezas compromete la vida útil y la seguridad estructural del forjado de madera.

El desplome de la estructura suele ser improbable aunque posible y en la mayoría de los casos viene precedido de grandes deformaciones locales de techos y rotura más o menos escalonada de las fibras de madera.

Los entrevigados suelen estar constituidos por pasta de cemento y yeso o por elementos aligerados (**Figura nº 3.3**) en forma de vasijas o botes cerámicos, muy comunes en el Madrid del XVIII.

Uno de los motivos que evita la caída de forjados, a pesar de la biodegradación de los mismo, es la colaboración entre las viguetas de los forjados y los elementos de entrevigado.

Las técnicas de la época, haciendo gala de ciertas limitaciones, hicieron que los sistemas constructivos no soportaran bien las vibraciones, acciones dinámicas, etc., y a pesar de ello

<sup>1</sup> La norma de diseño y cálculo de forjados de hormigón armado que se encuentra vigente en el momento de redacción de este estudio es la EF-EHE, aunque el término de losa superior de forjado se introduce con la EF-96. Antes de dicha norma en las EF-88 y anteriores a este elemento se denominada capa de compresión. En lo que sigue adoptaremos la denominación de la actual norma al referirnos a este elemento constructivo.

y como se podrá comprobar más adelante la estructura llega hasta nuestros días en un razonable buen estado.



Figura nº 3.3

Entrevigado típico de edificio antiguo del casco antiguo de Madrid, consistente en la disposición de vasijas de arcilla cocida (botellas cerámicas) en los entrevigados y envuelto de yesos y cascotes. La idea es la misma de las bovedillas cerámicas de los forjados de hormigón. La técnica hacía la necesidad de aligerar el cuerpo que forma el forjado. Este sería el antecesor de los grandes aligerados de la losas de hormigón armado, los cilindros de poliestireno expandido tan usado en la obra civil de pasos elevados y carreteras.

Las soluciones radicales de sustitución son las responsables de la desaparición de los elementos de madera en las estructuras, en la mayoría de los casos sin tener datos suficientes que avalen dichas intervenciones.

De cara al análisis pormenorizado de la madera puesta en obra y de sus elementos constituyentes (Tampone, 1996) se muestra a continuación algunos de los puntos necesarios de estudio en este tipo de estructuras:

1. Dirección de la fibra en la pieza, especialmente respecto a la sección transversal así como presencia de duramen y albura y en qué porcentajes.
2. Características individuales:
  - a. Tipo Fibra
    - i. Espesor del anillo
    - ii. Nudosidad
    - iii. Tipo de nudo
3. Fendas de retracción.
4. Características mecánicas:
5. Valor de la resistencia según la sollicitación y dirección de la fibra.
6. Características reológicas:
  - a. Módulo de elasticidad E
  - b. Coeficiente de Poisson  $\nu$
7. Elaboración.
8. Tratamiento.
9. Degradación biótica.
10. Degradación abiótica.

Muchos de estos datos, dada la antigüedad de la pieza y su aparente inaccesibilidad, son complicados de averiguar, por lo que partimos de aquellas características comprobables en inspecciones directas y visuales para posteriormente y a través del instrumental necesario, obtener la mayor información posible acerca del forjado.

### 3.3 PROCESOS PATOLÓGICOS DE ORIGEN BIÓTICO Y SU INCIDENCIA EN FORJADOS DE MADERA.

#### 3.3.1 Introducción.

Como ya hemos señalado más arriba, vamos a realizar un análisis sobre los agentes biodegradantes que afecten exclusivamente a la madera de forjados. Esto no es óbice ni cortapisa para que en las áreas concomitantes comprobemos la existencia de algunos agentes que, aunque no atacan directamente las vigas y viguetas de forjado, pueden llegar afectarles en mayor o menor medida.

Es importante señalar que la bibliografía sobre el estudio de los agentes bióticos que degradan la madera es tan extensa como prolija. Pese a ese mar de información, hemos procurado sintetizar los últimos avances e investigaciones en el campo de la degradación leñosa.

Uno de los fundamentos del estudio biótico de la madera es deducir la extensión del ataque (longitud y espesor) así como la resistencia mecánica residual operante tras dicho ataque en la pieza de madera. Estas es la base para poder concluir si la estructura es sustituible o recuperable mediante un refuerzo o una prótesis.

Haciendo una clasificación de los posibles ataques de la madera, partiremos del esquema (**Tabla 3.1**) en el que se muestran los agentes bióticos más comunes, a saber, mohos, hongos e insectos.

Agentes xilófagos de origen biótico		
Mohos y hongos cromógenos		
Hongos de pudrición	Pudrición parda o cúbica	Pudrición parda húmeda
	Pudrición blanca o fibrosa	Pudrición parda seca
Insectos de ciclo larvario	Pudrición blanda	
	Anóbidos	
	Cerambícidos	
	Licítidos	
Insectos sociales	Curculiónidos	
	Reticulitermes grassei	
	Reticulitermes banyulensis	
	Kaloterms flavicollis Fabre	

**Tabla 3.1**

Uno de los factores definitivos en el ataque xilófago es la humedad<sup>2</sup> que posea la madera colocada en obra. Por otro lado el ataque se produce de fuera hacia dentro, de la albura hacia el duramen, al ser la primera la parte más débil y fácilmente digerible por los agentes bióticos.

La humedad crea las condiciones de desarrollo de los agentes bióticos que llegan a entrar por turnos, como luego veremos, en los elementos constructivos favoreciendo de esta manera el diagnóstico y etiología fundamental del ataque.

La razón de ésta posible degradación por etapas ha de buscarse en los procesos de digestión de los alimentos existentes en las paredes celulares existentes en la madera, celulosa<sup>3</sup>, hemicelulosa<sup>4</sup> y lignina<sup>5</sup> constituyentes de la estructura interna de la misma, nutrientes fundamentales o colaterales y objetivo principal de los ataques bióticos.

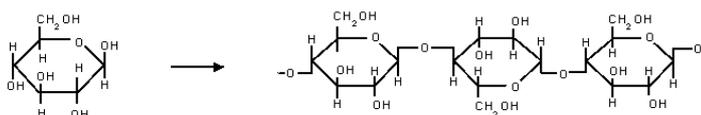
Debemos tener en cuenta que la estructura celular del árbol es determinante no ya en su constitución y resistencia mecánica, sino también en la forma y proceso en el que tiene lugar la degradación y su merma de resistencia.

La pared celular la componen los siguientes elementos singulares (**Figura nº 3.4**):

- Laminilla media también llamada pared intercelular (García Esteban et al., 2003), que sirve de separación entre células. Muy fina, isótropa y formada principalmente por lignina y hemicelulosa.

<sup>2</sup> Casi todos los autores coinciden en marcar como umbral de trabajo de hongos y algunos insectos el valor de contenido de humedad del 20%, por debajo del cual no se producen ni desarrollan.

<sup>3</sup> La celulosa (constituye el 40-50% de la madera) es la biomolécula que más abunda en el planeta compuesto por cientos de miles de unidades de glucosa. Es por tanto un polímero de glucosa, lineal, polidisperso y fibrilar debido a su gran número de puentes de hidrógeno intermoleculares. Posee gran resistencia a la tracción (1000 N/mm<sup>2</sup>), alto grado de polimerización, insoluble en agua pero soluble en sustancias ácidas.

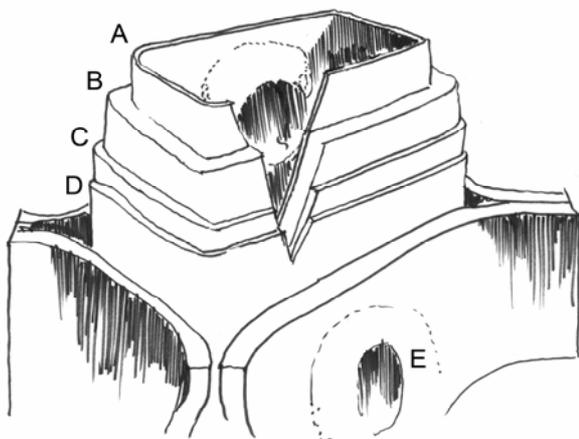


<sup>4</sup> Constituye el 20-30% de la madera, integrada por un polímero amorfo y ramificado de distintos azúcares, bajo grado de polimerización e integrante de la matriz de la celulosa. Degradable con sustancias alcalinas y amoníaco.

<sup>5</sup> La lignina está en la misma proporción que la hemicelulosa, formada por un polímero tridimensional complejo de unidades fenólicas. Insoluble y rígida protegiendo e impermeabilizando así a la celulosa y hemicelulosa. Resistente a compresión (a tracción resiste 240 N/mm<sup>2</sup>) y cortante. A medida que se produce el crecimiento secundario del árbol, la lignina se acumula en las paredes celulares, incrementando la rigidez del mismo a costa de su flexibilidad.

- Pared primaria, procedente del depósito de microfibrillas que se muestran con ángulos grandes con respecto al eje longitudinal y muy desordenado. Anisótropa, constituida principalmente por celulosa muy lignificada.
- Pared secundaria con un porcentaje muy elevado de celulosa y subdividido en tres capas:
  - **Capa S1.** Exterior, muy delgada, con fibrillas orientadas en ángulos opuestos de 70-90°.
  - **Capa S2.** Intermedia, sin cruce de fibrillas y orientadas 30° respecto al eje longitudinal.
  - **Capa S3.** La más delgada, a veces inexistente y con fibrillas en ángulo de 70-80°.

Figura nº 3.4



Vista esquemática de la pared celular mostrando las siguientes zonas:

Pared secundaria. Capa S3 (A).

Pared secundaria. Capa S2.(B).

Pared secundaria. Capa S1.(C).

Pared primaria (D).

Recubriendo la pared primaria está la laminilla media o pared intercelular.

La zona marcada como E corresponde a una punteadura areolar que tiene como misión la comunicación entre las fibras y el transporte de fluidos.

Por todo ello el ataque sobre la madera incidirá en la desaparición parcial o total de la estructura microscópica (celulosa o lignina) en el caso de los hongos y de la estructura macroscópica (albura o duramen) en el caso de los insectos. Pese a ello ambos agentes xilófagos persiguen lo mismo, alimentarse con los constituyentes primarios antes descritos.

Tanto en el caso de hongos como de insectos existen unas pautas que determinan su comportamiento y por ello su identificación. Las características de los ataques se deben a numerosos condicionantes entre los que pueden figurar la especie de la madera atacada, el

contenido de humedad<sup>6</sup> de la madera, y la temperatura ambiente, muy importante sobre todo para los insectos que no son capaces de regular su temperatura corporal.

Para poder concretar que tipo de mermas se producen en los ataques empezaremos por desarrollar brevemente las características de los agentes xilófagos implicados en los mismos.

### 3.3.2 Mohos y hongos

Son microorganismos vegetales (**Figura nº 3.5**) basados en sistemas celulares muy primitivos (carecen de raíz, tallo y hojas) que deben vivir de forma saprófita o parásita al no tener clorofila. Este comportamiento es el que justifica su dependencia de los componentes que integran la madera (Peraza, 2001).

El ciclo biológico es importante y se comenta a continuación. Está compuesto de tres estadios. En primer lugar se produce la deposición de las esporas sobre la superficie de la madera y su posterior germinación. Las esporas se desarrollan en aquellos ambientes que reúnen las condiciones idóneas de humedad y temperatura<sup>7</sup>. Las esporas se desarrollan en forma de hifas<sup>8</sup>, que se alimentan de los elementos de reserva del interior de las células o bien segregan una enzimas degradantes de la pared celular pudiendo así digerir los componentes fundamentales de esta (celulosa y lignina). Al aumentar el número y tamaño de las hifas se forman los micelios o cuerpos de fructificación que envuelven las zonas de ataque, siendo visibles al ser humano y capaces de emitir esporas<sup>9</sup> cerrándose el ciclo de su desarrollo.

---

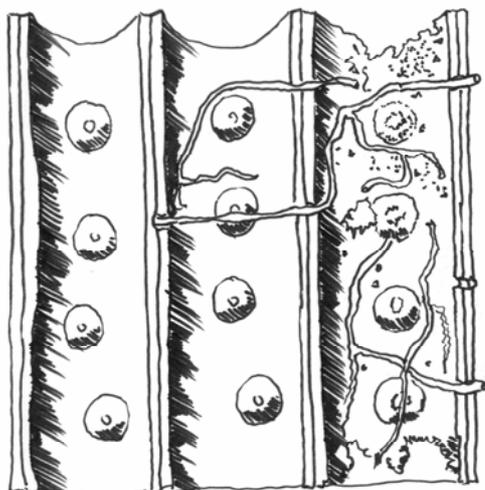
<sup>6</sup> Generalmente por encima del 20% y afectando sobre todo al desarrollo de los hongos y termitas y menos a los insectos de ciclo larvario. Además la humedad excesiva se produce en localizaciones espaciales muy concretas del edificio. Por otro lado las concentraciones elevadas de humedad relativa que afectan a los entramados horizontales de madera se producen en paños de forjado bajo cuartos de aseo y cocinas o muy próximos a estos. Paños de forjado perimetrales y unidos a cerramientos de fachada o pertenecientes a forjado de terraza atravesando un hueco de fachada. Forjados, vigas o viguetas en cotas bajas como planta baja sin cámara de ventilación o con ventilación escasa. Forjados, vigas o viguetas en sótanos o en espacios bajo rasante insuficientemente ventilados.

<sup>7</sup> En un sótano y en condiciones negativas de desarrollo las esporas pueden estar latentes durante años hasta que se producen las condiciones ambientales propicias para su desarrollo.

<sup>8</sup> Las hifas son células extremadamente finas de unos 2µm de diámetro de forma filamentosa, sólo visibles al microscopio. Se introducen en la madera a través de los vasos y traqueidas.

<sup>9</sup> Algunos autores mencionan valores de hasta 30.000 millones de esporas por día.

**Figura nº 3.5**



Ataque producido por las hifas de los hongos a la pared celular. Se puede comprobar como la introducción de las esporas que al germinar se convertirán en la hifas se produce o bien por los poros de la pared o por las punteaduras areolares existente en la pared celular y que comunican las distintas fibras de la madera de forma horizontal. La degradación en forma de gradiente y en función del tipo de hongo a que se refiera irá consumiendo de forma curiosamente selectiva unas capas de la pared celular y otras no llegando en algunos casos a la ruina total de la sección de madera como veremos en la exposición acerca de los tipos de ataques bióticos.

Así mismo existen tres factores que influyen en el desarrollo de los microorganismos xilófagos:

- El contenido de humedad de la madera.
- La temperatura del aire.
- La presencia de oxígeno (son aerobios y por tanto no sumergibles).

Sin duda la humedad es el factor más decisivo en el ataque de la madera por mohos u hongos. Los rangos de trabajo de estos agentes mostrados a continuación son orientativos al ser un ámbito de prolífica investigación (Nielsen et al., 2004). Los estudios en este campo orientados a determinar el ámbito de trabajo de mohos y el metabolismo secundario bajo distintas humedades y temperaturas arrojan entre otros, datos relativos a las potentes toxinas producidas por mohos alojados en distintos materiales de construcción (Nielsen, 2003), no siendo necesariamente leñosos. Se manejan valores de actividad del agua ( $a_w$ ) en los materiales (Ayerst, 1969), relacionada con la humedad de equilibrio higroscópico (HEH),<sup>10</sup> importante para evaluar los rangos de humedad en la madera colocada en obra. Comprobamos que afecta tanto la escasez como el exceso de humedad para la progresión del ataque.

<b>18%-20%</b>	<b>35%-----50%</b>	<b>75%</b>
Límite inferior	Franja óptima	Límite superior

<sup>10</sup> La humedad de equilibrio higroscópico (HEH) es el grado de humedad de la madera que corresponde a un estado ambiental concreto. A una temperatura ambiente y humedad relativa del aire les corresponde una humedad de equilibrio higroscópico.

Por lo que respecta a la temperatura del aire podemos comprobar que son los característicos del interior de los edificios calefactados.

<b>2 °C-3°C</b>	<b>20 °C ----- 30 °C</b>	<b>40°C—45°C</b>
Límite inferior	Franja óptima	Límite superior

Finalmente y dado el carácter aerobio de este tipo de microorganismos la presencia de oxígeno también influye en el comportamiento y su posterior desarrollo. La reacción química<sup>11</sup> que tiene lugar explica la gran cantidad de agua que se forma en la respiración (aspiración) de oxígeno por parte de los hongos xilófagos.

También pueden influir en la reproducción de los distintos microorganismos el tipo de sustrato, concretamente su acidez, aunque en el caso de los hongos xilófagos no hay sustrato alcalino que no pueda ser modificado por el propio hongo para volverse ácido y así cambiar su pH hacia el óptimo del desarrollo.

Finalmente está la potencia reproductora del hongo que generalmente y como ya hemos mencionado antes es elevadísima (Peraza, 2001).

Veamos ahora qué tipo de hongos son los que afectan a los forjados de madera y en que grado.

Tanto los mohos como los hongos cromógenos tienen una característica en común. Se alimentan de los componentes del interior de las células sin atacar los componentes estructurales de las paredes de las mismas, es decir, la celulosa y la lignina.

Por ello la incidencia sobre la capacidad mecánica de las estructuras no es significativa. Sin embargo en el caso de los mohos, pueden con su presencia crear las propiedades idóneas para el desarrollo de los hongos de pudrición.

Las hifas de los mohos son incoloras y por ello su ataque solo es detectable cuando se produce una germinación de esporas sobre la superficie de la madera, adquiriendo un color oscuro.

---

<sup>11</sup> La reacción que tiene lugar es  $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \leftrightarrow 6H_2O + 6CO_2 + \text{calor}$ , por tanto reversible y exotérmica.

Los hongos cromógenos cambian, con su ataque, a la madera hacia tonos azulados y verdes, sin afectar, al igual que los mohos, de una forma directa en la capacidad resistente de la estructura.

### 3.3.3 Hongos xilófagos

Como ya hemos comentado antes, los hongos de pudrición atacan las paredes celulares de la madera, consumiendo sus constituyentes fundamentales gracias a la acción de las enzimas que segregan los propios hongos.

La posible aparición de los hongos de pudrición viene dada por varios síntomas que se pueden dar aisladamente o de forma conjunta. Un esquema se puede ver en la **Tabla 3.2**.

Hongos de pudrición	
Pudrición parda húmeda	<i>Caniophora cerebella</i> D. <i>Poria vaillantii</i> F.
Pudrición parda seca	<i>Sérpula lacrymans</i> W.
Pudrición blanca	<i>Coriolus versicolor</i> PSK.
Pudrición blanda	<i>Chaetomium globosum</i> C.

Tabla 3.2

- Color poco habitual de la madera (tonos más oscuros o claros en función del tipo de microorganismo).
- Degradación física de la madera.
- Existencia de micelios o cuerpos de fructificación sobre la superficie de la madera o de otros elementos constructivos próximos a ésta.
- Olor característico.
- Presencia de insectos xilófagos que suelen seguir a los ataques de hongos.

#### 3.3.3.1 Pudrición parda (Basidiomicetos)

La pudrición parda, también llamada pudrición cúbica, destructiva o carbonizante, es la más peligrosa de todas las producidas por hongos. Esto se debe a la pérdida que se produce al consumir la celulosa y hemicelulosa dejando la lignina al descubierto y facilitando así un agrietamiento característico de la madera. La rotura trae consigo el desprendimiento de bloques *cúbicos* o *prismáticos* dando el nombre común a este tipo de pudrición.

Desde hace más de medio siglo es conocida la tolerancia de los hongos de pudrición (Hirt, 1949) a los derivados del cobre<sup>12</sup> aunque los límites de dicha tolerancia son conocidos hace poco más de diez años (Gadd, 1993). Esta tolerancia podría estar relacionada con la secreción de ácido oxálico (Clausen and Green, 2003) producida por los hongos y directamente implicada en la degradación de celulosa y lignina, sobre todo en las fases iniciales de la colonización<sup>13</sup>. El estudio de la tolerancia al cobre, por parte de la madera, tiene dos finalidades claras. Por una parte, la menos interesante para este trabajo, el reciclado de residuos con contenidos de cobre, no por ello poco relevante científicamente. Por otra, la mejora de los tratamientos preventivos de la madera ante los ataques de degradación celular.

Según algunas fuentes la pudrición no se hace visible hasta que se ha perdido entre un 10 y 20% del peso de la pieza, correspondientes a pérdidas de resistencia mecánica de entre un 80 al 95% (Kraemer 1958; Peraza, 2001; Arriaga et al., 2002).

Esa pérdida de estabilidad hace que se descuelguen las viguetas en grupos de 3 ó 4, al haberse reducido su longitud física. Al ser un problema de estabilidad también podemos hablar de zonas sin afectar en los que la madera goza de todas sus características mecánico-resistentes. Esto nos llevará hacia la solución de prótesis metálica en el intento de resolver este proceso patológico, en el que la pieza precisa un complemento de su longitud, que actúe solidariamente con ella en la admisión de las tensiones de flexión a que va estar sometida.

El ataque de este tipo de hongos suele preceder al ataque de los insectos xilófagos de la familia de los anóbidos.

#### **3.3.3.1.1 Pudrición parda húmeda**

Es la más habitual y extendida (**Figuras nº 3.6 y 3.7**). Dado que la humedad es de vital importancia en la fisiología del hongo (Kraemer, 1958), el grado de ésta determinará su ciclo vital, su desarrollo, la digestión enzimática, etc.

---

<sup>12</sup> Los derivados del cobre llevan empleándose como uno de los más importantes fungicidas en la madera desde hace más de 200 años.

<sup>13</sup> En el caso de la pudrición parda el ácido oxálico reacciona con el cobre formando oxalato de cobre, insoluble y por ende resistente aunque no es el único factor implicado en la tolerancia al cobre donde otros factores como el pH del sustrato son determinantes.

En el caso concreto de los hongos de pudrición parda húmeda<sup>14</sup> las condiciones de humedad suelen ser sostenidas en el tiempo, a través de fugas en las instalaciones de abastecimiento de agua o de desagüe, o por pertenecer a zonas próximas a puntos frecuentes de infiltración como son fachadas o cubiertas de edificios.

Como se ha comentado anteriormente, las hifas de los hongos atacan la pared celular y se van moviendo por las distintas células a través de las aperturas areolares o por otras aberturas existentes (Peraza, 2001). Este ataque de los componentes principales de la pared celular se produce según algunos autores de forma selectiva (Green III & Highley, 1996) atacando a la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) sin afectar a la lignina.



Figuras nº 3.6 y nº 3.7

Vigueta de forjado de vivienda con más de 100 años de antigüedad perteneciente a un edificio entre medianería en el casco histórico de Madrid. La pudrición visible se debe a la fuga constante de humedad desde un aseo y una cocina localizadas justo encima y que han generado una humedad sostenida muy por encima del 20% en lo que a la madera se refiere. El deterioro se materializa en una pérdida de masa física que rehunde la pieza de madera respecto del entrevigado que está conteniendo la estructura y acodalándola.

El color pardo característico de este tipo de pudrición se debe a la pérdida de celulosa (blanca) quedando la lignina (marrón) presente. Pese a la rigidez que proporciona la lignina al no existir celulosa la resistencia mecánica del conjunto es inexistente en la zona donde se ha producido la degradación.

La “pudrición parda húmeda” afecta tanto a coníferas como a frondosas. De ámbito muy localizado incide en las vigas y viguetas preferentemente por la testa dada la mayor rugosidad y porosidad a la humedad de esta zona de la pieza donde las hifas gozan de un microclima de humedad (siempre por encima del 20 %) para su proliferación y desarrollo.

<sup>14</sup> Son varios los autores que opinan que ésta división, aceptada y conocida generalmente, no es la más adecuada (Kraemer 1958; Peraza, 2001). Pese a ello y a la veracidad que nos merece sus razonamientos, aquí la emplearemos por lo extendida de la misma.

Al ser localizadas, las humedades causantes afectan generalmente a los extremos de piezas (**Figura nº 3.8**). Esto se debe a la disposición de los baños y cocinas que se sitúan junto a cerramientos y por tanto sobre extremos de forjados.



**Figura nº 3.8**

En esta figura se puede comprobar cómo se descuelgan grupos de dos o más viguetas cuando se producen pudriciones por humedades sostenidas en el tiempo. En este caso el foco de humedad es una bajante interior y que filtra sistemáticamente sobre todo en el forjado de techo de planta baja. En este caso además los servicios municipales ante una denuncia aparearon el forjado de la planta baja ante el riesgo de colapso del mismo.

El porcentaje de casos en los que este tipo de ataques afectan a extremo de viguetas es muy considerable, y la longitud de vigueta afectada dependerá de numerosos factores como son la duración de la humedad, la localización exacta de la misma, el tipo de madera colocada, etc.

Otro caso muy común de este tipo de procesos corresponde a las viguetas pegadas a cerramiento de edificación (**Figura nº 3.9**) y muy especialmente a aquellas que coinciden con el hueco de salida a la terraza.

El más común es la *Caniophora cerebella* Duby, de identificación poco precisa al tener espectro de rotura en cubos muy variable y coloración yendo desde el rojizo al pardo. Su franja óptima de desarrollo ambiental está entre los 0 y 34° C y 75% de humedad relativa.

El ataque genera una rápida rotura de los polímeros de la holocelulosa y un descenso considerable de la resistencia mecánica de las piezas. Hay autores que citan valores ensayados en laboratorio y que varía desde el 75% de pérdida de resistencia tras una pérdida del 1% de peso (Richards, 1954), 18% de pérdida de tensión de compresión perpendicular a la fibra tras el 2% de pérdida de peso (Toole, 1971) y 10% de reducción de tensión de compresión paralela a la fibra tras una pérdida de peso del 2% (Mizumoto, 1965).

Pese a las distintas franjas de trabajo todos coinciden en que la depolimerización de la celulosa viene precedida de la pérdida de los azúcares hemicelulósicos al acceder a los azúcares celulósicos que se encuentran en capas posteriores de la pared celular (Green III & Highley, 1996). Esto se debe a la incrustación de hemicelulosa existente envolviendo las microfibrillas de celulosa, siendo preciso eliminar la primera (hidrólisis de la hemicelulosa) para acceder a la segunda.



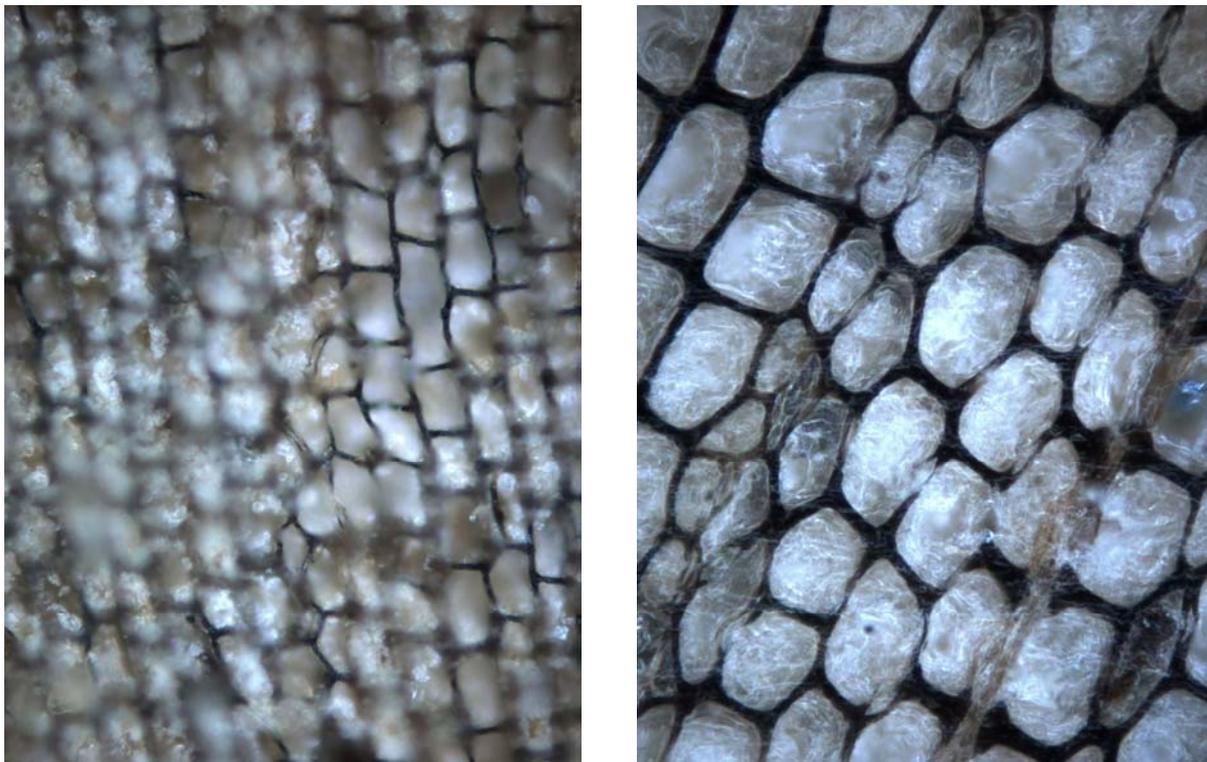
**Figura nº 3.9**

Detalle de vigueta atacada por pudrición en la zona del apoyo en el muro de carga y supuestamente sobre una carrera que obviamente y dado el grado de ataque se encontrará en las mismas condiciones de pudrición.

También y pese a lo extendido que es la concepción de componentes enzimáticos en la desintegración de la celulosa, ya desde finales de los años 60 del siglo XX se menciona la existencia de agentes no enzimáticos, radicales  $\cdot\text{OH}$ , y producción de peróxido de hidrógeno en dicho proceso (Cowling & Brown, 1969).

En el ataque visto a nivel microscópico la capa S3, compuesta por lignina principalmente (Highley & Murmans, 1987) y perteneciente a la pared secundaria de las traqueidas, permanece intacta durante el ataque (Kuo et al, 1988). El ataque de forma selectiva por tanto se concentra en la S2, compuesta por celulosa en mayor proporción (Green III & Highley, 1996).

Ya con pocos aumentos se detecta la degradación de la pared de las fibras y su reducción (**Figuras nº 3.10 y 3.11**).



Figuras nº 3.10 y nº 3.11

En estas dos imágenes se puede comprobar una comparativa entre la estructura de fibras de madera atacada por hongos de pudrición parda húmeda y la de la madera antigua sana.

Así mismo en investigaciones de finales del siglo XX se ha constatado que la porosidad de S3 permanece relativamente inalterada tras el ataque selectivo de los hongos, excluyendo a los polisacáridos (Fluorin et al., 1991). En estudio bajo microscopio electrónico se ha llegado a comprobar como las hifas del hongo permanecen en la zona de *lumen* mientras la S2 es desintegrada, y se forma una vaina o matriz de hifas extracelulares cubriendo S3 (Larsen & Green, 1992; Green et al., 1989, 1992). La formación de la matriz de hifas llegan a ocluir la pared celular, incrementando el grado de depolimerización, o rotura de polímeros de celulosa en las capas interiores gracias a la acción de agentes químicos de bajo peso molecular liberados desde la matriz de hifas en la S3, y por azúcares de bajo peso molecular transportados por difusión desde la interfase de la matriz y la S3. Todo esto en beneficio y desarrollo del hongo.

La depolimerización de la celulosa y de la hemicelulosa por hidrólisis (Green et al, 1999) se realiza por acumulación de ácido oxálico (realizado durante el desarrollo del hongo) y de

otros ácidos orgánicos, abriendo la porosidad de la pared celular (Grethlein, 1985; Beck-Anderson, 1987; Ucar, 1990).

Se viene aceptando que la pudrición húmeda afecta preferentemente (Highley, 1978) a la albura de la madera frente al duramen (Cowlin, 1961), aunque ensayos recientes han demostrado el poco fundamento de esa selección (Green III & Highley, 1997).

### 3.3.3.1.2 Pudrición parda “seca”

Por otro lado la “pudrición parda seca”, concretamente la *Merulius Lacrymans*<sup>15</sup>, afecta a maderas localizadas en lugares mal ventilados, cabezas de vigas (**Figura nº 3.12**) empotradas en muros, producidas por hongos cuyas hifas son capaces de transportar el agua desde los lugares húmedos hasta la madera seca.



**Figura nº 3.12**

Ejemplo de viga de forjado de gran escuadría atacada por pudrición parda seca.

La pudrición se extiende fuera del origen de la humedad a las zonas secas al acumular el agua procedente del metabolismo de la celulosa y generando un micro ambiente en forma de pequeñas lágrimas que le dan su nombre.

Afecta preferentemente a madera de coníferas, aunque también lo puede hacer en la de frondosas, siendo resistente el duramen del roble. Su óptimo de desarrollo está entre los 20 y 27° C, y la humedad relativa se encuentra por encima del 40 %. En la península ibérica permite un desarrollo más rápido en invierno que en verano (Arriaga et al., 2002).

<sup>15</sup> Conocido desde la antigüedad. En el libro del Levítico lo denomina “La lepra de las casas”.

Los micelios de este hongo pueden introducirse hasta dos metros en paredes de hormigón. Esa introducción tiene lugar mediante unos cordones de micelios que reciben el nombre de rizomorfos (Peraza, 2001).

### **3.3.3.2 Pudrición blanca**

Por lo que se refiere a la pudrición blanca también llamada fibrosa, corrosiva o lignificante, ataca preferentemente a frondosas y no tanto a coníferas. El color blanco se debe a la desaparición de la lignina (color marrón).

La lignina es el segundo polímero natural (después de la celulosa) más abundante en la naturaleza y el compuesto aromático más abundante (40%) de la energía solar almacenada en las plantas (Leonowicz et al., 1999).

De hecho las investigaciones apuntan hacia la aceleración de la degradación de lignina cuando se realiza en presencia de celulosa. Existe pues una interrelación entre la aceleración de la depolimerización de la lignina y de la celulosa. Hay fuentes que mencionan el hecho de la inexistencia de un ataque puro, contra la celulosa o la lignina, produciéndose en cualquier caso una mezcla de ambos.

### **3.3.3.3 Pudrición blanda**

Otro tanto ocurre con la pudrición blanda que ataca en situaciones de humedad muy elevadas y que raramente incide en maderas colocadas en forjados de obras de edificación.

### **3.3.4 Xilófagos de ciclo larvario**

Son xilófagos (**Tabla 3.3**) de origen entomológico. En el caso de los insectos (tanto en los de ciclo larvario como posteriormente cuando hablemos de las termitas) es necesario realizar un estudio exhaustivo de varios factores que nos guiarán de forma eficaz de cara a la intervención y a la idoneidad de la solución de refuerzo que vamos a aplicar posteriormente.

Los factores objeto de estudio son:

1. Especie del ataque.

2. Biología y comportamiento del insecto.
3. Ambiente exterior e interior de la pieza de madera.
4. Edad y especie de la pieza de madera.
5. Sistema constructivo empleado.

<b>Xilófagos de ciclo larvario</b>	
<b>Anóbidos</b> (Carcoma)	<p><b>Anobium punctatum De Geer</b>                      Nicobium castaneum De Geer  <b>Xestobium rufovillosum De Geer</b>                      Nicobium hirtum                      Oligomerus ptilionides Woll                      Ernobius mollis L.                      Stegobium paniceum L.                      Ptilinus pectinicornis                      Hadrobregmus pertinax                      Hadrobregmus carpetanus</p>
<b>Cerambícidos</b> (Carcoma grande)	<p><b>Hylotrupes bajulus L.</b>                      Hesperophanes cinereus Villier                      Ergates faber L.                      Stomatium fulvum Vill.</p>
<b>Líctidos</b> (Polilla)	<p><b>Lyctus brunneus Steph</b>                      Lyctus linearis Goeze                      Lyctus planicollis Leconte                      Africanus lesne</p>
<b>Curculiónidos</b> (Gorgojo)	<p>Pselactus spadix H.                      Hexarthrum exiguum B.                      Amaurorrhinus bewickanus W.  <b>Cossonus</b> parallelepipedus H.  <b>Cossonus</b> linearis  <b>Pentarthrum</b> Huttoni</p>

**Tabla 3.3**

Los insectos de ciclo larvario que más comúnmente atacan la madera de entramados horizontales son del orden de los coleópteros y pertenecen a varias familias.

El ciclo larvario consiste básicamente en 4 etapas realizadas sobre la viga de madera.

La primera consiste en la colocación de los huevos, en las fendas y fisuras de las piezas realizada por las hembras a través del oviscapto, un elemento de su anatomía que permite situar los huevos a cierta distancia de su cuerpo gracias a un tubo estrecho y largo.

Los huevos eclosionan y se transforman en larvas que realizan el verdadero ataque en la madera, al construir galerías consumiendo la celulosa, la lignina así como otros componentes de la madera.

La permanencia en el interior de la pieza varía según la especie entre uno y diez años. El grado de daño producido a la pieza de madera es variable según la especie.

En la tercera etapa la larva se convierte en pupa cerca de la superficie para finalmente romper la madera en forma de pequeños agujeros (**Figura nº 3.13**) al completarse la transformación a adulto o imago y volar hacia el apareamiento (Peraza, 2001).



**Figura nº 3.13**

Pieza de madera atacada por hongos de pudrición e insectos de ciclo larvario (anóbidos).

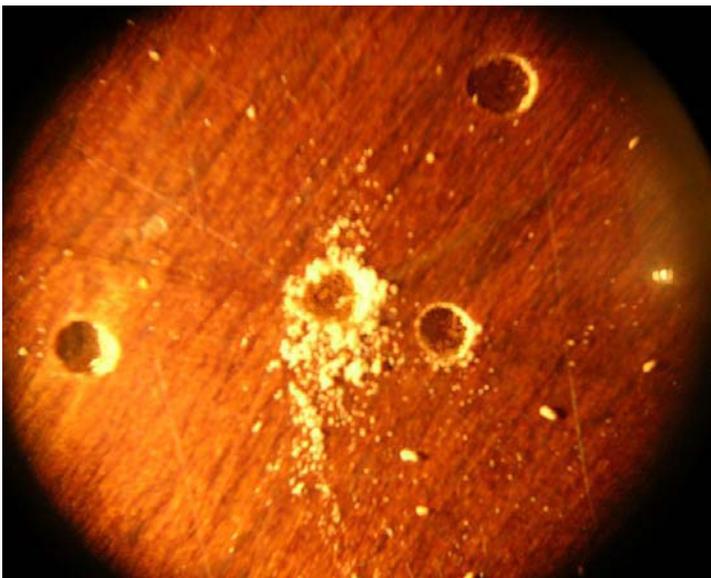
Es importante señalar que la fase crítica del ataque se produce en el estado de larva. Ya desde los años 50 del siglo XX se han tratado las plagas con distintos tratamientos, como el calor, por ejemplo, manejando temperaturas de hasta 55° sostenidas durante una hora (Hansen and Vang Jensen, 1996). Si bien esta técnica es empleada sobre todo en el tratamiento de plagas de *Anobium punctatum* De Geer, presente fundamentalmente en los muebles y objetos de interés histórico-artístico. Otras técnicas más novedosas están aplicando microondas como tratamiento (Capuz, 2006).

Como se ha comentado el grado de ataque depende de la especie de que se trate, dado que las larvas de algunas especies trabajan a pocos centímetros de la superficie de la madera mientras que otras se pueden internar hasta 10 centímetros.

Este tipo de ataque puede infligir daños en las secciones de madera (Arriaga et al., 2002) que lleguen a la rotura de la pieza al descender hasta el centro de la misma (cerambícidos). Por otro lado como el diámetro de la galería se adapta al exoesqueleto de la larva en crecimiento (Liotta, 2000), dichas galerías van creciendo de tamaño según la edad de la larva. Además las longitudes de las galerías también dependen de la especie de infestación, yendo desde los 10 centímetros en el caso de anóbidos y líctidos y más de los 50 centímetros cuando se trata de la especie de los cerambícidos.

La larva en su digestión suele expulsar excrementos que forman una pasta al mezclarse con los residuos de la madera, y que constituye lo que se conoce como carcoma.

La carcoma (**Figura nº 3.14**) puede quedar dentro de las galerías (cerambícidos y líctidos) o ser expulsada al exterior (anóbidos).



**Figura nº 3.14**

Detalle con micrómetro de 10x de perforaciones de salida de insectos xilófagos de ciclo larvario y los restos de carcoma en la galería.

### 3.3.5. Ataque en estructuras de madera

Cómo ya hemos descrito antes, los ataques de insectos de ciclo larvario en vigas y viguetas puede llegar a ser demoledor. Pese a ello, en un porcentaje muy alto, dichos ataques se concentran en franjas del borde externo de las piezas (**Figura nº 3.15**), generalmente donde se ubica la albura y que por la testa de las piezas se distingue claramente por un cambio de

coloración de una zona más clara (albura) a otra más oscura correspondiente con el duramen<sup>16</sup> (**Figura nº 3.16**).



**Figura nº 3.15**

En esta figura se puede comprobar el alto porcentaje de albura frente a duramen y el ataque de insectos de ciclo larvario con orificios de salida en la misma testa. Denota por tanto que la pieza de vigueta se encontraba en unas condiciones de humedad elevadas y temperaturas idóneas para el desarrollo de estos organismos. La figura es de una vigueta de forjado de edificio demolido con las dos entalladuras laterales practicadas para recoger la socarrena. La humedad que se observa se debe a que su almacenamiento tiene lugar a la intemperie

Por ello y previo al cálculo de la resistencia residual operante en las piezas tras los ataques mostramos a continuación los insectos que más afectan a las estructuras de madera y las características de los ataques.

#### **3.3.5.1. Anóbidos.**

El más común es el *Anobium punctatum* De Geer. Este insecto pertenece al orden de los “Coleópteros” y familia de los Anóbidos. Se le conoce vulgarmente por carcoma fina.

**Larva:** Color blanco excepto la boca de color oscuro. 4 mm de longitud. Actividad muy lenta.

**Alimento principal de la larva:** Albura de coníferas y frondosas europeas (roble y olmo) A veces duramen si está colonizado por hongos de pudrición.

**Forma, diámetro medio y dirección de la galería:** circular de 1 a 3 mm Galerías en todos los sentidos en el interior de la pieza.

<sup>16</sup> El ataque por ejemplo del *Anobium punctatum* De Geer puede darse en el duramen cuando existen pudriciones en el mismo, es decir, ataques previos de hongos de pudrición (Peraza, 2001).

**Figura nº 3.16**

En esta figura se puede comprobar el cambio de coloración que se produce entre el duramen (en el interior) y la albura (exterior). La parte del duramen corresponde a la zona donde los canales de transporte de fluidos ha solidificado haciendo esta zona más trabajosa en la elaboración de galerías por parte de la larva. Sin embargo la parte de la albura, con un contenido de humedad mayor posee mucha menor dureza y es la zona de ataque por excelencia. También se pueden comprobar algunas fendas radiales, que son huecos idóneos en los que se pueden depositar tanto las esporas como la propia deposición de huevos de insecto a través del mencionado ovíscapto. La figura pertenece a una viga de escuadría 180x200 utilizada en los ensayos de la presente tesis.

**Ciclo larvario:** de 8 meses a 3 años, con reducción sensible cuando existe calefacción (2 generaciones en un año). Colocación de huevos (entre 20 y 40 de media) en zonas rugosas o en las mismas perforaciones que insecto adulto practica en su salida (**Figura nº 3.17**). El huevo tarda 2 semanas en eclosionar y la larva una vez llegado al período de empupamiento tarda dos semanas en convertirse en adulto.

**Figura nº 3.17**

Viga de forjado de madera atacada por anóbidos. Es importante recordar que los agujeros de salida no implican necesariamente ataques distintos, pudiendo ser aprovechados por otros congéneres para la salida del interior de la galería una vez que pasan de larva a imago.

**Biología de digestión:** Endosimbiosis entre microorganismos y la propia larva que aloja en las células de su intestino bacterias, hongos o protozoos encargados de degradar la celulosa para extraer los nutrientes necesarios.

**Condiciones ambientales:** Madera vieja no mayor de 100 años. Temperatura óptima entre 22 y 23° C. Humedad relativa óptima entre el 50 y 60 %.

**Daños en la pieza de madera:** Indistintamente a coníferas o frondosas y se instala tanto en la albura como en el duramen aunque tiene clara preferencia por la primera. Profundidad máxima en la sección de la pieza de madera de 4 a 5 cm

Suelen acompañar a los ataques (**Figura nº 3.18**) de hongos de pudrición y prefieren bajas temperaturas. El insecto adulto aparece a finales de mayo o principios de junio, de 2.5 a 4 mm de longitud, con color castaño rojizo hirsuto y pelo amarillo. Élitros estriados de forma regular. La forma del agujero suele ser circular y tener un diámetro de 1 a 3 mm.



**Figura nº 3.18**

Suma de ataque en viga de madera, en la que la aparición de los pequeños agujeros de salida circulares delatan la infestación de anóbidos.

#### 3.3.5.2. Cerámbricidos.

El más dañino para las estructuras de forjados es el *Hylotrupes bajulus* L. Este insecto (**Figura nº 3.19**) pertenece al orden de los “Coleópteros” y familia de los Cerámbricidos. Se le conoce vulgarmente por carcoma grande.

**Larva:** Color blanco plateado llegando a los 30 mm de longitud y 6 mm de diámetro.

**Alimento principal de la larva:** Albura de coníferas, las frondosas son inmunes. A veces puede atacar el duramen.

**Forma, diámetro medio y dirección de la galería:** Ovalada de hasta 10 mm de diámetro, taponadas por carcoma (serrín y excrementos) y con marcas o estrías en las paredes de la misma. Las galerías siguen la dirección de la fibra.

**Ciclo larvario:** Varía mucho, de 2 a 10 años. Lo común es que dure entre 4 y 6 años (Figura nº 3.20).

**Biología de digestión:** No poseen en su intestino las enzimas nitrogenadas a diferencia de otros insectos por lo que suelen actuar detrás de hongos que si las poseen y han predigerido los compuestos y nutrientes necesarios. Esto limita su edad de ataque a maderas en sus primeros 80 años.



**Figura nº 3.19**

Insecto adulto de *Hylotrupes bajulus* L. Longitud de 17 a 25 mm. Se puede observar las dos manchas blancuzcas situadas en los élitros. Los ataques de las larvas de estos insectos son con diferencia los más graves que puede llegar a sufrir una estructura de madera. (Fuente: HELPEST21).

**Condiciones ambientales:** Maderas secas (10% al 14% de humedad relativa)



**Figura nº 3.20**

Galerías formadas por insectos de ciclo larvario del orden de los Cerambycidae, conocido vulgarmente como "carcoma grande".

**Daños en la pieza de madera:** Afectan únicamente a las coníferas (**Figura nº 3.21**), preferentemente la albura atacando a veces al duramen. El valor nutritivo de la albura de la madera decrece con la antigüedad de la pieza por lo que estas tienen menor riesgo aunque no están exentas (Liotta, 2000). El vuelo del insecto adulto aparece entre julio y septiembre, y su tamaño va de los 17 a los 25 mm, color negro o marrón oscuro.



**Figura nº 3.21**

Agujeros de salida de cerambícidos en viga de madera.

### 3.3.5.3. Curculiónidos.

El más común es el *Hexarthrum exiguum* B. Este insecto (**Figura nº 3.22**) pertenece al orden de los “Coleópteros” y familia de los Curculiónidos. Se le conoce vulgarmente por gorgojo. Hasta hace veinte años confundido con los anóbidos.

**Larva:** Presenta una mancha negra característica en la cabeza y tiene una longitud de 3 mm.

**Alimento principal de la larva:** Albura de coníferas y frondosas. A veces puede atacar el duramen si existen ataques previos de hongos de pudrición.

**Forma, diámetro medio y dirección de la galería:** Ovalada de hasta 2 mm de diámetro. Las galerías siguen la dirección de la fibra, aunque a veces pueden inclinarse 45° respecto de la misma.

**Ciclo larvario:** 1 año, dándose varias generaciones en un ciclo (Liotta, 2000).

**Biología de digestión:** Endosimbiosis entre microorganismos y la propia larva que aloja en las células de su intestino bacterias, hongos o protozoos encargados de degradar la celulosa para extraer los nutrientes necesarios.



**Figura nº 3.22**

Orificios de salida de curculiónidos en viga de madera de gran escuadría.

**Condiciones ambientales:** Precisan altos contenidos de humedad.

**Daños en la pieza de madera:** Afectan a coníferas y frondosas, preferentemente la albura atacando a veces al duramen, como ya se ha comentado. El insecto adulto aparece en primavera y su tamaño va de los 3 a los 5 mm, de color marrón oscuro.

### 3.3.6. Xilófagos de origen entomológico. Termitas.

Este tipo de xilófagos también se les conoce como insectos sociales, o simplemente termitas<sup>17</sup>. Poseen polimorfismo de casta y son del orden de los isópteros<sup>18</sup>. Los reproductores o reyes son de color oscuro, los soldados son blancuzcos, no poseen alas y su misión es proteger a la colonia. Finalmente las obreras tampoco tienen alas pero poseen una cabeza con boca adaptada a la erosión.

Los nidos suelen estar en el suelo cerca de elementos leñosos. El ciclo que siguen es el siguiente. Después del apareamiento la hembra hace la deposición de huevos (unos 10.000 al día) que tras breves semanas darán lugar a los *neánidos*. Estos son jóvenes termitas que empiezan a erosionar la madera en busca de alimento para la colonia completa. Las

<sup>17</sup> La palabra proviene del griego *terma* que quiere decir "el fin". Plinio el Viejo las denominó hormigas blancas en su "Naturalis Historia". Se conocen unas 2800 especies de las que sólo unas 80 son verdaderamente nocivas para la madera, siendo todas ellas beneficiosas para la depuración de sustratos.

<sup>18</sup> El nombre viene de la similitud que presentan entre sí las alas del rey y de la reina, que pierden después del vuelo prenupcial.

termitas al igual que algunos insectos de ciclo larvario se alimentan a través de endosimbiosis, siendo los protozoos simbioses los responsables de la digestión de la celulosa.

Otra característica de las termitas es su huida de la luz debido a la falta de pigmentación de su piel. La insolación directa mata a obreros y soldados. Construyen galerías para su avance amasando con saliva granos de polvo, carcoma o excrementos. Dichas galerías (**Figura nº 3.23**) son impenetrables a la luz.



**Figura nº 3.23**

Galerías formadas en piezas de madera por las termitas. (Fuente: María Ángeles Navarrete .MEC-INIA).

Los ataques son ciertamente ruinosos debido al gran número de individuos de la colonia y a que al ser lucífugas, su ataque es siempre interior. Los puntos de infiltración suelen coincidir con las testas entregadas en las fábricas de cerramiento en donde los puentes térmicos generan condensación y subida drástica de la humedad.

Los asentamientos de las termitas tienen lugar en zonas donde la temperatura no desciende por debajo de los 0 °C. A diferencia de la mayoría de los insectos de ciclo larvario, las termitas si tiene autorregulación de temperatura. La humedad de la madera tiene como límite mínimo para su ataque el 15%.

### 3.4. PROCESOS PATOLÓGICOS DE ORIGEN ABIÓTICO Y SU INCIDENCIA EN FORJADOS DE MADERA.

#### 3.4.1 Agentes atmosféricos o meteorológicos.

Generalmente y dado el carácter de compartimentación de espacios interiores que los forjados tienen en la edificación, excepto en casos muy concretos, quedan resguardados de este tipo de agentes. Bien es cierto que existen forjados o estructuras de viga y viguetas que pueden estar localizados (**Figura nº 3.24**) de manera que sufran la influencia del sol y la lluvia.



**Figura nº 3.24**

Aspecto que presenta la testa de una vigueta de madera localizada en pasarela peatonal a la intemperie en zona marítima. Existe una retracción por secado y exposición a los rayos solares que hace que se habrán los radios y anillos.

Estos agentes pueden actuar aislados o conjuntamente. El sol a través de los rayos ultravioletas-fotodegradación<sup>19</sup>- y los infrarrojos-calentamiento diferencial de interior y superficie que genera la aparición de fendas y microfendas. La variación de temperatura y la humedad entre la superficie exterior y el interior generará la aparición de tensiones diferenciales entre las distintas fibras.

La radiación solar provoca alteraciones químicas en la superficie de la madera. Cuando la madera no se encuentra protegida superficialmente el sol provoca la degradación de la lignina y la pérdida de cohesión entre sus fibras, que se llegan a deshilar la superficie y que se torne de color gris.

Por tanto los principales riesgos tensionales que implican el sol y la lluvia sobre estas estructuras es la aparición de fendas o por foto-degradación o por el incremento de humedad que la lluvia ocasiona.

<sup>19</sup> Afecta principalmente a la zona blanda de la madera que crece en primavera y que va desapareciendo.

### 3.4.2 Productos químicos

Al igual que en el caso de los agentes atmosféricos, los productos químicos como **Ácidos**<sup>20</sup> o **Alcalis**<sup>21</sup> son poco habituales en los forjados, dada su ubicación.

### 3.4.3. Fuego

Debido al gran contenido de celulosa, es decir de carbono, hidrógeno y oxígeno, la madera es combustible.

Pese a ello, la estructura de madera colabora poco en el inicio y avance del fuego. La evolución del incendio tiene lugar en el tiempo y en el espacio siendo acelerado y alimentado fundamentalmente por numerosos materiales existentes en el interior de las viviendas (cortinas, muebles, etc).

La estructura de madera debido a sus dimensiones generales tiene un comportamiento razonablemente aceptable al fuego al poseer coeficiente calorífico relativamente bajo, dilatación y al contenido de agua en su interior que retrasa la combustión. Pero a todo esto se une la formación de una capa de carbón superficial, zona de pirolisis<sup>22</sup> que retrasa y frena el avance de la temperatura hacia el interior.

Además al tener una baja dilatación, esta no actúa sobre las estructuras deformándolas como ocurre con el acero. Investigaciones muy rigurosas en Londres y Berlín entre otros demuestran la fiabilidad de la madera en caso de incendio<sup>23</sup> (Abásolo, 1998).

Aquí nos interesan fundamentalmente las velocidades de pirolisis, medidas en milímetros por minuto que hablan del avance del incendio y de la pérdida de resistencia progresiva de la sección de la viga. Esto guarda una cierta similitud con la capacidad mecánica residual de vigas y viguetas, tras los ataques bióticos y que expondremos en el apartado de conclusiones de este capítulo. El valor medio de pirolisis en la madera es de 0,7 mm/mn.

---

<sup>20</sup> Pueden romper las cadenas de carbono por hidrólisis, afectan a la celulosa y apenas a la lignina.

<sup>21</sup> Produce un daño más grave, afectan a la lignina y a la hemicelulosa perdiendo entonces la madera la resistencia y consistencia.

<sup>22</sup> Esta capa impide por una parte la salida de gases y por la otra la penetración de calor en el interior de la pieza. La combustión de la madera se produce en dos etapas. La primera, desgasificación se produce por la pérdida de vapor de agua y gases que pueden arder si existe suficiente oxígeno. Aquí también se forma carbón vegetal. La segunda, en la que el carbón formado anteriormente arde. La temperatura de ignición de la madera es de 300° C , en superficie presencia de llama y de 400° C en superficie cuando no existe llama.

<sup>23</sup> Son los institutos de investigación avanzada en el fuego como el *Trada* de Londres o el *Bundesanstalt für Materialprüfung* en Berlín los que corroboran los resultados con datos basados en estudios muy minuciosos.

Para una escuadría de 130x150 mm, de socarrena hueca, una combustión de 1 hora implica una pérdida de sección de 42 mm en todo su perímetro, quedando una escuadría resultante de 87x118 mm. A continuación analizamos la influencia de este tipo de reducciones así como la producida por ataques bióticos en la resistencia mecánica de vigas y viguetas de forjados leñosos.

### 3.5 ANÁLISIS MICROSCÓPICO COMPARATIVO DE MUESTRAS DE MADERA ESTRUCTURAL.

A continuación se exponen las diferencias entre cuatro probetas de madera analizadas mediante microcopio óptico de luz directa. El análisis ha sido realizado en el Departamento de Conservación del Museo Arqueológico Nacional.

Las cuatro muestras analizadas corresponden a las siguientes maderas:

- Madera nueva de la especie picea, muestras transversal y longitudinal a la fibra.
- Madera antigua, sin ataque perteneciente a jácena de edificio del casco antiguo de Madrid, muestras transversal y longitudinal a la fibra. Edad aproximada: 125 años.
- Madera vieja, con ataque de hongos de pudrición parda, perteneciente a vigueta de forjado de edificio del casco antiguo de Madrid, muestras trasversal y longitudinal a la fibra. Edad aproximada: 125 años.
- Madera vieja, con ataque de hongos y carcoma, perteneciente a parte baja de zanca de escalera de edificio del casco antiguo de Madrid, muestras transversal y longitudinal a la fibra. Edad aproximada: 125 años.

#### **Madera nueva de pino, muestras transversal y longitudinal a la fibra.**

En el estudio del corte paralelo y perpendicular a la fibra en la madera de pino encontramos los rasgos a partir de los cuales compararemos el resto de las maderas.

Esto lo hacemos así fundamentalmente para observar la pérdida o deterioro de material xilemático en los cortes a medida que examinemos las maderas atacadas ya sea por hongos o por carcoma.

En la **figura nº 3.25** reconocemos las traqueidas (90 % del volumen xilemático total), las punteaduras (canalículos cerrados) localizadas en la paredes de la traqueida longitudinal. El aspecto de las traqueidas es alargado con las extremidades truncadas oblicuamente.

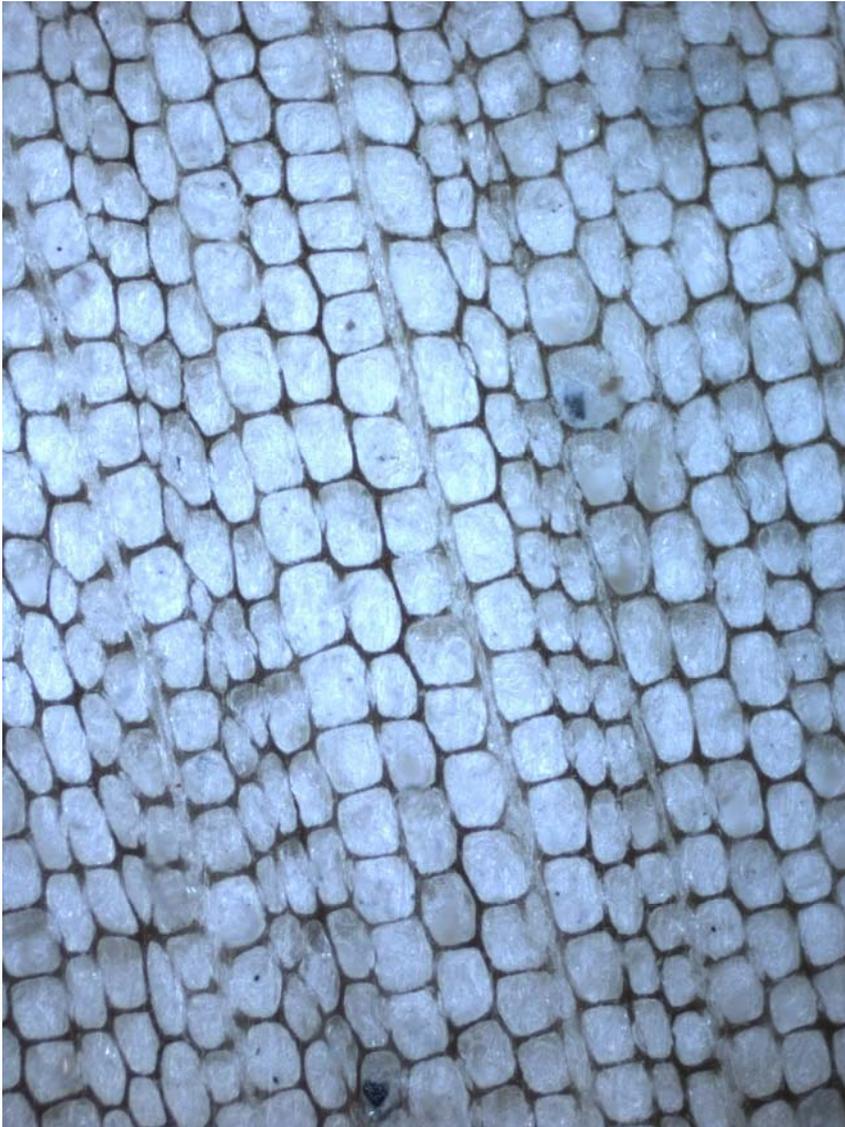
**Figura nº 3.25**

Microfotografía 200x de madera nueva de pino. Corte paralelo a la fibra.

Las punteaduras pueden ser circulares, ocluidas o distendidas. En la figura se reconocen las circulares, seriadas a lo largo de la traqueida. También podrían coincidir con traqueidas normales con inclusiones de resina en su interior.

El eje de dirección de las traqueidas posee un aspecto normal y constante.

En el corte perpendicular a la fibra, en la **figura nº 3.26** se observa el corte de las traqueidas con aspecto relativamente homogéneo, las traqueidas, con paredes celulares finas y lumen amplio (que agruparía esa parte de la madera como de *primavera*). Por otro lado y en la identificación general contamos con una sección poligonal de la traqueida.



**Figura nº 3.26**

Microfotografía 200x de madera nueva de pino.

Corte perpendicular a la fibra.

No se observa presencia de parénquima ni dispersa ni metatraqueal ni tampoco canales resiníferos.

#### **Madera vieja sin atacar, muestras trasversal y longitudinal a la fibra.**

En el corte longitudinal de la madera vieja sin atacar (**figura nº 3.27**) se observa un aspecto de más contraste debido principalmente al aspecto más oscuro de esta madera.

Por lo que refiere a los elementos anatómicos son del mismo tipo que en la madera nueva, con los grados de homogeneidad de las traqueidas longitudinales, canales resiníferos.

El contenido de humedad de la muestra de madera nueva es más elevado que en el caso de la madera vieja sin atacar.



**Figura nº 3.27**

Microfotografía 200x de madera antigua. Corte paralelo a la fibra.

No se observa deterioro del material xilemático, espesores de paredes (**figura nº 3.28**) de traqueidas normales y alguna inclusión aislada de resina.



**Figura nº 3.28**

Microfotografía 200x de madera antigua. Corte perpendicular a la fibra.

Por lo que respecta al corte perpendicular a la fibra obtenemos una figura de sección de traqueidas poligonal, con ausencia de canales resiníferos y de parénquima. Es decir que la identificación es muy similar a la de la madera nueva.

**Madera vieja atacada por carcoma, muestras trasversal y longitudinal a la fibra.**

En el corte longitudinal de la madera vieja atacada por carcoma (**figura nº 3.29**) se observa un aspecto muy similar al de la madera sin atacar.

**Figura nº 3.29**

Microfotografía 200x de madera antigua atacada por carcoma.

Corte paralelo a la fibra.

Hemos de recordar que el ataque por insectos de ciclo larvario, como es el caso que aquí observamos, es de tipo muy localizado, atacando la albura y dejando el duramen.

Las galerías formadas por la larva (**figura nº 3.30**) son de poca densidad, es decir entorno a la galería existe material xilemático en buen estado. Todo ello dependiendo del tipo e intensidad de ataque.



**Figura nº 3.30**

Microfotografía 100x de madera antigua atacada por carcoma.

Corte perpendicular a la fibra.

Esto da un margen de seguridad a la resistencia mecánica de la pieza al ser reducida en los cálculos en un espesor continuo. En esa zona eliminada existe material en buen estado y que de hecho colabora en el funcionamiento de la pieza.

Esto es perfectamente comprobable en el corte transversal, en el que el aspecto de la sección de las traqueidas parece el de la madera vieja sin atacar o incluso el de la madera nueva.

---

### Madera vieja atacada por hongos de pudrición parda, muestras trasversal y longitudinal a la fibra.

Sin embargo en el corte longitudinal de la madera vieja atacada por hongos de pudrición parda (**figura nº 3.31**) sí que se observa un deterioro del material xilemático, con interrupciones de las traqueidas longitudinales por eliminación de la celulosa.



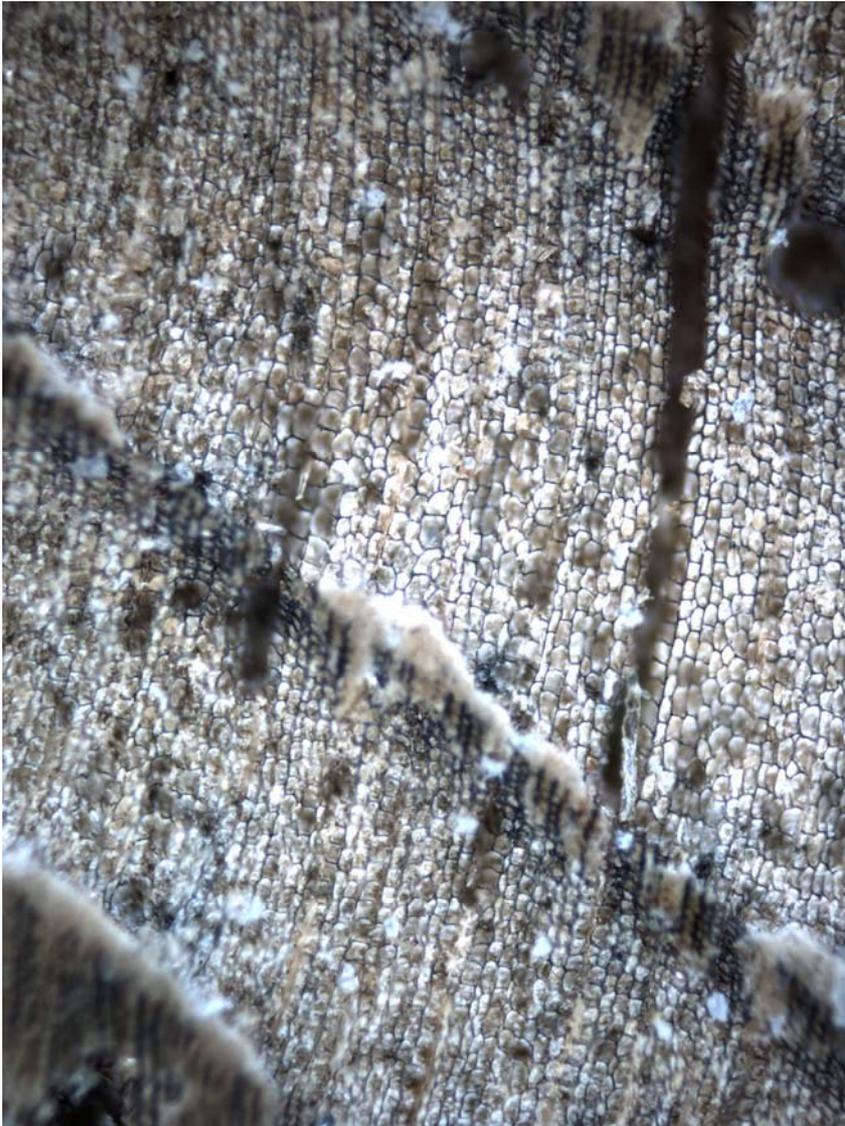
**Figura nº 3.31**

Microfotografía 100x de madera antigua atacada por hongos de pudrición parda.  
Corte paralelo a la fibra.

La desintegración de la madera es palpable y con ella las graves consecuencias para su resistencia mecánica.

Afortunadamente este tipo de ataques debidos a organismos vegetales es muy localizado y en las condiciones de humedad referidas más arriba, por lo que las piezas pueden ser tratadas puntualmente.

Es muy sintomático el aspecto de la sección de las traqueidas longitudinales (**figura nº 3.32**), en las que las paredes se han reducido considerablemente con respecto a las de las otras muestras analizadas, y el lumen conserva más o menos la misma proporción. Esta debilidad de la pared celular ocasiona que el canal se deforme al no tener resistencia física en ninguna dirección.



**Figura nº 3.32**

Microfotografía 100x de madera antigua atacada por hongos de pudrición parda.

Corte perpendicular a la fibra.

### 3.6 ANTECEDENTES EN EL REFUERZO DE FORJADOS DE MADERA.

Como ya se ha expuesto más arriba, la rehabilitación e intervención en forjados de madera es un tema de gran relevancia. Ya sea por problemas de degradación de la estructura leñosa, ya por cambios de uso habituales cuando se interviene en edificios de Patrimonio Histórico-Artístico.

Esta dualidad de casos hace que los enfoques actuales a la hora de intervenir difieran sustancialmente.

En el caso de los edificios antiguos de carácter urbano localizados en los cascos históricos de las ciudades, las intervenciones derivan de varias posibilidades. Entre ellas están las rutinarias inspecciones de mantenimiento obligadas por los ayuntamientos (ITE), desplomes ocasionales de paños de forjado localizados en zonas húmedas, la coincidencia de obras de acondicionamiento del edificio o las actuaciones consecuencia de exagerada sintomatología que presentan estos edificios. Las rehabilitaciones en estos edificios suelen consistir en la sustitución de los forjados o en refuerzos provisionales.

En las soluciones de sustitución, basada en la mayoría de los casos en los prejuicios históricos relativos a la madera, la solución implica demolición completa de forjado con apeo si procede de muros de carga o de jácenas intermedias. Además de los problemas de estabilidad implica el entregar la nueva estructura, generalmente metálica o mixta metálica-hormigón en los muros o jácenas preexistentes. El estudio de la capacidad portante de la estructura debe ser muy riguroso, al incrementarse los pesos propios<sup>24</sup> de la estructura que se transforma en carga permanente en lo que refiere a los cálculos de flecha.

Además la sustitución obliga al desalojo de dos viviendas con sus consiguientes costes en tiempo, mano de obra, etc. El desperdicio de la estructura de madera demolida, en muchos casos válida mecánicamente para el refuerzo, es otro de las consecuencias derivadas de esta solución. Finalmente las sustituciones suelen ser soluciones parciales, se cambian paños de forjado por lo que la estructura horizontal se convierte en un sistema heterogéneo problemático de cara a la rigidez general de ésta.

---

<sup>24</sup> Si un forjado de madera convencional tiene un peso que oscila entre los 3,7 y 3,8 kN/m<sup>2</sup>, un forjado metálico tendrá un peso de 4,5 kN/m<sup>2</sup>, casi un 20% más.

Por lo que respecta al refuerzo de estructuras de madera, las últimas investigaciones en este campo están centradas en varios enfoques.

Por una parte está el refuerzo mediante fibra de carbono por la parte inferior de las piezas, en su cara de tracción o practicando acanaladuras en las grandes escuadrías y utilizando adhesivos de morteros de resina epoxi.

Los valores del módulo de elasticidad medio están entre los 165.000 N/mm<sup>2</sup> y los 400.000 N/mm<sup>2</sup>. El inconveniente más plausible sería la poca tolerancia de la resina epoxi, que sirve de adherente de la fibra de carbono a la madera, contra el calor en caso de incendio, cuando el refuerzo es colocado por la cara inferior de las piezas.

Existen investigaciones recientes en el campo de refuerzo de estructuras de madera que en piezas sometidas a compresión y pandeo, han comprobado más fragilidad en los refuerzos con láminas de fibra de carbono que en los realizados con chapas de acero (Tanaka, H. et al., 2006). Sin embargo, en los refuerzos de grandes escuadrías, las acanaladuras y relleno de las mismas mediante fibra de carbono y adhesivos de resina han dado resultados óptimos (Smedley, D. et al., 2006) en la prolongación de vigas de madera mediante prótesis de madera-madera. Por lo que respecta al refuerzo por la cara superior, se han realizado ensayos de campo pretensando fibras para generar una contra-flecha previa a la carga y aumentar la capacidad de carga de las viguetas de madera (Martin, L., et al., 2006). Finalmente se han realizado ensayos sobre piezas de madera laminada utilizando como elementos de refuerzo CFRP y GFRP con resultados bastante óptimos, por lo que a carga de tensión de rotura (Alam, P. et al., 2006).

Otro estudio realizado en Estados Unidos y muy relacionado con piezas ensayadas a flexión son los realizados sobre piezas dañadas con fendas y roturas de directriz longitudinal a la pieza. Estas piezas se refuerzan atando, mediante el empleo de varios métodos (Akbiyik, A. et al., 2007), a las piezas partidas y dañadas, ya sea con pletinas lateralmente, con tornillos pasantes en todo el canto o con refuerzos de fibras poliméricas (FRP).

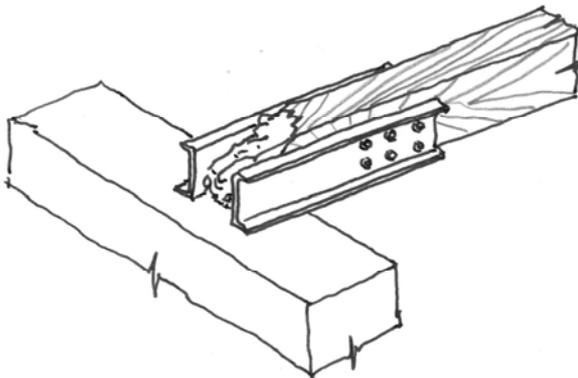
Cómo antes hemos indicado, existe otro ámbito de la Intervención centrada en el Patrimonio Histórico-Artístico. Consiste fundamentalmente en Proyectos de Rehabilitación, en la mayoría de los casos, tendentes a la implantación de usos actuales, generalmente de carácter sociocultural o lúdico, en edificios rehabilitados *ad-hoc*. Esta regeneración de la

Arquitectura y sistemas constructivos tradicionales está enfocada hacia intervenciones más cuidadas, de gran respeto por los elementos existentes y en las se plantea una recuperación de la madera existente en la estructura. Esto se realiza a través del aumento de cargas, al ejecutarse losas de hormigón armado de entre 5 y 15 centímetros. El problema se concentra entonces en el estudio de los conectores adecuados para la transmisión de esfuerzo desde el hormigón a la madera. En el caso de las losas estructurales los conectores se utilizan para colgar la madera de la estructura de hormigón, de tal forma que su capacidad portante queda anulada y es simplemente decorativa.

Más interés suscita hoy por hoy el estudio de transmisión de cargas laterales y tensiones rasantes que se generan cuando la capa de hormigón es más delgada y actúa en el bloque de compresiones, y la madera actúa en el de tracciones (Fernández-Cabo, J.L. et al. 2006). Esta técnica tiene el inconveniente del peso de la capa de hormigón, unos 20 kg/m<sup>2</sup> por centímetro de espesor, y que la madera debe gozar consistencia e integridad estructural.

Los trabajos, no obstante, que se suelen ejecutar habitualmente en obras de carácter urbano no gozan de esta especialización de materiales de refuerzo. Generalmente, en lo que al fallo de apoyo de piezas por ataques en la punta las soluciones suelen ser bastante convencionales. Por una parte están las de prolongación de la pieza mediante el adosado lateral de perfiles metálicos atornillados a la madera (**Figura 3.33**).

**Figura nº 3.33**



Refuerzos laterales sobre viga de madera realizada con perfiles normalizados de acero laminado atornillados al canto de la pieza. Es observable que este sistema implica demolición parcial de forjado e intervenir por la parte superior e inferior. (Adaptado de Arriaga et al., 2002).

Este tipo de soluciones adolecen de las limitaciones de acceso que en este trabajo hemos preferido acotar por la parte superior. La intervención lateral implica el demolido de la socarrena del forjado y la intervención en las dos plantas.

Otra solución calcada de la anterior consiste en la prolongación de la vigueta mediante prótesis lateral de madera fijada a la pieza principal mediante pasadores (Figura 3.34). La limitación de esta solución además de las ya mencionadas para el caso anterior sería el grosor que la cabeza adquiere y la posibilidad de ataque por el mismo daño a la madera nueva colocada.

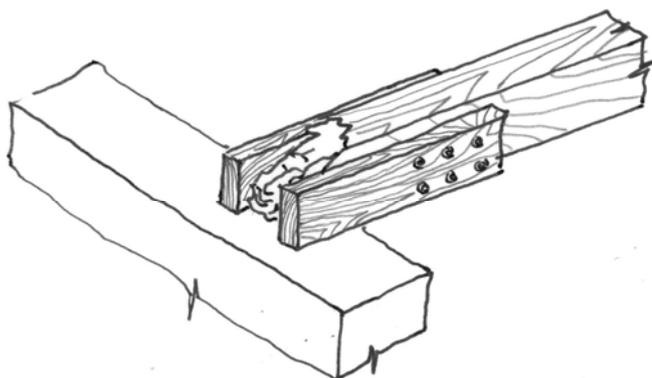


Figura nº 3.34

Refuerzos laterales sobre vigueta de madera realizada con aporte de madera. Al igual que en la figura 3.36 este sistema implica demolición parcial de forjado e intervenir por la parte superior e inferior. (Adaptado de Arriaga et al., 2002).

Soluciones de mano de obra más especializada y de materiales más caros serían por ejemplo la introducción de pletinas en el canto de las piezas de madera (Figura 3.35) prolongando a la vez su longitud, y utilizando morteros epoxídicos para garantizar la adherencia entre metal y madera.

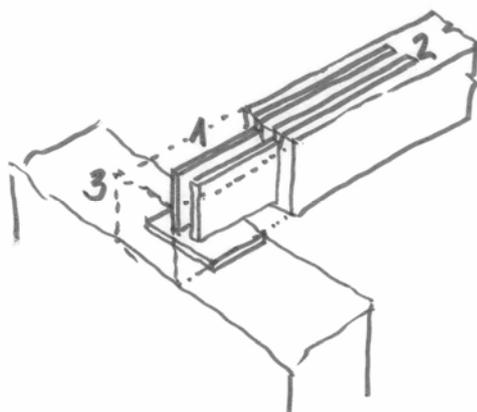
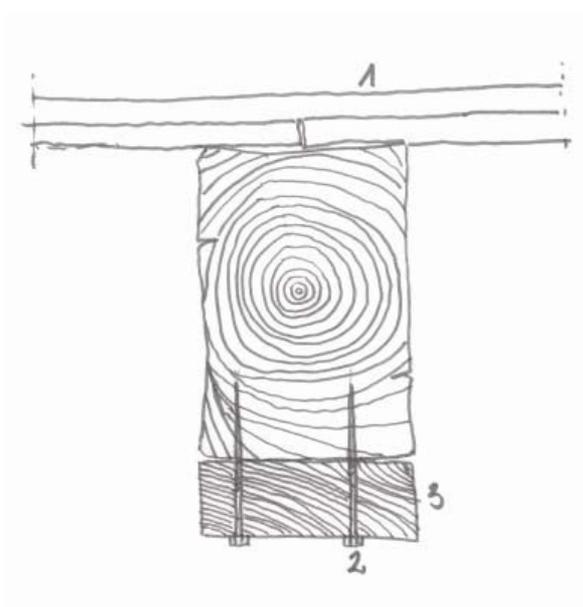


Figura nº 3.35

Refuerzo de cabeza de vigueta mediante alojamiento de pletinas en el interior de la escuadría. (Adaptado de Arriaga et al., 2002).

Sin embargo, en el campo del refuerzo de la estructura de madera sometida a flexión, las intervenciones convencionales se basa en aumentar la capacidad mecánica a flexión mejorando con ello la resistencia de las piezas y aumentando la rigidez de las mismas. En

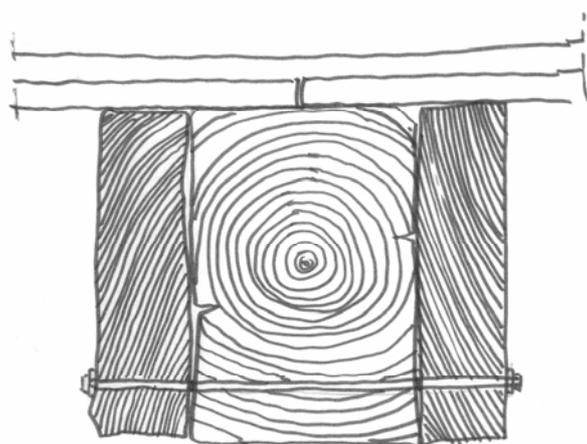
este ámbito se encuentran, por ejemplo, soluciones como la de madera-madera, en la que el material de refuerzo es el mismo material reforzado y en donde la solidaridad entre ambos está confiada a conectores metálicos con distinto grado de rigidez. Dentro de este tipo de adhesiones pueden producirse por la cara inferior (**Figura 3.36**), o lateralmente (**Figura 3.37**).



**Figura nº 3.36**

Refuerzo de vigueta de forjado mediante aporte de madera por la cara inferior. La unión suele ser clavada o atornillada. (Adaptado de Arriaga et al., 2002).

En el caso lateral es común solidarizar el conjunto mediante pasadores en las piezas.



**Figura nº 3.37**

Refuerzo de vigueta de forjado mediante aporte de madera realizada por los laterales. La unión suele ser mediante un perno pasante y enroscado en ambas partes. (Adaptado de Arriaga et al., 2002).

Hemos de señalar que el suplemento por la parte superior mediante vigas de acero laminado sobre los nervios de madera se emplea poco por el cambio de nivel que supone en el nuevo solado y por la disminución de la altura libre.



#### 4.1. MATERIALES Y MEDIOS EMPLEADOS. INTRODUCCIÓN.

Para llevar acabo los trabajos reflejados en esta tesis se ha empleado acero SJ275JO en los refuerzos y tirafondos como medio de unión. En la madera se han empleado tres clases. 15 piezas de madera laminada encolada de *picea abies* de escuadría 180x200 mm, 15 piezas de madera aserrada de pino silvestre con escuadría igual a la anterior y 15 piezas de madera procedente de derribo de edificios antiguos de escuadría media 130x150 mm.

En lo referente a los medios de ensayo, se han aplicado en tres estadios consecutivos. En primer lugar se han simulado las estructuras de madera reforzada con acero en el programa COSMOSWorks de análisis por elementos finitos. Posteriormente se han realizado ensambles en piezas a escala real según las dimensiones del los ensayos normalizados de la UNE EN 408 en el laboratorio de estructuras de madera del CIFOR-INIA. Finalmente se han realizado ensayos de campo mediante la implantación de uno de los refuerzos en un forjado de un edificio del casco antiguo de Madrid. A continuación se desarrollan en detalle los distintos materiales y métodos.

#### 4.2. MADERA. CARACTERÍSTICAS Y PROCEDENCIA DE LAS PIEZAS

La madera laminada encolada (**Figura 4.1**) fue adquirida en la empresa RADISA. El origen del material es sueco de clasificación GL 24h. Las vigas son de 12 metros, cortadas según las dimensiones de los ensayos mediante moto-sierra.



**Figura nº 4.1**

Piezas de madera laminada encolada de escuadría 180x200 y 4000 mm de longitud utilizadas para los ensayos de testigo y refuerzo que llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras de Madera del CIFOR-INIA.

La madera de sierra (**Figura 4.2**) se obtuvo en el aserradero municipal del Espinar en Segovia. Dicho aserradero dispone de una producción en un 98 %, de pino silvestre, unos 15.000 m<sup>3</sup>/año. El grado de mecanización del aserradero es medio y la madera suministrada es de alto coeficiente de variación, de hasta un 40% (Díez y Fernández-Golfín, 1998). Se adquirieron 15 unidades de 180x200 y 4000 mm y se realizó en laboratorio un sistema de 3 lotes lo más homogéneos posibles desde el punto de vista mecánico.



**Figura nº 4.2**

Aspecto de las piezas de madera de sierra ensayadas.

La madera antigua (**Figura 4.3**) de escuadría media de 130x150 mm con antigüedad por encima de los 120 años, se adquirió en un solar de la empresa DETECSA dedicada al acopio de materiales de la demolición de edificios antiguos. La madera procede de demolición y recuperación de materiales de edificios del Casco Histórico de Madrid.



**Figura nº 4.3**

Piezas de madera antigua de escuadría media 130x150 y 3000 mm de longitud utilizadas para los ensayos de testigo y refuerzo que llevaron a cabo en el Laboratorio de Estructuras de Madera del CIFOR-INIA.

En la **tabla 4.1** se muestran las dimensiones y los distintos tipos de madera empleados en los ensayos. Los sublotos creados se escogieron por razones de homogeneidad por lo que al cálculo del módulo de elasticidad (**tabla 4.2**) se refiere y que se llevó a cabo en todas las piezas. Los números corresponden por tanto a la numeración dada a las piezas con carácter previo.

TIPO MADERA	UD.	DIMENSION (mm)			SUBLOTES(Número de pieza)														
		ANCHO	CANTO	LARGO	TESTIGO					REFUERZO					PROTESIS				
LAMINADA	15	180	200	4000	2	5	10	14	15	6	9	11	12	13	1	2	4	7	8
ASERRADA	15	180	200	4000	3	4	9	14	15	2	6	11	12	13	1	5	7	8	10
ANTIGUA	15	130	150	3000	6	7	10	11	13	2	3	4	8	9	1	5	12	14	15

**Tabla 4.1. Muestras de madera ensayadas**

Como ya se ha indicado antes, las longitudes de las piezas vienen determinadas por las exigencias de la norma UNE EN 408<sup>25</sup> que determina la longitud para ensayo en función del canto de la pieza (h) y correspondiente a 20 veces el canto.

	MADERA LAMINADA	MADERA MACIZA	MADERA ANTIGUA
Media (N/mm <sup>2</sup> )	11038	7948	6585
Desviación Típica	632	1088	1849
Coefficiente de variación (%)	5,7	13,7	28,1
UNE EN 338	<b>C24</b>	<b>C14</b>	<b>C14</b>

**Tabla 4.2. Módulo de Elasticidad de las muestras de madera**

<sup>25</sup> UNE EN 408, 1999. *Madera estructural. Madera estructural y laminada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.* En esta norma se establecen los criterios generales de muestreo y ensayo.

Se puede comprobar en las muestras de madera el distinto grado de variabilidad (medido por el Coeficiente de Variación) de los diversos tipos de madera utilizados.

Además la madera laminada es, con diferencia, la más homogénea y por tanto la más “fiable” en su uso como material estructural, como de hecho está sucediendo en la actualidad en la obra nueva. Por esta razón suponemos que las comprobaciones mediante MEF (Método de Elementos Finitos) se aproximarán más al resultado cuanto más bajo sea el coeficiente de variación.

En la **tabla 4.2** también se aporta una clase resistente a la media de la madera analizada por tipos según la UNE EN 338 y basándonos exclusivamente en el Módulo de Elasticidad medio que presentan las muestras.

Como se mencionó más arriba, para cada tipo de madera, se eligieron tres submuestras con un módulo de elasticidad similar para utilizarlas respectivamente como testigo (madera sin refuerzos metálicos), refuerzo y prótesis en los pertinentes ensayos a rotura según la UNE EN 408.

### 4.3. ACERO

Existen muchos tipos de metales empleados en la construcción. En la tesis se escogió uno que, cumpliendo los de estabilidad y rigidez necesarios, posea además un coste razonable dentro de la operación. En base a esto último se decide utilizar acero laminado S275J0 (antiguo A42b).

El refuerzo aplicado sobre la madera y literalmente ensamblado en las piezas, es de acero laminado usado habitualmente en las estructuras de edificación<sup>26</sup>. Es un material homogéneo e isótropo con un módulo de elasticidad constante para todos los tipos de acero.

El tipo empleado en esta Tesis es el S275J0, con un límite elástico de 275 N/mm<sup>2</sup>, el módulo de elasticidad<sup>27</sup> de 210.000 N/mm<sup>2</sup>, el módulo de Poisson de 0,3, el coeficiente de dilatación térmica de  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$  y la densidad de 7.850 Kg/m<sup>3</sup>.

---

<sup>26</sup> Los tipos de acero están recogidos en la UNE EN 10025. *Productos laminados en caliente de acero no aleado, para construcciones metálicas de uso general*. También se han utilizado aceros de tubo estructural mencionados en la UNE EN 10210-1:1994 relativa a perfiles huecos para construcción acabados en caliente, de acero no aleado de grano fino y en la UNE EN 10219-1:1998, relativa a secciones de acero estructural conformados en frío.

<sup>27</sup> Todas las propiedades del acero se recogen en Real Decreto 314/2006. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. Acero.

El acero ha sido cortado, a partir de chapas (**Figura 4.4**), mediante máquina de plasma, debido a la problemática del oxicorte en espesores tan delgados como los empleados en las piezas de ensayo. El sobrecalentamiento es muy localizado de la zona de corte y asumible por el material. Si bien se produce un templado parcial de las zonas próximas a la incidencia del haz que en el caso de retaladro de la chapa puede ocasionar ciertas dificultades<sup>28</sup>.



**Figura nº 4.4**

Plancha de acero de 4 mm sobre mesa de corte por plasma. En esta figura se están cortando las pletinas de las chapas de refuerzo que luego se soldarán.

Pese a las apariencias, esta técnica de corte de piezas resulta económica y tremendamente versátil de cara al soldado de subpiezas posteriores, lo que convierte el refuerzo, como ya se verá más adelante, en una solución razonablemente buena de cara a la implantación en obra.

En el caso concreto de las aristas, a diferencia de lo que ocurre con el oxicorte, no tienen rebabas de metal quedando limpias e incluso con cierto bisel lo que facilita su manipulación en obra. Concretamente la palabra plasma refiere a la atmósfera en la que tiene lugar el corte, gaseosa ionizada y caliente (Lobjois, 2004). Esta atmósfera la componen iones positivos y electrones (carga negativa) en un medio neutro.

El proceso se basa en la concentración de la energía (**Figura nº 4.5**) mediante el estrechamiento del arco eléctrico por medio de una tobera de estrangulamiento que debe ser refrigerada en todo momento.

<sup>28</sup> Fundamentalmente los problemas están en la dificultad de agrandar el taladro en obra para que el tirafondos entre con la holgura necesaria. Plantear tolerancias por encima de los 2 mm en el radio plantearía dificultad a la hora de la entrada en carga lateral, forzando casi todo el trabajo del tirafondos en el par de apriete generado sobre la cabeza hexagonal. El par excesivo hace que se fracturen y rompan los tirafondos.



**Figura nº 4.5**

Cabeza de corte por plasma en donde se puede comprobar como se concentra la energía para producir el corte de la chapa.

Esta intensificación y concentración energética es la responsable de que no se genere un sobrecalentamiento del metal en general y por ello pueda ser rápidamente manipulado.

El arco de plasma se obtiene por calentamiento de un gas hasta la temperatura (30.00 °K) de disociación del gas en átomos primero y posteriormente en iones y electrones.

### 4.3. MEDIOS DE UNIÓN

El sistema de anclaje entre madera y acero es uno de los puntos más delicados del ensamble que se estudia en esta Tesis. Se pretende emplear un sistema de fijación rápida, económica y de eficacia comprobada de unión entre los distintos componentes.

El anclaje (**Figura 4.6**) se resuelve mediante tirafondos de uso muy habitual en la madera y que genera una unión entre el acero y la madera de rigidez muy adecuada al estudio, gracias al mordido que los filetes del vástago producen en el interior de la madera.



Figura nº 4.6

Tirafondo DIN 571 de acero para fijación de las piezas metálicas a la madera. Se han empleado diámetros de 8 mm para las piezas de gran escuadría en sierra y madera laminada con longitudes de 90 mm en el refuerzo y 110 mm en la prótesis. El diámetro de los tirafondos en las piezas de madera antigua fue de 7 mm y longitudes de 70 mm para el refuerzo y 90 mm en el caso de la prótesis.

Tal y como se produce la comunicación de esfuerzos entre acero y madera, los esfuerzos rasantes se transforman en una carga lateral al llegar a los anclajes. Esto convierte a la capacidad de carga lateral de las uniones en la responsable de la integridad de la pieza compuesta.

El **EC5** considera a los tirafondos como uniones de tipo clavija y establece una serie de condiciones<sup>29</sup> de cara a su montaje. Dichas condiciones son fundamentales para garantizar el buen funcionamiento de los tornillos sin que se agoten antes de su función o se deteriore la madera en la cual se introducen. De hecho el Eurocódigo menciona:

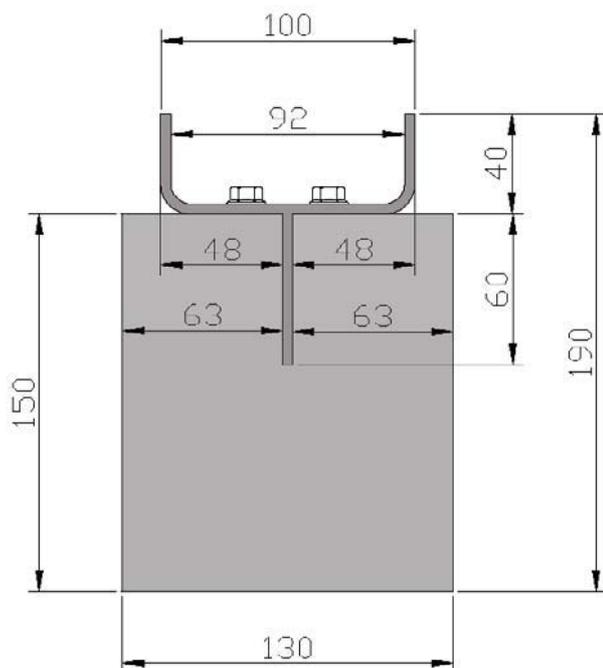
***“Las uniones encoladas y mecánicas tienen muy diferentes propiedades de rigidez y no debería suponerse que trabajan al unísono”***

Esta es una de las causas por las que se recurre a software avanzado de cálculo, que tiene en cuenta la deformación de sus distintos materiales y la interacciones intermedias (contactos) que se generan. La comunicación mecánica entre los distintos componentes de las piezas es la base de los estudios llevados a cabo en esta Tesis.

<sup>29</sup> UNE EN 1995-1-1. *Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación. Art. 6.7. Uniones con tornillos rosca madera (tirafondos).*

#### 4.4. REFUERZOS Y PRÓTESIS ENSAYADOS

Los refuerzos ensayados han consistido en una chapa de acero de 4 ó 5 mm según que refuerzo, plegada en sus bordes extremos en forma de U y dispuesta encima de la cara de la pieza de madera de forma que la U mira hacia arriba (**Figura 4.7**).



**Figura nº 4.7**

La imagen muestra el ensamble de uno de los tipos de refuerzo ensayados y que finalmente fue seleccionado para su implantación en los trabajos de campo. Las dimensiones de la madera corresponden a las muestras de material de derribo de 130 mm de ancho, aunque esta medida es una media de todas las piezas. Los medios de unión se realizan con tirafondos de cabeza hexagonal colocados al trespaso a ambos lados de la pletina que se introduce dentro de la madera.

Por la parte inferior de la U, soldado mediante arco de hilo continuo se dispone una pletina que siempre es de 4 mm de espesor, y que baja verticalmente y se introduce en una acanaladura *ad hoc*, practicada en la madera. Este tipo de refuerzo con 100 mm de ancho y una sola pletina introducida en la madera pertenece al conjunto de los ensayados en laboratorio en las piezas de madera antigua. Dado que el tipo en cuestión es el más asimilable para las viguetas de forjado, también fue el aplicado en los ensayos de campo aunque con una leve modificación en la altura de la pletina superior que queda fuera de la madera.

Otro tipo de piezas de madera, como las de laminada encolada y las aserradas, con 180x200 mm, fueron ensayadas aunque con variaciones en el tipo de refuerzo (**Figura 4.8**).

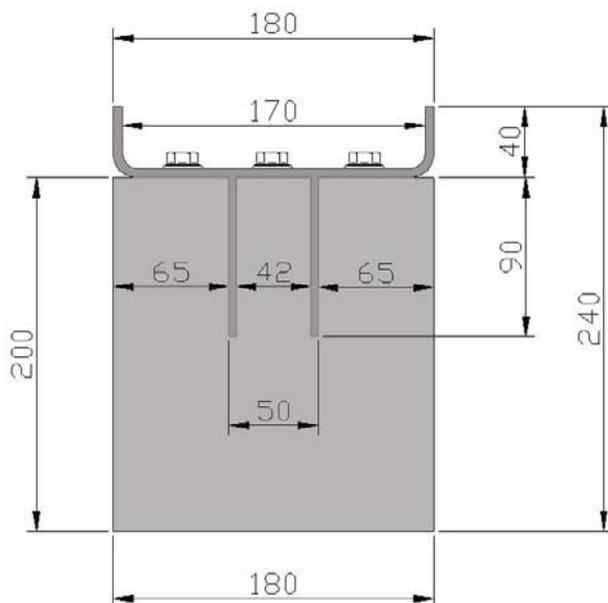
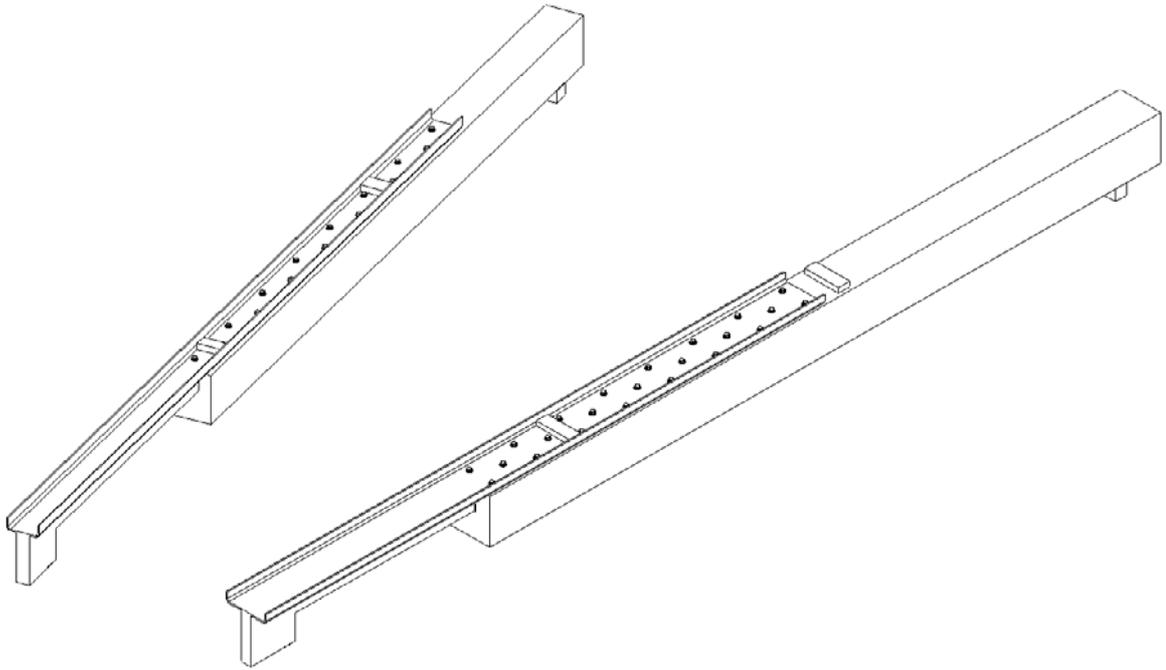


Figura nº 4.8

La imagen muestra el ensamble del refuerzo empleado en las piezas de madera laminada y aserrada en las cuales son dos las pletinas introducidas en la madera. Los tirafondos se colocan, esta vez, en los huecos dejados por las pletinas.

Como puede comprobarse la filosofía del refuerzo es la misma, pero al ensamblarse sobre escuadrías media, la pletina plegada se incrementa 1 mm de espesor respecto del refuerzo anterior con un total de 5 mm. La mayor rigidez obtenida con las dos pletinas se debe a las proporciones entre la rigidez de la madera con respecto a la del acero.

Por lo que respecta las prótesis ensayadas (**Figura 4.9**), el diseño en el interior de la madera, es decir, en la zona en la que se encuentra empotrada acero con madera, la geometría es la misma que las del refuerzo correspondiente dependiendo de la escuadría de las piezas. A piezas de pequeña escuadría le corresponden prótesis con la zona empotrada en la madera igual a la del refuerzo y lo mismo ocurre en el caso de las prótesis empleadas en las escuadrías medias.



**Figura nº 4.9**

Prótesis ensayadas. La de menor ancho (izquierda) corresponde a las piezas de madera antigua mientras que la prótesis más ancha corresponde a los ensayos realizados sobre la madera laminada sobre la madera aserrada.

#### 4.5. PROGRAMAS INFORMÁTICOS, EQUIPOS Y MEDIOS EMPLEADOS

En el intento por utilizar las últimas tecnologías aplicadas a la investigación vamos a emplear un sistema de trabajo basado en la optimización de los posibles diseños constructivos simulando su comportamiento en un programa de Elementos Finitos. Esta depuración de posibles soluciones economiza por una parte la fase de ensayos y por otro afina el comportamiento de los elementos integrantes al tener valores de cálculo muy precisos.

El proceso es muy restrictivo de forma que la mayoría de los defectos de construcción y funcionamiento de las piezas se depuran en el tránsito entre el **diseño** constructivo y la simulación **MEF**.

Pese a ello el sistema, como podremos comprobar, se puede retroalimentar (**Figura 4.10**) de manera que el paso decisivo de la fase de ensayo puede devolver los resultados a la fase de diseño para volver a inicial el ciclo.

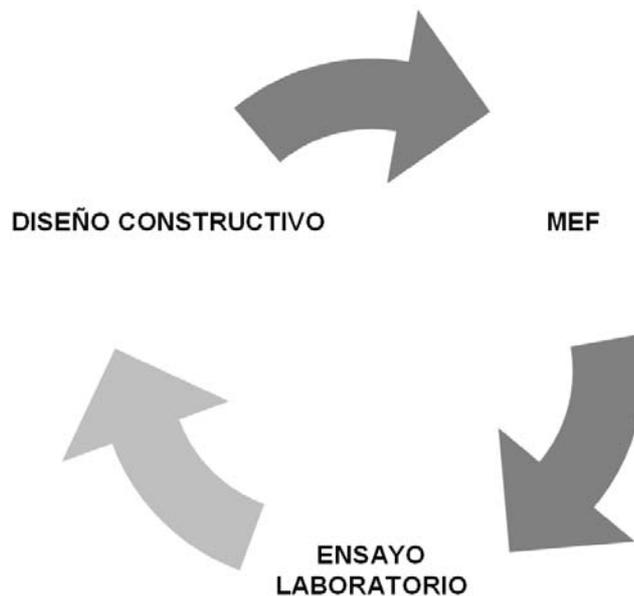


Figura nº 4.10

Esquema del proceso seguido para la validación de los resultados.

Para la fase de ensayo disponemos de los medios de evaluación de la calidad elasto-mecánica de madera por medio de la deformación a la sollicitación de cargas en tramo elástico del comportamiento del material y cargas al límite de rotura.

Finalmente se aplicarán las técnicas estadísticas necesarias, para obtener promedios de comportamiento y sus desviaciones.

#### **4.5.1. Programa de simulación estructural. Modelo matemático de MEF.**

Para comprobar la fiabilidad de los diseños en los distintos rangos de trabajo, bajo acciones estáticas, se ha utilizado el programa *CosmosWorks Advanced Profesional* que trabaja bajo la plataforma **SolidWorks®**. Este programa basa su eficacia en la modelización tridimensional de los componentes y sus propiedades físicas, que luego se ensamblan entre sí y se calculan de forma conjunta.

El funcionamiento del programa de cálculo por elementos finitos está determinado por la introducción de datos al igual que la mayoría del software del mercado. Es decir, es preciso definir condiciones de carga, restricciones o apoyos, contactos entre materiales (con sus respectivos rozamientos si procede), datos físicos y mecánicos de los distintos materiales, condiciones de ortotropía si las hubiere (como en el caso de la madera, que ya explicaremos más adelante), etc.

La base del programa es el cálculo que realiza para aproximar la respuesta de la estructura ante unas acciones y las correspondientes reacciones internas de los materiales.

Un motor de cálculo (*solver*) lineal (**Figura nº 4.11**) resuelve sistemas de ecuaciones que se obtienen al discretizar (**Figura nº 4.12**) (*meshing*) la estructura en elementos finitos.

Como quiera que sea, se trata de una herramienta susceptible de interpretación (Haiman, 2004) y validación. Dado que los procesos computacionales son la parte mecánica de los grandes cálculos de estructura, no se puede olvidar que la introducción de datos (INPUT) es humana y se precisa en todo momento saber que cálculos se realizan, su momento dentro del proceso y el tipo de resultados salientes (OUTPUT) del programa para garantizar la fiabilidad de los mismos. La sencillez del método de cálculo no puede distraer de la complejidad del conjunto de datos a resolver.

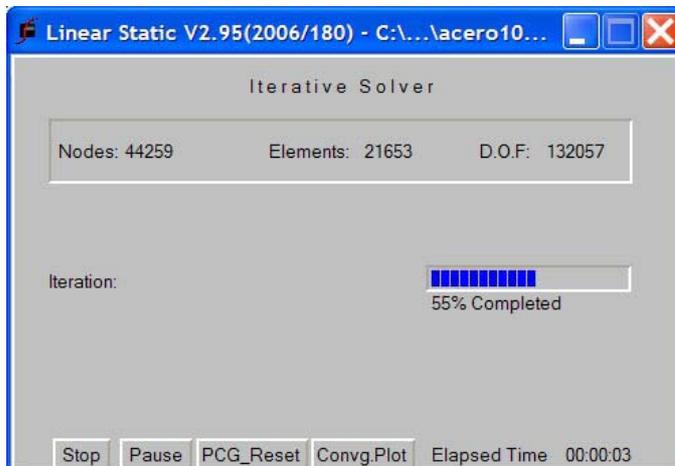


Figura nº 4.11

El motor de cálculo es el corazón del programa por lo que a la resolución matemática se refiere. Los nodos (*Nodes*) corresponden a los vértices de los tetraedros con los que se discretiza la estructura. Los Elementos son los propios tetraedros y D.O.F. es el número de grados de libertad (*Degree Of Freedom*) que la estructura tiene y depende de las coacciones impuestas y si se le han aplicado condiciones térmicas o no. La velocidad con que se produce la iteración dependerá del número de elementos existentes en la estructura.

Dado que en esta fase de la ejecución del software, el consumo de tiempo y recursos del sistema es considerable, los parámetros de discretización o mallado<sup>30</sup> son fundamentales como se verá más adelante en los casos analizados.

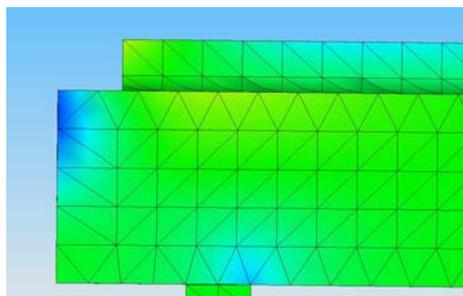


Figura nº 4.12

Discretización de la estructura aplicando en el mallado sólido mediante tetraedros. Una de las ventajas de los mallados en este tipo de estructuras, con cambios importantes de geometrías o aparición de agujeros, es la transición automática de la malla. Al llegar a uno de los puntos de singularidad, la malla se afina sola (se reduce el número de elementos) para conseguir mayor precisión en los resultados.

Todo ese consumo de tiempo y recursos ha hecho que, desde finales del XIX, a través de los métodos iterativos clásicos, y en la segunda mitad del XX, el desarrollo por parte de matemáticos de métodos numéricos de resolución de ecuaciones lineales se haya acelerado considerablemente.

Existen dos tipos de métodos de cálculo, los directos y los iterativos. Los primeros se basan en descomponer la matriz principal (**A**) de ecuaciones en otras fácilmente invertibles. Su uso se concentra en el campo del cálculo estructural por la fiabilidad de los resultados. Son

<sup>30</sup> Como es sabido, el cálculo por elementos finitos consiste básicamente en afrontar un problema grande dividiéndolo en un número determinado de problemas pequeños, *finitos*. Para esta tarea es necesario crear una malla (*mesh*) plana o tridimensional sobre la geometría objeto de análisis, siendo las dimensiones de la malla, y su tolerancia las variables que nos dará mayor o menor precisión de cálculo.

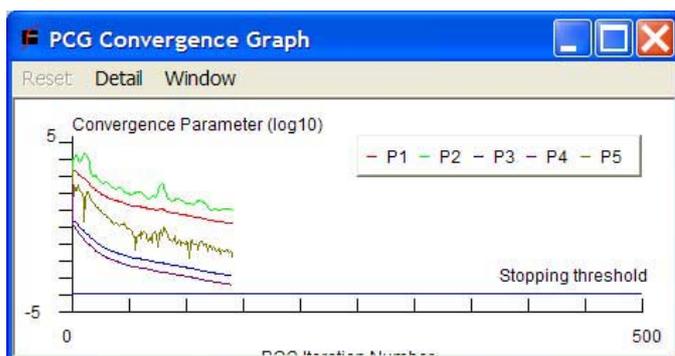
robustos y de solución predecible. El problema es que dada la cantidad de datos que precisan almacenar, los hace poco prácticos en problemas de gran escala.

Esto nos lleva al segundo tipo, los métodos iterativos. Aún así estos métodos mucho más prácticos pueden consumir tiempo de CPU excesiva.

Para solventar este problema surge el preconditionador (**Figura nº 4.13**). Este no es más que una matriz no-singular **M** que aproxima a la matriz **A** y que hace que:

$$\mathbf{M}^{-1} \mathbf{Ax} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{b}$$

que tiene la misma solución que el sistema de ecuaciones **Ax = b**, pero mucho más fácil de resolver (Sandoval, 2006).



**Figura nº 4.13**

El PCG (Preconditioned Conjugate Gradient) conocido también como FFEPLUS, optimiza los tiempos de cálculo al preconditionar la convergencia del resultado.

La resistencia a flexión de las piezas de madera reforzadas y prolongadas mediante prótesis mediante acero se ha llevado a cabo mediante modelos teóricos calculados por el Método de Elementos Finitos (MEF) en el programa arriba indicado. Pese a que la fractura de las piezas no era la parte relevante, en un nivel básico se han tenido en cuenta la teoría del tensor polinómico de Tsai-Wu (1971) muy empleado en la simulación de la capacidad última de la madera por MEF (Williams et al., 2000).

Como quiera que sea se puede garantizar que la simulación de la geometría de los distintos materiales mediante este tipo de software es muy eficiente como han señalado varios autores (Hong and Barret, 2006).

Para sintetizar los parámetros empleados en el programa para los cálculos se detallan a continuación.

El tipo de mallado ha consistido en discretización mediante tetraedros sólidos tanto en las piezas de madera como en las de acero. El motor de mallado ha sido el estándar. No ha

habido ni transición automática ni inclusión de bucles automáticos y con alisado de superficie. Valor 4 en la verificación jacobiana. La media del tamaño de los elementos ha sido de 32 mm y una tolerancia de 1.6. Además se aplicaron controles de malla en el espesor de la chapa de acero y en la proximidad de los taladros. Para la calidad de la malla se han empleado elementos cuadráticos de alto orden. El número de nodos ha sido entre 75.000 y 80.000, el número de elementos entre 40.000 y 50.000 con la máxima relación de aspecto de 56.705. Por lo que respecta al porcentaje de elementos distorsionados (jacobiano) ha sido cero.

Por lo que se refiere al estudio de contactos se ha ejecutado como unión libre sin penetración entre el acero y la madera. Sin embargo los tirafondos se han simulado bajo unión rígida en su introducción en la madera. En el caso de la unión libre sin penetración se ha tenido en cuenta un coeficiente de rozamiento entre acero y madera de 0,40.

#### **4.5.2. Programas, equipos y medios empleados en el Laboratorio del INIA.**

El conjunto de ensayos experimentales que corroboraron los modelos simulados en el software MEF se han realizado en las instalaciones del Laboratorio de Estructuras del INIA. La caracterización de madera de uso estructural es uno de los ámbitos de trabajo y probada experiencia de este laboratorio, que cuenta con un elenco de científicos dedicados a este campo.

El laboratorio de estructuras del INIA, está dotado de dos máquinas universales de ensayos Ibertest (**Figura nº 4.14**), con las cuales se llevaron a cabo las comprobaciones empíricas de los modelos. En el conjunto de ambas máquinas se dispone de potencia (y sus correspondientes células de carga) en un rango entre 0,5 y 600 kN (**Figura nº 4.15**).



**Figura nº 4.14**

Máquina universal de ensayos Ibertest, con capacidad de hasta 600 kN.

El ensayo a flexión según EN 408 (**Figura nº 4.16**) incluye dos determinaciones que pueden realizarse de forma sucesiva en la misma sesión de ensayos o separadamente.



**Figura nº 4.15**

Célula de carga de la máquina universal de ensayos Ibertest.

La primera parte del ensayo (**Figura nº 4.16**) está dedicado a medir el módulo de elasticidad del comportamiento del material sometido a carga creciente. El segundo ensayo, o segunda parte del ensayo completo, es destructivo y habitualmente se usa para ratificar mediciones de ensayos no destructivos o, como en nuestro caso, para comprobar diseños obtenidos por cálculo y simulación.

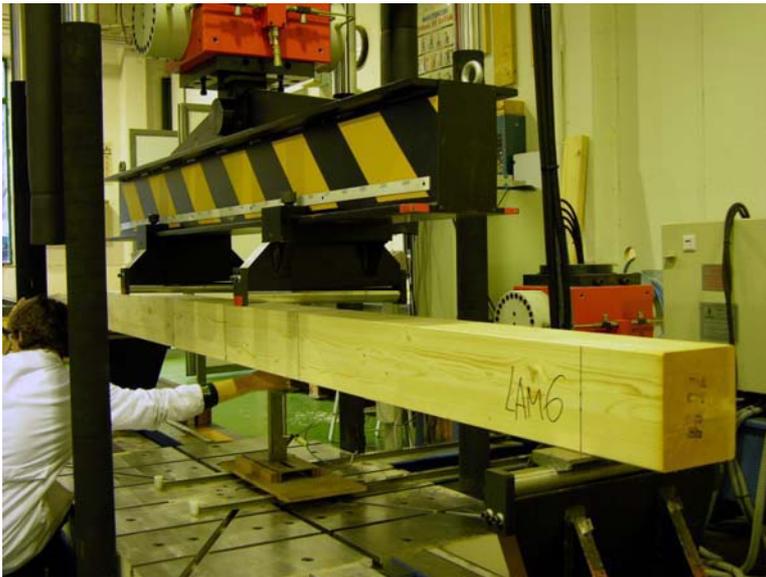


Figura nº 4.16

Ensayo de flexión de pieza de madera laminada según En 408.

Las vigas sometidas a este ensayo (**Figura nº 4.17**) deben tener como mínimo una longitud de 19 veces el canto de la pieza. La pieza se coloca descansando sobre su cara, entre dos apoyos que disten 18 veces el canto de la pieza ( $18h$ ). Por este motivo hemos utilizado una longitud de pieza 20 veces la altura de cara ( $4000\text{ mm}$ ).

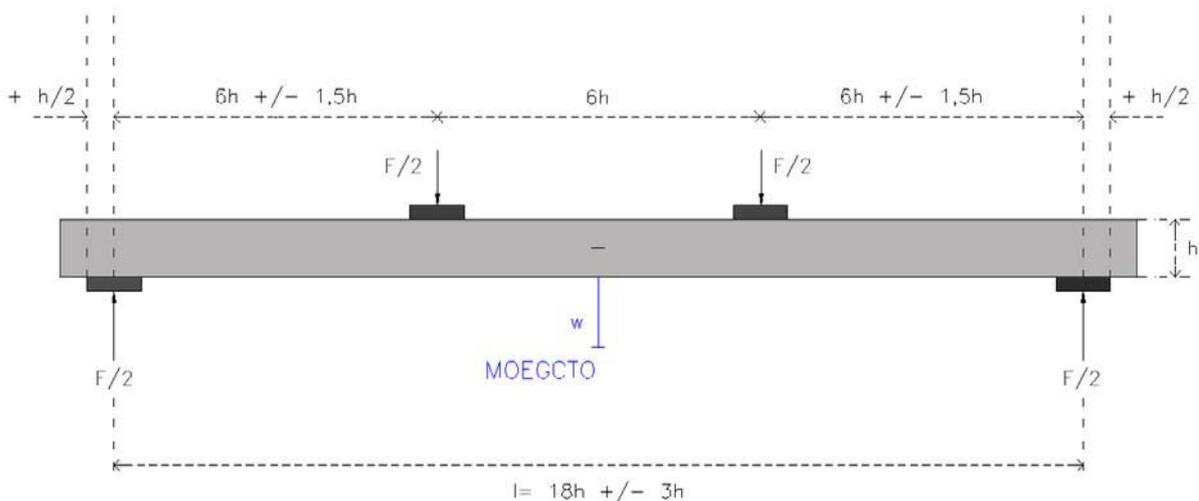
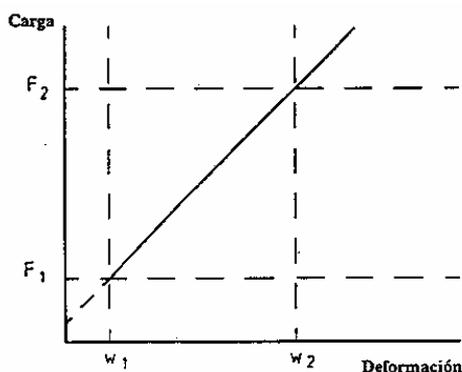


Figura nº 4.17

Ensayo de flexión EN 408 con las luces de trabajo y señalización de la medición de deformación.

La medida del módulo global de elasticidad en flexión estática, se realiza aplicando una carga con una velocidad constante y de tal forma que no se sobrepase el límite elástico para no dañar la pieza.

El ensayo de esta propiedad, siguiendo la norma UNE EN 408, consiste en medir la deformación (**Figura nº 4.18**) que se produce al aplicar dos cargas verticales sobre el canto de la pieza, distanciadas entre ellas una longitud igual a seis veces la altura de la cara de la pieza a ensayar. Para ello, se coloca un captador de desplazamiento (precisión del 1%), bajo la cara inferior de la pieza en ensayo y en el centro de la luz entre apoyos inferiores.



**Figura nº 4.18**

Gráfico de carga-deformación dentro de los márgenes de deformación elástica.

La medida del módulo de elasticidad global, se realiza sobre una luz igual a 18 veces la altura de la cara (la misma distancia que existe entre apoyos) sobre la cual se aplica dos cargas simétricas distanciadas seis veces la altura de la cara.

La expresión de los resultados del módulo de elasticidad, se obtiene mediante la aplicación de la ecuación siguiente:

$$E_{glo} = \frac{l^3 \times (F_2 - F_1)}{b \times h^3 \times (w_2 - w_1)} \left[ \left( \frac{3 \times a}{4 \times l} \right) - \left( \frac{a}{l} \right)^3 \right]$$

Siendo:

$F_2 - F_1$  = incremento de carga en la parte recta de la curva de carga-deformación

$w_2 - w_1$  = incremento de deformación correspondiente a  $F_2 - F_1$ , en milímetros

$b$  = ancho de la sección en los ensayos de flexión o la dimensión más pequeña en la sección, en milímetros

$h$  = altura de la sección en los ensayos de flexión o la dimensión mayor en la sección, en milímetros

$a$  = distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en un ensayo de flexión, en milímetros;

$I$  = luz en flexión, en milímetros

La segunda parte del ensayo determina la resistencia de cada viga a la flexión estática. En este caso se permite a la máquina de ensayo seguir aumentando la carga hasta la rotura de la viga (alternativamente al aumento indefinido de la flecha sin aumento de la fuerza).

La expresión que calcula la resistencia a flexión de la pieza, viene dada por:

$$\sigma_{rot} = \frac{a \times F_{max}}{2 \times W}$$

Donde  $a$  : distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo, en milímetros;  $F_{max}$  : carga máxima, en Newton;  $W$  : módulo resistente de la sección, en milímetros elevados a la tercera potencia. Tras la rotura se registra la forma de rotura y características de la madera en esa zona.

#### 4.5.4 Métodos estadísticos. Descripción de los datos y análisis de varianza.

En este apartado se hace un somero resumen de las técnicas utilizadas en el análisis de resultados. Los análisis estadísticos se han efectuado utilizando software estadístico que con tal fin están disponibles en el INIA (Statgraphics plus 4.1). El soporte teórico de los cálculos que se expondrán a continuación se extrajo de fuentes conocidas (Steel y Torrie, 1985; Sokal y Rohlf, 1979)

En la presentación de resultados hemos utilizado la media aritmética como parámetro de centralidad, la desviación típica y, consecuentemente, el coeficiente de variación como indicadores de la dispersión de datos. Además se acompaña con el tamaño de la muestra, siempre que sea necesario.

Más interesante parece el hablar del Valor Característico de una muestra o población, en este caso de madera para uso estructural con o sin refuerzos y prótesis.

Según en que rama de la ciencia estemos trabajando, se establece un valor característico (en el caso de la caracterización de madera estructural es el 5%, en medicamentos el 0,1%) que garantiza contractualmente que cada partida de madera comercializada tiene un valor característico conocido.

En nuestro oficio será el quinto peor valor de módulo de rotura estimado para una partida de madera. Además, la citada partida tendrá también un valor medio determinado y conocido del módulo de elasticidad y un valor característico de la densidad (calculado de la misma forma que el módulo de rotura) que, salvo el abeto (*Abies alba*) y falso abeto (*Picea abies*) nórdicos, cumplen holgadamente el resto de las coníferas europeas.

Cuando el tamaño de la muestra es igual o menor de 20 veinte piezas, el valor característico “muestral” será el de la peor de ellas.

O bien, suponiendo que la muestra es representativa e insesgada con respecto a la población de donde se ha extraído, puede utilizarse la fórmula:

**Valor Característico Poblacional = Media de la muestra - 1,654 x Desviación Típica de la muestra.**

En puro rigor, debe tomarse el peor valor entre el muestral y el poblacional y con tamaños de muestra sensatos y distribuciones gaussianas, ambos valores son prácticamente iguales.

Se han utilizado en el estudio de aquellas variables en las cuales se pretendía observar la posible existencia de diferencias debidas a los factores objeto del trabajo. El tipo de análisis de varianza efectuado es el jerárquico simple, definido según el modelo:

$$y_{ij} = m + V_i + e_{j(i)}$$

Donde:  $y_{ij}$  es la variable dependiente estudiada

$m$  es la media general de la variable

$V_i$  es el efecto del tipo de madera o refuerzo utilizados en las distintas comparaciones.

$e_{j(i)}$  es el error experimental.

Las variables dependientes que se han analizado son el Módulo de Elasticidad y el Tensión de rotura. La primera para el total de las piezas y ambas para los diversos subconjuntos de piezas y sus combinaciones con refuerzos, prótesis y testigos (simplemente madera).

Cuando se detectan diferencias significativas entre variables dependientes mediante el test F del análisis de varianza, se aplica el test de rangos múltiples para obtener cuáles son las medias significativamente diferentes y permitir extraer grupos homogéneos.

Las variables causales (fuentes de variabilidad) consideradas han sido:

- Los tipos de madera (laminada, de sierra y reciclada)
- Los refuerzos (testigo, refuerzo y prótesis)

Podríamos haber complicado el diseño hasta un factorial simple pero, tras diversos tanteos previos, consideramos que las presuntas interacciones tipo de madera-tipo de refuerzo no resultaban relevantes.

#### 4.6. ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD RESIDUAL MECÁNICA EN ESCUADRÍAS DE MADERA ATACADAS POR AGENTES BIÓTICOS Y ABIÓTICOS CUANDO SE ENCUENTRAN SOMETIDAS A ESFUERZOS DE FLEXIÓN Y CORTANTE.

##### 4.6.1. Reducción de la resistencia mecánica de vigas y viguetas de madera.

Se ha comparado de forma muy acertada el comportamiento de la madera y del hormigón armado y su respuesta mecánica ante las acciones impuestas (García Esteban et al, 2003).

El acero es, a las largas cadenas de *celulosa*, como el *hormigón* a la *lignina*. De nuevo, un material vivo como es la madera resurge para demostrar los usos y formas de trabajo que se le atribuyen muchas veces con exclusividad a los materiales inventados por la técnica y el desarrollo industrial.

Es conocido que a igualdad de peso, la respuesta de la madera supera en 3 veces al hormigón y casi en 4 al acero. La razón del menosprecio creado al material se basaba en el injustificado mal comportamiento ante el fuego y su degradación ante agentes bióticos diversos.

Hoy con la política de intervenciones en edificios históricos y en general de recuperación de tejidos de los cascos históricos (Maldonado y Vela Cossío, 1998), encontramos forjados sustituidos en acero en zonas húmedas que tras escasos 5-10 años muestran el aspecto de la **Figura nº 4.19**.



**Figura nº 4.19**

Corrosión y desaparición casi completa de la sección de acero de IPN localizada en forjado de edificio antiguo en la zona de cocina. Uno de los problemas más graves de este tipo de ataques corrosivos de humedad es que los derrumbes a diferencia de lo que ocurre en la madera, no avisan mediante crujidos sino que se producen de forma inesperada.

Esto contrasta con un forjado del mismo edificio que sufre el ataque por pudrición parda húmeda en la cabeza de las viguetas por filtraciones a través del cerramiento pudiendo ser reforzado sin necesidad de plantear demolición ni sustitución (**Figura nº 4.20**).

Pese a ello no entendemos que se deba hacer una apología a ultranza de la madera, pero sí recuperar su papel preponderante en el panorama actual de la arquitectura no solo doméstica sino de grandes luces y espacios así como en la obra civil donde son actualmente tan protagonistas los puentes de madera laminada.



**Figura nº 4.20**

Ataque de hongos de pudrición parda húmeda por la humedad sostenida y provocada por las filtraciones a través del cerramiento. Es observable la entereza del forjado a pesar de que existe una pérdida de masa de madera en las viguetas en esa zona de unos 20 mm

Como ya hemos indicado antes la rotura de la madera no se produce de forma repentina sino que lo hace de forma escalonada, con crujidos previos al colapso de las piezas.

Los valores de resistencia a la rotura a tracción de la lignina ( $240 \text{ N/mm}^2$ ) y de la celulosa ( $1.000 \text{ N/mm}^2$ ) sumado a su poca densidad ( $400\text{-}1200 \text{ Kg/m}^3$ ) lo hacen el material de mayor resistencia a igualdad de peso. La estructura tubular hueca de paredes de lignina zunchadas por espirales de celulosa es la combinación ideal para la resistencia mecánica de las piezas.

Pese a todo ello existe una característica determinante en el funcionamiento mecánico de la madera; su anisotropía. Este comportamiento va a depender de cual es la dirección que tenga la carga aplicada sobre la pieza, siendo su funcionamiento diferente en las tres direcciones del espacio. En el sentido de crecimiento en altura del árbol (paralela a la fibra), en anchura (radial) y lateralmente (tangencial al eje del árbol). Estas dos últimas suelen aproximarse relativamente por lo que la anisotropía se reduce a paralelo y perpendicular a la fibra.

Las resistencias a compresión, tracción, flexión, cortante y torsión son razonablemente buenas para los usos a que están destinados y la anisotropía se mitiga de forma decisiva por el empleo de la madera laminada encolada, que hace de las piezas elementos muy homogéneas y sin apenas desviaciones de fibra en su conjunto.

En este apartado vamos a definir las pérdidas de resistencia (flecha, flexión y cortante) ante la disminución en las escuadrías atacadas.

Para poder abordar con precisión la capacidad mecánica residual de las piezas de madera sometidas a flexión, haremos uso del cálculo de secciones reflejado en el EC5<sup>31</sup> y en el CTE<sup>32</sup>.

El objetivo es comprobar como varía el índice de agotamiento (a flexión y cortante) y la deformación de las piezas a medida va reduciéndose su geometría tras el ataque.

Por una parte con el método de cálculo de los estados límites (EC5 y CTE), tomaremos los valores referenciales de tensiones máximas y resistencias de cálculo para así obtener los índices de agotamiento (Argüelles y Arriaga, 1996).

Los procesos más arriba mostrados guardan una relación muy estrecha con la resistencia de vigas o viguetas de forjados que se encuentran en servicio y tienen cierta antigüedad.

En algunos procesos la reducción de propiedades mecánicas es inexistente como en el caso de los hongos cromógenos, mientras que en otros casos esa reducción puede ser total, como es el caso de algunos insectos de ciclo larvario (*Hylotrupes bajulus* L.) o las propias termitas.

Por otro lado existen otros factores que afectan a la resistencia mecánica de este tipo de estructuras y que son en mayor o menor medida independientes de procesos patológicos. Forman parte del uso diario de la estructura y se tienen en cuenta para el cálculo o comprobación de las piezas colocadas ahora.

---

<sup>31</sup> UNE ENV 1995-1-1. Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1:Reglas generales y reglas para la edificación.

<sup>32</sup> Real Decreto 314/2006. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. Madera.

A continuación describiremos estos factores y su relevancia e incidencia en el tipo de estructuras que estamos tratando.

El primer factor es la variación del **contenido de humedad** de las piezas de madera. Dicho contenido influirá sobre la estructura siempre que se encuentre su variación por debajo del punto de saturación de las fibras de la madera.

Incrementos de ese contenido tenderán a disminuir la capacidad resistente y el módulo de elasticidad de la madera. En forjados de edificación las variaciones de humedad suelen ser escasas al estar las vigas y viguetas protegidas en espacios cerrados.

Pese a ello, todos aquellos forjados que se encuentren en contacto con el ambiente aunque estén situados en el interior de edificaciones, si pueden sufrir este tipo de disminuciones.

Las reducciones más significativas serían las sufridas en la compresión paralela a las fibras (5% de variación por cada 1% de grado de humedad) y en la flexión (4% de variación por cada 1% de grado de humedad<sup>33</sup>).

El segundo factor es la **duración de la carga** (Kollman, 1959) en el que los estudios demuestran que la madera resiste mejor las cargas de corta duración que las permanentes.

Pese a ello, se constata la poca incidencia en la reducción de capacidad resistente en las estructuras antiguas debida a la duración de la carga.

Finalmente se encuentra la **calidad de la madera** como factor determinante (Díez et al., 2001) en la resistencia de las piezas, al ser el número de defectos existentes en las mismas lo que determina cómo se comportará la estructura ante determinadas acciones.

En nuestro caso y dado que las piezas de madera se encuentran colocadas en obra desde hace decenas de años, la incidencia en la resistencia no es especialmente relevante a no ser que sufra un ataque biótico o se encuentre a la intemperie.

---

<sup>33</sup> Hay fuentes que citan, pese a lo descrito antes, que la dependencia entre la humedad y la resistencia se hace menos acentuada cuando se está hablando de maderas comerciales en tamaño real y con defectos (Argüelles y Arriaga, 1996).

A continuación estableceremos las comprobaciones de la capacidad resistente de las piezas de madera embebidas en el forjado haciendo las correcciones oportunas de sección o luz según sea el tipo de ataque sufrido.

Los factores antes descritos se introducen en los cálculos de las estructura a través de determinados coeficientes que se encuentran tabulados en la normativa correspondiente (ver nota 31 y 32).

#### 4.6.2. Incremento de la deformación y disminución de la capacidad a flexión y a cortante

Uno de los síntomas más característicos observables en los forjados de madera es la deformación que experimentan con el paso el tiempo. La deformación suele afectar a las tabiquerías (**Figura nº 4.21**) de los pisos superior e inferior formándose arcos de descarga sin que ello sea merma de la estabilidad de la estructura.



**Figura nº 4.21**

Arco de descarga en tabique de fábrica de ladrillo revestido de yeso y papel en edificio de 150 años de edad con estructura horizontal de forjados de madera de gran escuadría y estructura vertical de entramado madrileño a base de pies derechos y vigas de madera rellenos de fábrica de ladrillo.

Como se comentó más arriba, la humedad es uno de los factores que más afecta al comportamiento de la madera. No sólo lo hace desde la sensibilidad al posible ataque de la misma, sino que es determinante en el comportamiento mecánico de la estructura. Existe otro factor determinante en este comportamiento y tiene que ver con la duración de la carga (Kollmann, 1959). Se ha comprobado mediante ensayos mecánicos la incidencia que la duración de la carga tiene en la resistencia de las piezas (Wood, 1947), llegándose a formular la conocida curva de Madison (corregida posteriormente en el EC5).

Tras todos estos estudios, el que parece aproximarse más a la realidad es el de la “teoría del material visco-elástico fisurado” (Madsen y Nielsen, 1992) que estudia la madera desde las teorías de la visco-elasticidad y de la mecánica de fractura (Argüelles y Arriaga, 1996).

Concretamente y ya dentro de la evaluación de la deformación de la estructura de madera puesta en obra y sometida a flexión, es importante hablar del  $K_{def}$ . Este es un coeficiente que corrige los valores de deformación por la influencia de la duración de la carga y de la clase de servicio. El coeficiente  $k_{def}$  corrige la rigidez de la estructura y por ello es empleado en el cálculo de las deformaciones de estructuras de madera.

Concretamente la **humedad/temperatura** (clase de servicio) y **duración de la carga** entran en las fórmulas empleadas para la generación de las tablas a través  $k_{def}$ .

El valor de la flecha instantánea y diferida se realiza con la conocida fórmula de la

elasticidad 
$$u_x = \frac{5 q l^4}{384 E I} .$$

El valor de la deformación final toma la forma siguiente:

$$u_f = u_i + u_d = u_i * ( 1 + K_{def} )$$

En el caso de la deformación es de especial relevancia el estudio de las limitaciones de flecha (Arriaga et al., 2002) siendo recomendado no superar los rangos de valores siguientes:

L/300 a L/500 para la flecha inicial ( $u_i$ )

L/250 a L/350 para la flecha final ( $u_f$ )

Si en la deformación introducíamos a través del  $k_{def}$  la corrección de la rigidez de la estructura de madera, a través de  $k_{mod}$  introduciremos la corrección de la resistencia por la influencia de la humedad y la duración de la carga.

Ya en la deformación y en la fórmula correspondiente utilizamos el tipo de madera y su clasificación para obtener un módulo de elasticidad para el cálculo. Es significativa la

problemática de la clasificación de la madera para uso estructural (Hermoso, 2003) y el papel que desempeñado por las normativas recientes.

Ahora en la capacidad a flexión, la clasificación resistente de la madera influye doblemente no sólo en el módulo de elasticidad empleado, sino en la resistencia a flexión  $f_{m,k}$ <sup>34</sup>. Así para las maderas de sierra (nueva y antigua) su clasificación resistente es de C14, bastante baja y correspondiente con el valor de resistencia a flexión de 14 N/mm<sup>2</sup>.

Este será el valor de referencia que compararemos con la tensión máxima de flexión en cada caso y con la fórmula  $\sigma = \frac{M_{p,d}}{W}$ .

A pesar de la falta de rigidez de los forjados de madera, su capacidad mecánica a flexión es razonablemente buena.

Para la comprobación de la capacidad a cortante de la pieza, los valores de la sección dependen de la tensión máxima de cortante  $t_d$ .

#### 4.6.3. Reducción de la sección y su comportamiento mecánico

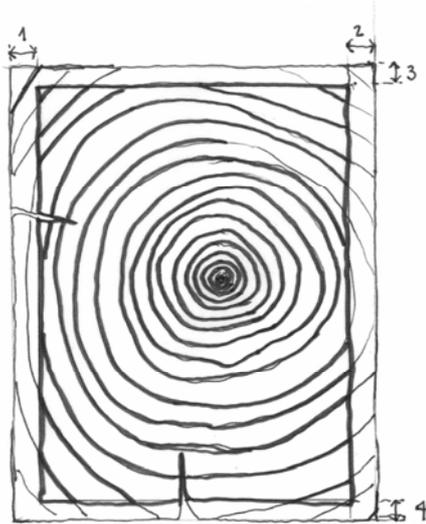
Uno de los aspectos más relevantes de la diagnosis patológica estriba en la etiología de los procesos involucrados en las estructuras. Por otro lado, las consecuencias de los procesos patológicos en el caso de las estructuras de madera sometidas a flexión suelen confluír de alguna u otra manera en la reducción más o menos significativa de la sección útil de trabajo

La resistencia residual de la estructura tras sufrir reducciones de espesor en la sección, derivadas de ataques de hongos, xilófagos, incendios o cualquier otro agente posible, debe ser convenientemente estudiada.

Somos conscientes de que determinados ataques no se pueden invertir reforzando, por lo que es importante saber cual es el régimen de trabajo de las estructuras en deformación y flexión tras sufrir estos ataques.

<sup>34</sup>Los datos de las propiedades resistentes (flexión, tracción paralela y perpendicular, compresión paralela y perpendicular y cortante) propiedades elásticas (módulo de elasticidad medio paralelo y perpendicular, módulo de elasticidad al 5% y módulo cortante medio y los valores de densidad son aportados por la **UNE EN 338.**, 1999. *Madera estructural. Clases resistentes*. Estos son los datos que luego recoge el **EC5** y el **CTE** para en los métodos de cálculo plantear la fórmula de  $f_{m,d} = k_{mod} * f_{m,k} / \gamma_m$  siendo  $f_{m,d}$  el valor de cálculo de la resistencia a flexión y  $\gamma_m$  un coeficiente parcial de seguridad equivalente a 1,3 para acciones fundamentales.

La sección de madera (**Figura nº 4.22**) puede llegar a sufrir reducciones en todas sus caras, de forma sincronizada o aleatoria.



**Figura nº 4.22**

Escuadría de madera con pérdida en sus cuatro lados. Los números 1, 2, 3 y 4, indican que la pérdida se puede producir unas al margen de otras.

Para los cálculos que se van a realizar a continuación, se ha tenido en cuenta dos opciones. Una pérdida perimetral e idéntica de canto y ancho, y una pérdida parcial de la altura de la pieza.

Para llevar a cabo este estudio plantearemos el caso general y deduciremos cuál es el porcentaje de incremento de rigidez o de disminución de resistencia en una sección genérica. La simbología empleada es la siguiente:

$b_1$  = Ancho de la sección original

$b_2$  = Ancho de la sección reducida

$h_1$  = Canto de la sección original

$h_2$  = Canto de la sección reducida

$k_b$  = coeficiente reductor del ancho de la pieza

$k_h$  = coeficiente reductor del canto de la pieza

$l$  = Luz de cálculo

$q$  = carga sobre la viga

$M$  = Momento a flexión de la pieza biapoyada

$w_1$  = módulo resistente de la sección original

$w_2$  = módulo resistente de la sección reducida

$I_1$  = Momento de inercia de la sección original

$I_2$  = Momento de inercia de la sección reducida

$u_1$  = Deformación de la pieza sin pérdida de sección

$u_2$  = Deformación de la pieza con pérdida de sección

$\sigma_1$  = Tensión de la sección original

$\sigma_2$  = Tensión de la sección reducida

$E$  = Módulo de elasticidad longitudinal de la madera

Además las relaciones entre anchos y cantos de secciones intactas y de secciones con pérdida son:

$$b_2 = b_1 - k_b b_1 \quad 4.1$$

$$h_2 = h_1 - k_h h_1 \quad 4.2$$

Haciendo que la pérdida de  $h$  sea igual a la de  $b$

$$b_1 - b_2 = k_b b_1 \text{ y } h_1 - h_2 = k_h h_1$$

$$k_h h_1 = k_b b_1$$

Y como  $h/b = 1,4$

$$1,4 = k_b / k_h$$

$$k_b = 1,4 k_h \quad 4.3$$

Comparando la flecha existente en la pieza intacta y en la pieza con pérdida de sección, dividimos  $u_2$  entre  $u_1$  :

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\frac{5}{384} \frac{q l^4}{E I_2}}{\frac{5}{384} \frac{q l^4}{E I_1}}$$

Como las inercias están en función de las dimensiones de las piezas:

$$I_1 = \frac{b_1 h_1^3}{12} \text{ y } I_2 = \frac{b_2 h_2^3}{12}$$

Eliminando términos tenemos que la relación de flechas queda como:

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{b_1 h_1^3}{b_2 h_2^3}$$

Utilizando 4.1, 4.2, 4.3 y poniendo todo en función de  $b_1$  tenemos:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{(1 - 1,4k_h)(1 - k_h)^3} \quad 4.4$$

En el caso de la reducción de tensión consecuencia de una disminución de la sección tendremos la relación entre  $\sigma_2$  y  $\sigma_1$ .

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\frac{M}{w_2}}{\frac{M}{w_1}}$$

Como el momento de una viga biapoyada es  $\frac{ql^2}{8}$  y el módulo resistente es  $\frac{bh^2}{6}$  la expresión anterior se simplifica en función del ancho y del canto de nuevo.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{b_1 h_1^2}{b_2 h_2^2}$$

Haciendo uso de nuevo de 4.1, 4.2, 4.3 y poniendo todo en función de  $b_1$  obtenemos:

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1}{(1 - 1,4k_h)(1 - k_h)^2} \quad 4.5$$

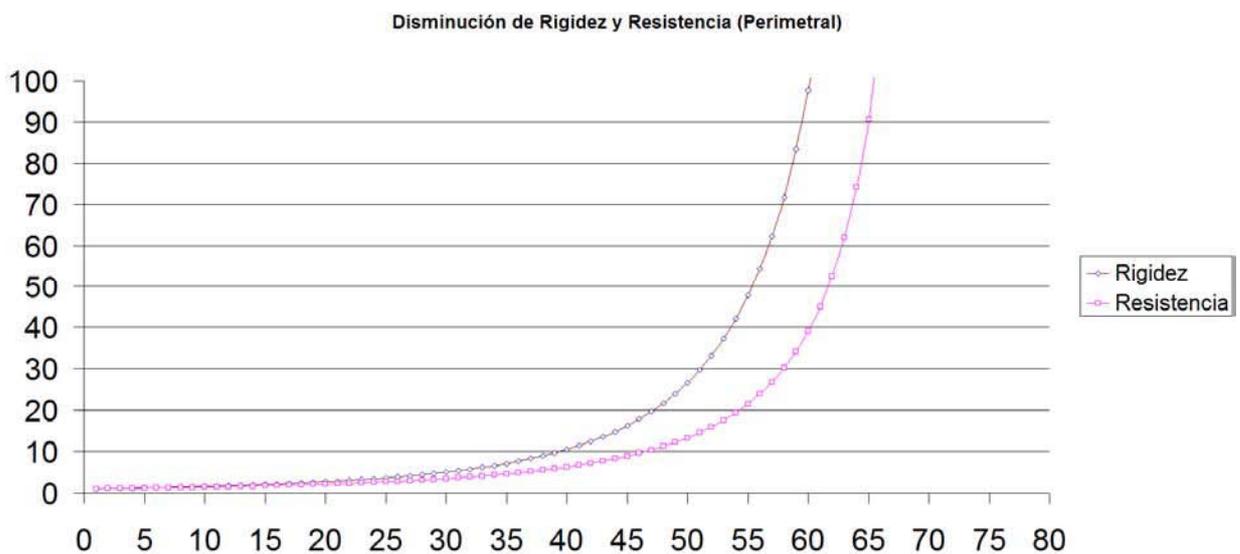
Que como puede comprobarse, varía únicamente con respecto a 4.4 en el exponente del término  $(1 - k_h)$ . Estas mismas operaciones efectuadas sobre una pérdida exclusiva de  $h$  nos dan las expresiones 4.6 y 4.7.

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{1}{(1 - k_n)^3} \quad 4.6$$

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1}{(1 - k_n)^2} \quad 4.7$$

En donde el término  $(1 - 1,4k_n)$  no existe al no ser dependientes las expresiones de  $b$ .

Si tabulamos las expresiones 4.4 y 4.5 obtenemos la influencia de la reducción de sección sobre el incremento de deformación y sobre la disminución de la resistencia mecánica de la sección genérica (**Figura nº 4.23**).

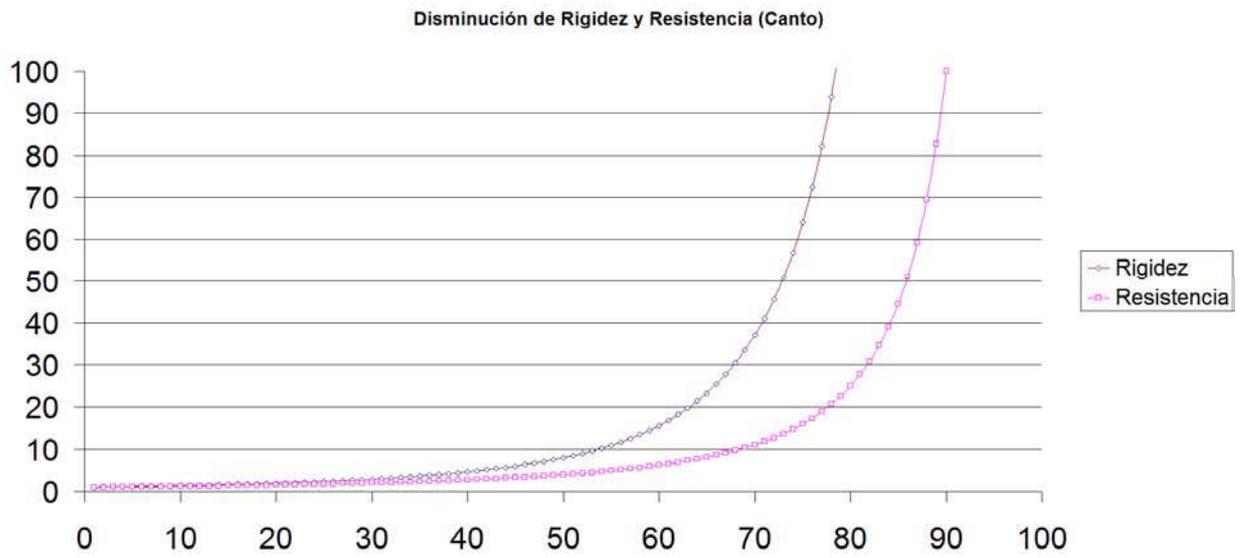


**Figura nº 4.23**

El eje vertical muestra el porcentaje de Resistencia y Rigidez mientras que el eje horizontal es el porcentaje de pérdida de sección.

En la gráfica se puede observar como en las inmediaciones del 70 % de pérdida de sección, la curva de rigidez se hace asintótica y la pérdida llega al 100%. Esto se debe a la influencia de  $(1 - 1,4k_n)$  sobre la gráfica, dado que la proporción de  $b/h$  es 1,4.

En el caso de la pérdida parcial de canto de la sección, las expresiones 4.6 y 4.7 tabuladas y llevadas a una gráfica (**Figura nº 4.24**) muestran una abertura significativa entre las curvas de resistencia y rigidez.



**Figura nº 4.24**

El eje vertical muestra el porcentaje de Resistencia y Rigidez mientras que el eje horizontal es el porcentaje de pérdida de sección.

En el análisis de los refuerzos volveremos sobre estas gráficas y marcaremos sus franjas de trabajo tope.

#### **4.4. MEJORA DE LA CAPACIDAD MECÁNICA MEDIANTE REFUERZO METÁLICO DE PIEZAS DE MADERA SOMETIDAS A FLEXIÓN.**

Ahora acometeremos el proceso de diseño constructivo de las soluciones de refuerzo planteando las distintas posibilidades que se manejaron inicialmente y cuales fueron las que se decidió trasladar al modelo de cálculo MEF.

El proceso fue eminentemente selectivo por patrones de óptimos de comportamiento estructural y economía de medios de trabajo dado que la finalidad de la investigación es un planteamiento de refuerzo que sea adaptable a obra con las garantías necesarias.

El marcado carácter de óptimos de la simulación por elementos finitos basada en una concreta programación de algoritmos (Lee et al., 2003) procura a través de la simplificación de la estructura una aproximación lo más real posible a su comportamiento mecánico. Esta Tesis pretende entre otras cosas, servirse de la herramienta de cálculo para plantear ensayos reales sobre modelos teóricos suficientemente depurados.

##### **4.4.1. Parámetros de diseño. Adaptación constructiva y comportamiento mecánico.**

La zona por la que se aplica el refuerzo es de vital importancia para el desarrollo de esta Tesis. Haciendo un breve repaso existían varias razones por las que abordábamos el refuerzo por la cara superior del forjado (**Figura nº 4.25**).

Por una parte era la zona idónea de cara a la diagnosis eficiente de los procesos patológicos a que se podría encontrar sometida la estructura. Ello implica la retirada del solado del forjado. Esto puede ser ventajoso constructivamente hablando por varias razones. Una es que será posible disponer una capa de compresión (*losa superior de forjado*<sup>35</sup>) de hormigón armado, aligerado si procede, de la cual carecen este tipo de estructuras antiguas. Otra, la descarga de capas de solado innecesarias, costumbre empleada en las reformas. La retirada de la capa de solado lejos de generar una distorsión en obra permite visualizar, tanto problemas de entrega de las piezas y como flecha, con relativa precisión.

---

<sup>35</sup> Real Decreto 642/2002. Instrucción para el proyecto y ejecución de forjados unidireccionales de hormigón estructural realizados con elementos prefabricados (EFHE).

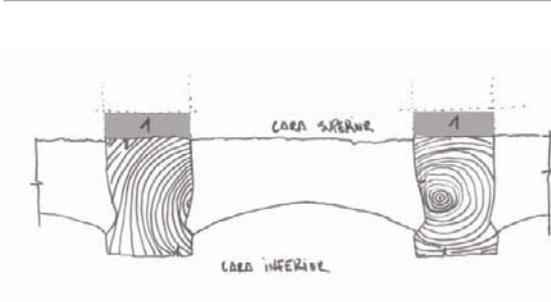


Figura nº 4.25

En esta figura se muestra la zona por la que se aplica el refuerzo de forma exclusiva sin tocar los riñones de las piezas ni la socarrena del forjado. La zona marcada (1) corresponde con la franja del refuerzo.

Otro de los factores determinante para el trabajo por la cara superior es poder intervenir sobre la estructura de madera por una sola de sus cuatro caras, a modo de mínima incisión, de forma que la integridad de la pieza permanezca en condiciones de trabajo y estabilidad durante el proceso de refuerzo. Es decir, para el refuerzo que se plantea no es preciso ni el desalojo de la parte inferior del forjado (dado que no demolemos los entrevigados) ni su apeo provisional, pues contamos con la capacidad mecánica residual de la pieza a flexión y cortante como se ha visto en el capítulo anterior.

Es importante señalar que la retirada de la capa de solado no afecta a la socarrena del forjado que queda intacta al producir un eficiente acodalamiento entre las piezas de madera que hace innecesario las comprobaciones a vuelco lateral que de otro modo complicarían y prolongarían las comprobaciones de la estructura.

Finalmente consideramos que la madera es un material de construcción de inmejorables características mecánicas, como ya se ha expuesto, por lo que su sustitución es un error. Por ello el refuerzo actúa sobre el nervio del forjado recuperando su capacidad mecánica que no sustituyéndola (**Figura nº 4.26**). Es un conjunto de trabajo solidario y óptimo para aprovechar un material degradado pero válido (la madera) con otro material (el acero) que posee buena relación entre rigidez y volumen.

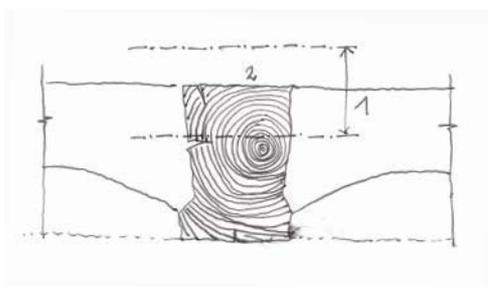


Figura nº 4.26

En esta figura se puede comprobar el área reducida de trabajo del refuerzo por encima de la cota superior de forjado (2) y por debajo de la misma. La distancia entre las dos (1) nos dará el brazo de palanca del refuerzo.

#### 4.4.2. Proceso selectivo de elección del refuerzo. Variantes y variables estudiadas.

A continuación se exponen los criterios seguidos para la elección del modelo de refuerzo que finalmente se ensayó en el Centro de Investigación Forestal del INIA sobre distintas piezas de madera. Se intentó en todo momento que el sistema de montaje fuera de fácil aplicación y no requiriera mano de obra especializada en su desarrollo. Como ya se ha indicado antes, la depuración final de piezas se llevó a cabo en un programa de cálculo por elementos finitos. Esto no quiere decir que las piezas analizadas en el programa fueran las únicas posibilidades que se plantearon, pues este tema fue muy elaborado y sufrió numerosos cambios en los diseños antes de llegar a los cálculos de los modelos teóricos. Pese a los cambios de los que hablamos, el espíritu de intervención por la cara superior sin afectar a la socarrena del forjado se mantuvo siempre presente.

##### 4.4.2.1. Geometría y características mecánicas. Elección del refuerzo.

Las geometrías inicialmente analizadas consistían básicamente en la unión mediante soldadura de chapas de acero laminado estructural de 4 mm y 5 mm de espesor. Su disposición, como ya se ha comentado, sobresaldría por encima de la cara superior de la vigueta de madera y se introduciría en el interior de la madera. La finalidad es establecer el mayor brazo de palanca posible entre zona de compresión en la parte superior y zona de tracción en la parte inferior.

A pesar de ello, se comprobó en primer lugar la forma convencional de U sobre la madera, pero como se expondrá más adelante se descartó por los valores de inercia tan escasos, comparados con los de las otras geometrías con más brazo de palanca.

La limitación dimensional de la parte superior ( $h_c$ ) de la pieza (**Figuras nº 4.27 a nº 4.32**) es el espesor de la capa de compresión o losa superior de forjado. La parte inferior ( $h_p$ ) tiene su límite dimensional en la menor invasión en el alma de la pieza de madera y en criterios de corte por las herramientas de mercado que en el apartado de montaje se expondrán. La parte de madera eliminada correspondería con el bloque de compresiones de material xilemático que es reemplazado por un bloque de compresiones de acero laminado.

Otra dimensión importante es  $b$  correspondiente al ancho total del refuerzo y que tiene que ver con la adaptación dimensional a las viguetas de forjado que se refuerzan. Los espesores

de las pletinas de acero también fueron variables analizadas por la incidencia que pudieran tener en la rigidez y resistencia de los refuerzos.

Como se dijo antes, la zona de trabajo del refuerzo y la mínima invasión sobre la madera, eran ideas de partida. Dado que los perfiles estándar de acero estructural posee las restricciones propias del mercado y que de lo que tratamos aquí es de reforzar ampliando los rangos de trabajo de las estructuras leñosas para adaptarlos a las condiciones de servicio que puedan haber perdido en su degradación, la cantidad de material es una aplicación de mínimos en este estudio.

Es importante señalar en este punto que se compararon los valores estáticos de las chapas en forma de U de la Tesis con las UPN de tamaño similar. Los perfiles estándar son mucho más pesados en su relación resistencia/peso y fueron descartados.

Si por ejemplo comprobamos los valores estáticos del UPN 80 y concretamente la cantidad de material y su peso cuyo valor es de 8,64 Kg/ml con la cantidad de material de un perfil en forma de U de 100 mm de ancho (b) vemos que le corresponde 5,40Kg/ml (**Figura nº 4.27**). La reducción considerable de peso para estos dos perfiles es ostensible, más aún cuando con las chapas trabajamos con anchos mayores.

Pese a ello el análisis de cuatro subvariantes por cada variante nos da una idea de la variación de la inercia compuesta y de la resistencia en la parte inferior de la madera trabajando a flexión cuando se encuentra reforzada por la parte superior.

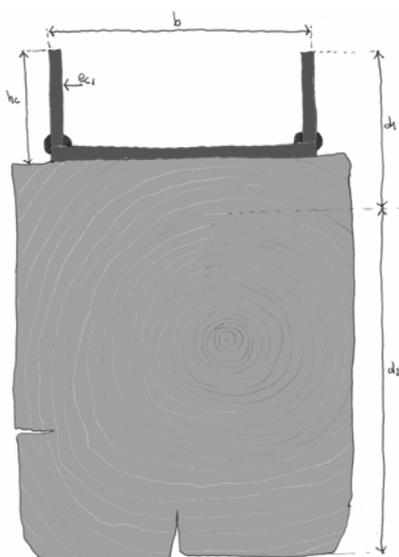
Estas soluciones de chapas de distintos espesores dispuestas en varias posiciones conformaron el espectro de trabajo del pre-análisis de piezas en el cálculo sin la ayuda aún del software MEF.

A continuación se exponen seis variantes de la pieza de refuerzo con un ancho b fijado en 100 mm para su adaptación a una hipotética vigueta de forjado antiguo. Así mismo se ha realizado por cada variante cuatro subvariantes en las que se modifican los valores de espesor de la chapa y de altura de la pletina superior del refuerzo. Los cálculos están realizados con la carga de servicio y con madera antigua de clase resistente C14 con los valores de resistencia e inercia correspondientes. El valor así obtenido de tensión en el punto más bajo de la viga reforzada corresponde a la sección homogeneizada y cuyo

análisis detallado se verá en el apartado de *comportamiento diferencial de acero y madera*. Es importante comprobar como varían los valores de peso por metro lineal de las piezas y de inercia compuesta.

Las seis primeras variantes correspondientes al refuerzo de viguetas de madera por la cara superior del forjado arrojan valores muy óptimos de trabajo al hacer descender a igualdad de condiciones la tensión en la parte inferior de la madera desde 4,79 N/mm<sup>2</sup> hasta los 2,46 N/mm<sup>2</sup> de la subvariante 1.1 (**Figura nº 4.27**).

Esto hace que el índice de agotamiento de la sección, originalmente sin refuerzo, descienda de 55,6% al 28,5 %. Valor más que razonable para empezar a considerar la solución de refuerzo. Además debemos recordar la misión del refuerzo, la recuperación de la capacidad mecánica.



**Figura nº 4.27**

Variante nº 1

Espesor de chapas exteriores.  $e_{c1} = 4 \text{ mm}$ ;  $e_{c2} = 5 \text{ mm}$

**Subvariante 1.1 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =40 \text{ mm}$ )**

Peso = 5,40 kg/ml;  $d_1=71,13 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 3757166,14 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,46 \text{ N/mm}^2$

**Subvariante 1.2 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =40 \text{ mm}$ )**

Peso = 6,67 kg/ml;  $d_1=66,45 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 4049556,68 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,37 \text{ N/mm}^2$

**Subvariante 1.3 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =30 \text{ mm}$ )**

Peso = 4,77 kg/ml;  $d_1=66,45 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 3384364,87 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,64 \text{ N/mm}^2$

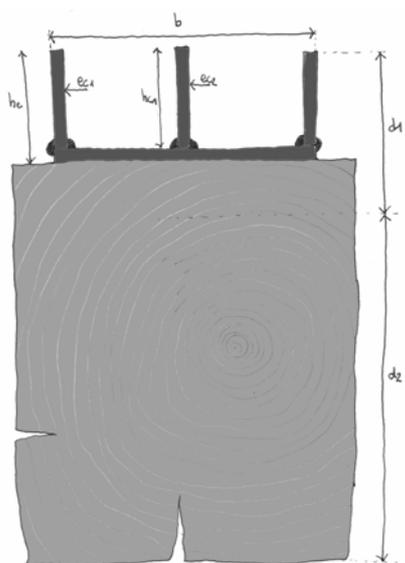
**Subvariante 1.4 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =30 \text{ mm}$ )**

Peso = 5,89 kg/ml;  $d_1=60,84 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 3644172,91 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,54 \text{ N/mm}^2$

Como ya vimos en las tablas de la reducción de valores mecánicos tras los ataques en perímetro o cara superior, el índice de agotamiento iba creciendo considerablemente en progresión a la degradación.

Se puede por tanto inferir que la colocación de este tipo de refuerzos podría plantear dicha recuperación a pesar de la pérdida de sección tras los ataques. La existencia dentro de la pieza degradada de madera en buen estado, garantiza la participación de ambos componentes en la viga compuesta de acero madera.

En esta línea la variante con varias pletinas superiores (**Figura nº 4.28**) fue valorada como un perfeccionamiento teórico de la resistencia a tracción. La misión de las chapas verticales está relacionada con la futura capa de compresión o losa superior de forjado que se dispondría en los forjados de intervención. Es reseñable que la función de separador motiva el que la pletina vertical suba hasta una determinada altura que puede variar de 30 a 40 mm. Un buen comportamiento de la armadura de reparto del forjado desde su plano medio aseguraría un buen comportamiento a la flexión y redistribución de las cargas superficiales hacia los nervios reforzados de madera. No obstante dichas pletinas también podrían adaptarse al sistema de forjado mediante entablado de madera, en el que un tablero superior de madera ejerce la función de capa de compresión y de acodamiento de la estructura de madera ante el vuelco lateral cuando los forjados no poseen socarrena maciza.



**Figura nº 4.28**

Variante nº 2

Espesor pletina inferior  $e_{c3} = 4\text{ mm}$

**Subvariante 2.1 ( $e_{c1} = 4\text{ mm}$ ;  $h_c = 40\text{ mm}$ )**

Peso = 6,53 kg/ml;  $d_1 = 65,98\text{ mm}$ ;

$I_x = 4139792,41\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}} = 2,33\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 2.2 ( $e_{c1} = 5\text{ mm}$ ;  $h_c = 40\text{ mm}$ )**

Peso = 8,05 kg/ml;  $d_1 = 61,34\text{ mm}$ ;

$I_x = 4442941,19\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}} = 2,25\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 2.3 ( $e_{c1} = 4\text{ mm}$ ;  $h_c = 30\text{ mm}$ )**

Peso = 5,59 kg/ml;  $d_1 = 61,34\text{ mm}$ ;

$I_x = 3653357,64\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}} = 2,53\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 2.4 ( $e_{c1} = 5\text{ mm}$ ;  $h_c = 30\text{ mm}$ )**

Peso = 6,87 kg/ml;  $d_1 = 56,88\text{ mm}$ ;

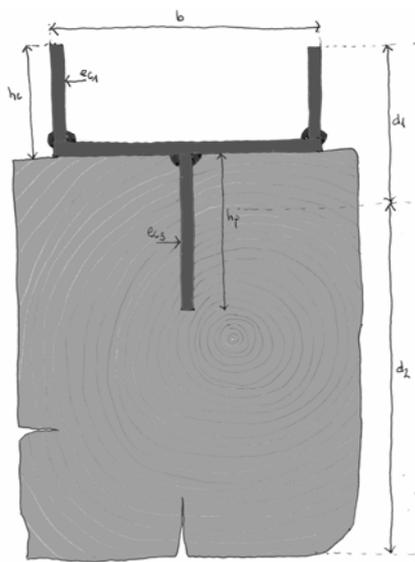
$I_x = 3918797,13\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}} = 2,44\text{ N/mm}^2$

Aún así sabemos que la madera es anisótropa y además cuenta con defectos visibles y no visibles.

Dado que esto ocasiona que las piezas puedan contener nudos en el interior que reduzca considerablemente los rangos de trabajo de las estructuras bajo diferentes cargas, se evaluaron otras geometrías que minimizaran este efecto.

Esta es la razón de la variante nº 3 (**Figura 4.29**) y sus derivaciones posteriores, en las que se produce una sustitución del bloque de compresiones de la madera por otro mucho más

homogéneo y resistente de acero. Esto produce una ganancia de brazo de palanca en el trabajo a flexión.



**Figura nº 4.29**

Variante nº 3

Espesor pletina inferior  $e_{c3}= 4\text{mm}$

**Subvariante 3.1 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 7,28 kg/ml;  $d_1=70,97\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3825094,60\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,42\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 3.2 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 8,56 kg/ml;  $d_1=66,91\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4119709,67\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,33\text{ N/mm}^2$

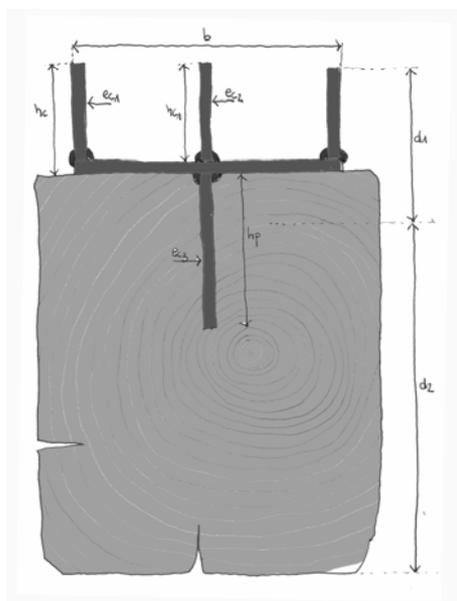
**Subvariante 3.3 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 6,67 kg/ml;  $d_1=64,53\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3457493,83\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,59\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 3.4 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 7,77 kg/ml;  $d_1=60,72\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3711988,43\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,50\text{ N/mm}^2$

Las distintas configuraciones de las chapas para mejorar la resistencia y rigidez de la pieza final vinieron obligadas por la gran variación de posibilidades existentes. Esto nos lleva a las variantes nº 4, 5 y 6 en las que incluso se trabajó con dos pletinas ensambladas dentro de la madera.



**Figura nº 4.30**

Variante nº 4

Espesor pletina inferior  $e_{c3}= 4\text{mm}$

**Subvariante 4.1 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 8,42 kg/ml;  $d_1=66,51\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4210644,61\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,28\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 4.2 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 9,99 kg/ml;  $d_1=62,37\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4525539,84\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,19\text{ N/mm}^2$

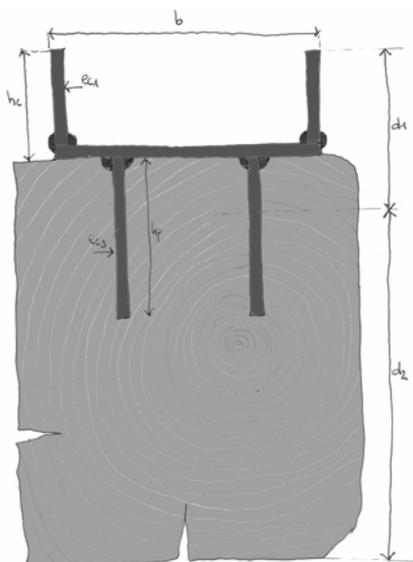
**Subvariante 4.3 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 7,52 kg/ml;  $d_1=61,15\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3721386,95\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,49\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 4.4 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 8,81 kg/ml;  $d_1=57,28\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3988395,50\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,39\text{ N/mm}^2$

En estas soluciones se comprobó cómo el aumento de peso no revertía de forma contundente en el aumento de la resistencia.



**Figura nº 4.31**

Variante nº 5  
Espesor pletina inferior  $e_{c3}= 4\text{ mm}$

**Subvariante 5.1 ( $e_{c1}=4\text{ mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 9,17 kg/ml;  $d_1=70,84\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3901620,86\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,38\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 5.2 ( $e_{c1}=5\text{ mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 10,51 kg/ml;  $d_1=67,31\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4198142,65\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,27\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 5.3 ( $e_{c1}=4\text{ mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 8,60 kg/ml;  $d_1=63,86\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3538262,37\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,55\text{ N/mm}^2$

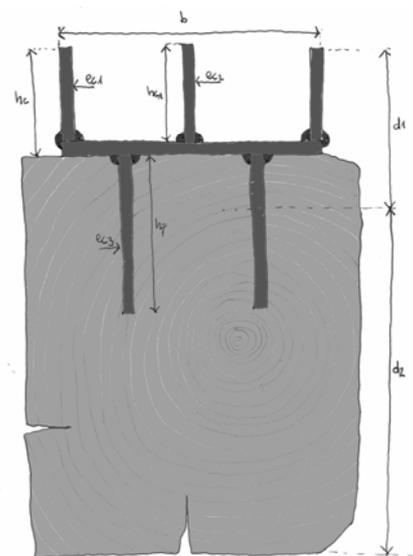
**Subvariante 5.4 ( $e_{c1}=5\text{ mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 9,72 kg/ml;  $d_1=60,62\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3788422,25\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,45\text{ N/mm}^2$

Además, significó una primera depuración de soluciones antes de entrar en la fase de cálculo por elementos finitos.

A diferencia de lo que se pueda pensar, el análisis de cálculo MEF no se planteó únicamente por razones económicas sino también por velocidad de cálculo.

Las distintas configuraciones de las chapas para mejorar la resistencia y rigidez de la pieza final vinieron obligadas por la gran variación de posibilidades existentes.



**Figura nº 4.32**

Variante nº 6  
Espesor pletina inferior  $e_{c3}= 4\text{ mm}$

**Subvariante 6.1 ( $e_{c1}=4\text{ mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 10,37 kg/ml;  $d_1=66,96\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4289667,07\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,23\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 6.2 ( $e_{c1}=5\text{ mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 11,89 kg/ml;  $d_1=63,27\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4614937,58\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,14\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 6.3 ( $e_{c1}=4\text{ mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 9,42 kg/ml;  $d_1=60,99\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3793998,26\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,44\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 6.4 ( $e_{c1}=5\text{ mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 10,71 kg/ml;  $d_1=57,62\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4066361,13\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,34\text{ N/mm}^2$

Estas soluciones para vigas antiguas, a parte de resultar excesivamente invasiva, no aporta especial ganancia de capacidad por lo que su sentido estaría, como veremos en el apartado de ensayos, en escuadrías mayores.

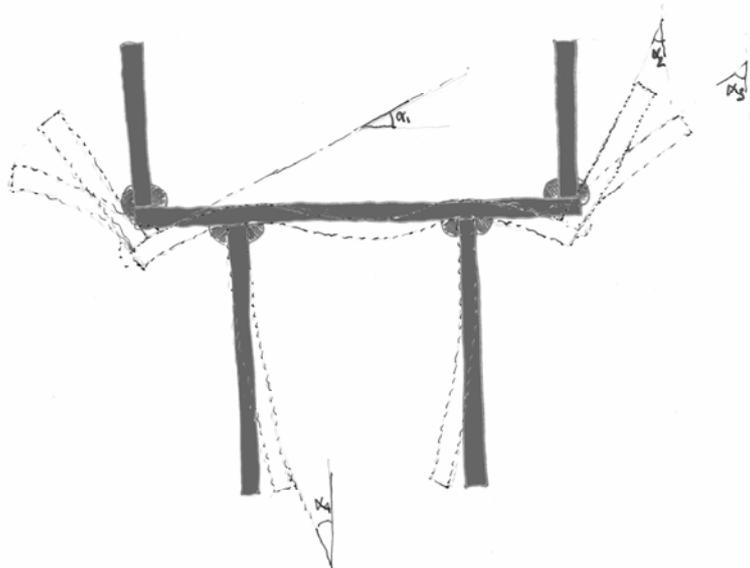
Además de la cantidad de material como variable de estudio de mínimos se analizaron las tolerancias dimensionales de la obra para la adaptación de los refuerzos en las viguetas de madera. Para esto es fundamental la conservación de la geometría post-mecanizado de las piezas metálicas.

Como es sabido el proceso de soldadura somete al acero a cambios térmicos importantes que afectan a la microestructura de constitución y por ende a la forma que adopta tras el proceso.

De esta transformación se infieren una serie de desviaciones geométricas de las chapas, siendo más ostensibles bajo espesores menores. El proceso de gradiente térmico en la chapa (Smith, 2004), que hace que los granos se encuentren sometidos a diferente tensión según a que altura de la sección de la chapa se localicen genera deformaciones importantes en las piezas de refuerzo metálico. En nuestro caso el efecto de revirado de las piezas es importante al trabajar con espesores por debajo de los 6 mm que marcan un límite físico del trabajo de las chapas de acero.

Ante este problema se fabricó un prototipo de la pieza realizado con soldadura y similar a variante nº 5 para así comprobar la incidencia del proceso de unión de las chapas (**figura nº 4.33 y 4.34**).

Se pudo comprobar que, para distinto orden en la aplicación de cordones continuos de soldadura, las deformaciones serían de hasta cuatro ángulos diferentes. Esto provocaba que, de cara al montaje de la pieza de refuerzo dentro de la madera o incluso en la misma disposición en el plano horizontal, el acoplamiento fuera imposible.

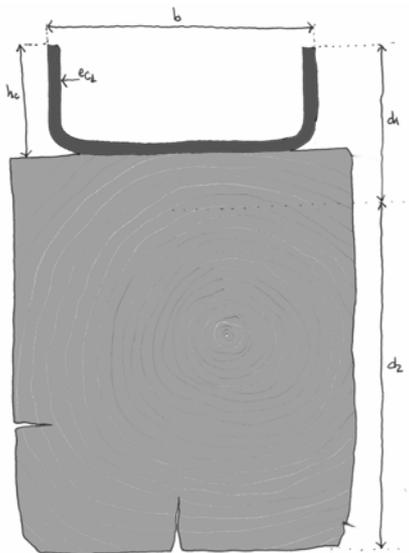
**Figura nº 4.33**

El la soldadura de las distintas chapas de acero que componen la pieza se producen deformaciones por calentamiento local del metal. La formación de ángulos diferentes en signo en función de qué orden se siga en el proceso de soldadura hace a la piezas inservibles de cara al futuro montaje.

Ante esta problemática y dado que la mano de obra de procesado de la chapa encarecería una solución de por sí incompleta, se realizó un estudio de posibles diseños industriales en los que se conservarán las características mecánicas de las piezas antes analizadas.

**Figura nº 4.34**

Prototipo de pieza fabricado para comprobar tolerancia. La separación entre las pletinas inferiores de la pieza no son las definitivas, y los cordones de soldadura son continuos provocando las deformaciones antes referidas.



**Figura nº 4.35**

Variante nº 7

Espesor pletina inferior  $e_{c3}= 4\text{mm}$

**Subvariante 7.1 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 5,16 kg/ml;  $d_1=71,96\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3722802,58\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,47\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 7.2 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 6,36 kg/ml;  $d_1=67,28\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4016019,12\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,38\text{ N/mm}^2$

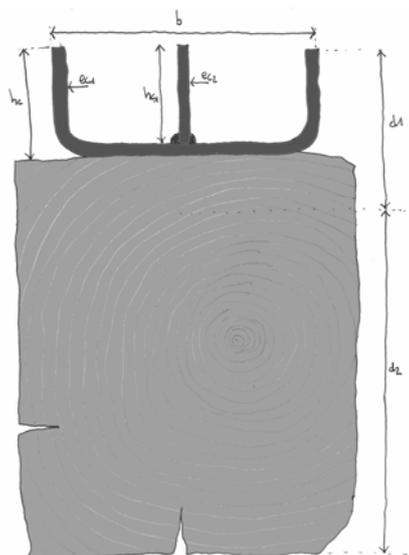
**Subvariante 7.3 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 4,53 kg/ml;  $d_1=66,33\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3340025,23\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,65\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 7.4 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 5,57 kg/ml;  $d_1=61,88\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3598641,71\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,55\text{ N/mm}^2$

Para ello se planteó la posibilidad de plegar una única chapa horizontal (figura 4.35) consiguiendo así tres de las anteriores sin una sola soldadura y con la conservación de las dimensiones y planeidad del metal.



**Figura nº 4.37**

Variante nº 8

Espesor pletina inferior  $e_{c3}= 4\text{mm}$

**Subvariante 8.1 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 5,51 kg/ml;  $d_1=66,83\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4105602,11\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,33\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 8.2 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**

Peso = 7,74 kg/ml;  $d_1=61,94\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4421077,99\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,25\text{ N/mm}^2$

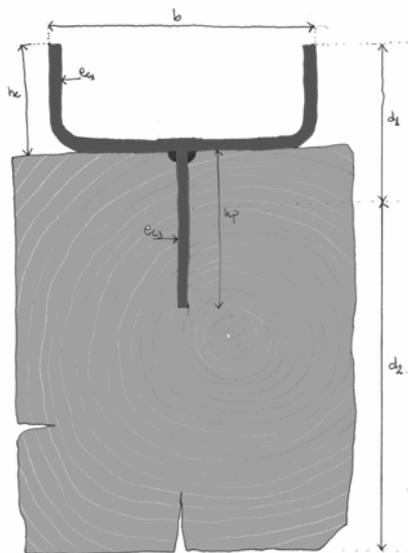
**Subvariante 8.3 ( $e_{c1}=4\text{mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 5,35 kg/ml;  $d_1=62,16\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3618547,44\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,53\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 8.4 ( $e_{c1}=5\text{mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**

Peso = 6,56 kg/ml;  $d_1=57,71\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3884198,59\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,45\text{ N/mm}^2$

En el análisis en las mismas franjas de trabajo de las variantes 7 a la 12 con sus correspondiente subvariantes comprobamos los efectos en la tensión máxima del plegado de las piezas.



**Figura nº 4.36**

Variante nº 9  
Espesor pletina inferior  $e_{c3}= 4\text{ mm}$

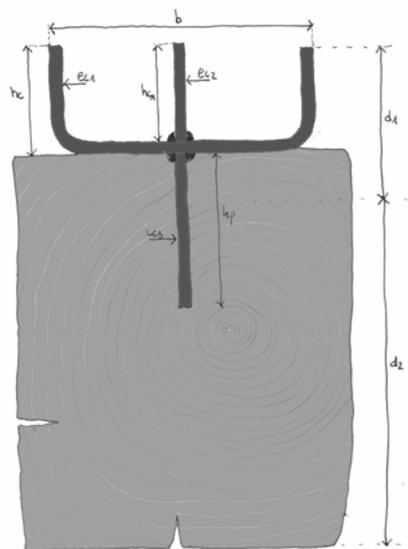
**Subvariante 9.1 ( $e_{c1}=4\text{ mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**  
Peso = 7,06 kg/ml;  $d_1=71,67\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3791220,70\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,43\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 9.2 ( $e_{c1}=5\text{ mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**  
Peso = 8,25 kg/ml;  $d_1=67,65\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4085139,65\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,33\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 9.3 ( $e_{c1}=4\text{ mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**  
Peso = 6,43 kg/ml;  $d_1=65,35\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3415345,83\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,61\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 9.4 ( $e_{c1}=5\text{ mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**  
Peso = 7,47 kg/ml;  $d_1=61,61\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3667003,74\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,51\text{ N/mm}^2$

La decisión de la altura de la pletina que queda exterior a la madera, viene dada por el espesor de la capa de compresión y por la resistencia que se desea manejar en el refuerzo.



**Figura nº 4.38**

Variante nº 10  
Espesor pletina inferior  $e_{c3}= 4\text{ mm}$

**Subvariante 10.1 ( $e_{c1}=4\text{ mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**  
Peso = 8,20 kg/ml;  $d_1=67,05\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4185887,51\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,29\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 10.2 ( $e_{c1}=5\text{ mm}$ ;  $h_c =40\text{ mm}$ )**  
Peso = 9,64 kg/ml;  $d_1=62,92\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 4501525,00\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,49\text{ N/mm}^2$

**Subvariante 10.3 ( $e_{c1}=4\text{ mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**  
Peso = 7,25 kg/ml;  $d_1=61,85\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3687125,89\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,49\text{ N/mm}^2$

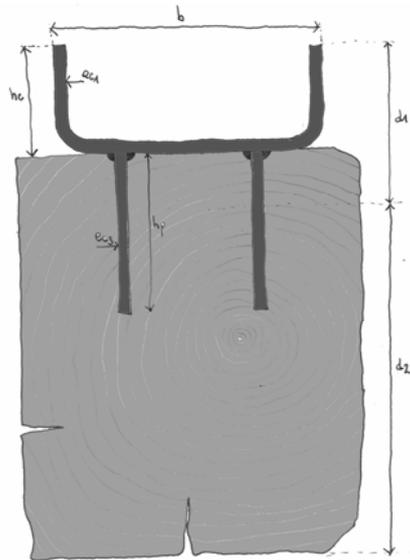
**Subvariante 10.4 ( $e_{c1}=5\text{ mm}$ ;  $h_c =30\text{ mm}$ )**  
Peso = 8,45 kg/ml;  $d_1=58,01\text{ mm}$ ;  
 $I_x= 3952905,24\text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\text{max}}= 2,40\text{ N/mm}^2$

Una vez más comprobamos que la comparativa valida la solución de plegado pero que la soldadura sigue imponiendo restricciones de uso.

Ante la posibilidad de disponer cordones de soldadura discontinuos sin que por ello peligrara la integridad de las mismas, las soluciones de trabajo fueron enfocándose hacia tres premisas básicas:

- Mínimo material de refuerzo.
- Mínimo volumen de soldaduras.

- Máxima resistencia adquirida en la pieza ensamblada.



**Figura nº 4.39**

Variante nº 11

Espesor pletina inferior  $e_{c3} = 4 \text{ mm}$

**Subvariante 7.1 ( $e_{c1} = 4 \text{ mm}$ ;  $h_c = 40 \text{ mm}$ )**

Peso = 8,96 kg/ml;  $d_1 = 71,43 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 3868149,18 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,39 \text{ N/mm}^2$

**Subvariante 7.2 ( $e_{c1} = 5 \text{ mm}$ ;  $h_c = 40 \text{ mm}$ )**

Peso = 10,15 kg/ml;  $d_1 = 67,96 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 4162681,32 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,28 \text{ N/mm}^2$

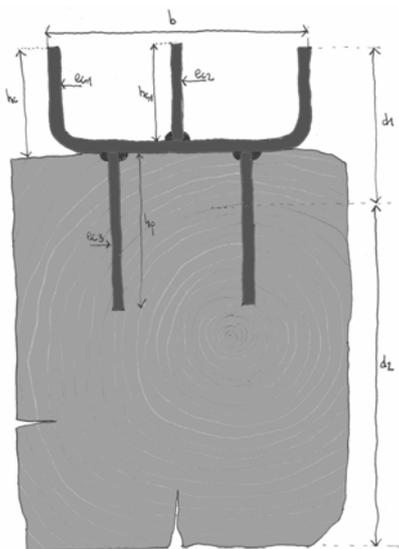
**Subvariante 7.3 ( $e_{c1} = 4 \text{ mm}$ ;  $h_c = 30 \text{ mm}$ )**

Peso = 8,32 kg/ml;  $d_1 = 64,55 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 3497855,73 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,57 \text{ N/mm}^2$

**Subvariante 7.4 ( $e_{c1} = 5 \text{ mm}$ ;  $h_c = 30 \text{ mm}$ )**

Peso = 9,36 kg/ml;  $d_1 = 61,39 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 3743891,76 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,47 \text{ N/mm}^2$

Por ello se descartaron en principio soluciones con exceso de chapas soldadas como la variante nº 12, tendiendo hacia soluciones más sencillas de fabricación.



**Figura nº 4.40**

Variante nº 12

Espesor pletina inferior  $e_{c3} = 4 \text{ mm}$

**Subvariante 12.1 ( $e_{c1} = 4 \text{ mm}$ ;  $h_c = 40 \text{ mm}$ )**

Peso = 10,09 kg/ml;  $d_1 = 67,44 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 4264124,06 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,24 \text{ N/mm}^2$

**Subvariante 12.2 ( $e_{c1} = 5 \text{ mm}$ ;  $h_c = 40 \text{ mm}$ )**

Peso = 11,53 kg/ml;  $d_1 = 63,77 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 4589155,30 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,14 \text{ N/mm}^2$

**Subvariante 12.3 ( $e_{c1} = 4 \text{ mm}$ ;  $h_c = 30 \text{ mm}$ )**

Peso = 9,15 kg/ml;  $d_1 = 61,59 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 3764190,16 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,45 \text{ N/mm}^2$

**Subvariante 12.4 ( $e_{c1} = 5 \text{ mm}$ ;  $h_c = 30 \text{ mm}$ )**

Peso = 10,35 kg/ml;  $d_1 = 58,27 \text{ mm}$ ;  
 $I_x = 4030099,57 \text{ mm}^4$ ;  $\sigma_{\max} = 2,35 \text{ N/mm}^2$

Finalmente y ante este último filtro se decidió analizar en primer lugar la subvariante 9.1 en el software de cálculo por elemento finitos.

#### 4.4.2.2. Comportamiento diferencial acero-madera.

Como antes se ha indicado, la madera es un material anisótropo. Característica que le confiere distintas propiedades según sea la dirección en la que tenga que responder ante esfuerzos de compresión, tracción etc. Esta característica, que viene directamente relacionada con la anatomía vegetal y crecimiento del árbol, hace más compleja la simulación de la estructura. Pese a ello, en el modelo matemático podemos simplificar su microestructura (Kharouf et al. 2003) ignorando las imperfecciones naturales como nudos, fendas, desviaciones de fibra, etc.

La simplificación de anisótropo a ortótropo lineal reduce a tres direcciones en el espacio las tensiones de la pieza de madera, longitudinal (L), radial (R) y tangencial (T). En el comportamiento elástico, las ecuaciones se pueden escribir en forma de matriz:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{LL} \\ \epsilon_{TT} \\ \epsilon_{RR} \\ \gamma_{TR} \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{LT} \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_L} & -\nu_{TL} & -\nu_{RL} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LT} & \frac{1}{E_T} & -\nu_{RT} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{LR} & -\nu_{TR} & \frac{1}{E_R} & 0 & 0 & 0 \\ E_L & E_T & E_R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \sigma_R \\ \tau_{TR} \\ \tau_{RL} \\ \tau_{LT} \end{Bmatrix}$$

Dónde  $E_L, E_T, E_R$ , son los respectivos módulos de elasticidad de Young en la direcciones longitudinal, tangencial y radial;  $G_{TR}, G_{RL}, G_{LT}$  corresponden a los módulos de elasticidad transversal; y  $\nu_{ij}$  corresponde con los coeficientes de Poisson ( $i, j = L, T, R$ ).

Aunque el problema se puede reducir aún más al considerar la dirección tangencial y radial como una misma, al tener valores de los coeficientes anteriores muy similares, quedando una matriz de la siguiente forma:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\nu_{21} & 0 \\ -\nu_{12} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ E_1 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau \end{Bmatrix}$$

Donde el módulo de elasticidad  $E$  tiene las dirección paralela y perpendicular a la fibra y el módulo de elasticidad transversal está en el plano de las dos direcciones anteriores al igual que el coeficiente de Poisson (Argüelles y Arriaga, 1996).

Pese a que el estudio del comportamiento plástico de la madera en el ámbito de su naturaleza anisótropa esta bastante estudiado (Hill, 1950; Gotoh, 1978), en esta tesis nos limitaremos al estudio del comportamiento elástico lineal y ortotrópico de la estructura de madera cuando se encuentra reforzada por elementos de acero.

Por tanto y admitiendo la hipótesis de Bernoulli de la deformación plana de la sección en la flexión de las piezas de madera se pueden distinguir tres fases (Figura nº 4.41).

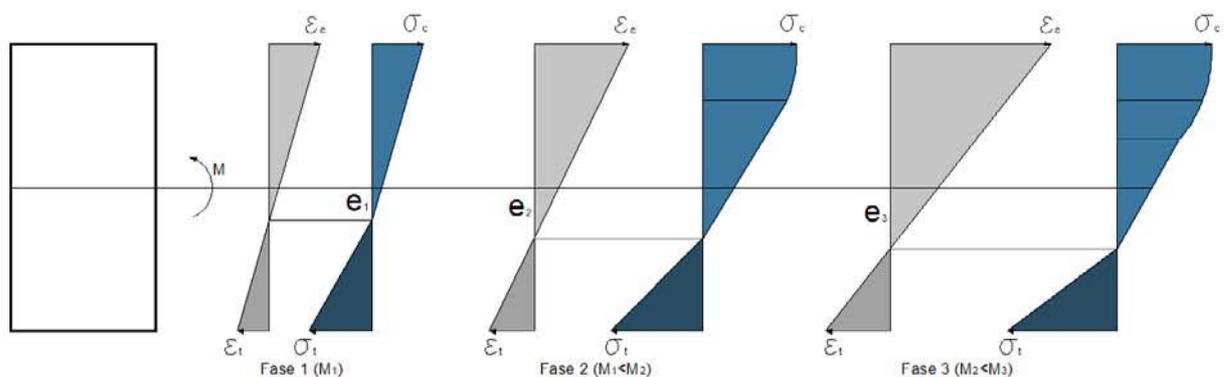


Figura nº 4.41

Figura que muestra las etapas por las que atraviesa la flexión de una viga de madera (adaptado de Argüelles y Arriaga, 1996).

Una primera fase en la que hay proporcionalidad lineal en tensiones de tracción y compresión. La excentricidad  $e_1$  (desviación de la fibra neutra) se produce por equilibrio entre los bloques de tensiones con distinto módulo de elasticidad y definida por:

$$\frac{e_1}{h} = \frac{\sqrt{E_t}}{\sqrt{E_t} + \sqrt{E_c}} - 0,50$$

donde  $e_1$  es la desviación de la fibra neutra con respecto al eje de la sección,  $h$  es el canto de la sección y  $E_t$  y  $E_c$  son los módulos de elasticidad a tracción y compresión.

La segunda fase está marcada por el umbral en la deformación y tensión del comienzo de la fase plástica en compresión. Se empieza a dibujar una curva del bloque de compresiones y equilibrio de nuevo entre ambos bloques y se marca una mayor desviación de la fibra ( $e_2$ ).

La última fase corresponde al momento en el que la tensión última del borde comprimido comienza su plastificación. La deformación y tensión de las fibras comprimidas se

independizan avanzando la primera sin aumento de la segunda y la excentricidad  $e_3$  crece aún más. La rotura se produce por fallo de las fibras traccionadas al llegar a su valor último. La rotura no es inmediata sino que se ve precedida de varios crujidos (Argüelles Bustillo, 1994) correspondientes a las roturas parciales de las fibras.

El acero sin embargo tiene un comportamiento isótropo predecible con una fase elástica claramente definida y otra plástica en unos valores de tensión bastante elevados con respecto a los de la madera.

El estudio de la conexión acero-madera es muy importante para entender el funcionamiento conjunto de ambas estructuras. El antecedente más directo de este estudio de contactos entre dos materiales podríamos encontrarlo en dos materiales hermanados por la evolución tecnológica del siglo XX, el acero y el hormigón (Martínez Calzón y Ortiz, 1950). En el funcionamiento conjunto de ambos materiales se ha desarrollado concienzudamente los modelos matemáticos de comportamiento estructural de conjunto. Al igual que en nuestro caso, existen dos elementos sobrepuestos uno al otro y conexiónados mediante uniones metálicas. Uno de los puntos de interés estaría en la deformación lateral de la unión, como consecuencia de los esfuerzos tangenciales que en el plano de contacto se producen.

Si observamos la disposición de una de las piezas de refuerzo (**Figura nº 4.42**) sobre una vigueta de madera de 130x150 mm comprobaremos como la unión metálica a base de tirafondos constituirá el elemento vital a la hora de transmitir los esfuerzo entre un material y otro.

El trabajo conjunto tiene unos rangos de eficacia óptimos. Es decir, bajo determinadas condiciones de forma y diseño de las piezas (sin olvidar el sistema de unión empleado) se producirá una colaboración efectiva entre ambos materiales.

Los parámetros que más nos pueden influir en este comportamiento son, sin duda, la diferente rigidez de los materiales empleados (Villanueva, 2000), que se deformarán diferencialmente ante la carga impuesta sobre las piezas.

Por ello, si comparamos en el ejemplo antes referido, la rigidez de la vigueta de madera, correspondiente a madera antigua, con la rigidez del refuerzo de la chapa de acero que empleamos en los ensayos tenemos los siguientes valores:

$$EI_{(\text{acero})} = 8,98 \cdot 10^{11} \text{ N mm}^4$$

$$EI_{(\text{madera})} = 2,57 \cdot 10^{11} \text{ N mm}^4$$

Donde:

$$E_{\text{acero}} = 210.000 \text{ N/mm}^2 \text{ (Módulo de elasticidad del acero).}$$

$$E_{\text{madera}} = 7000 \text{ N/mm}^2 \text{ (Módulo de elasticidad de la madera C14).}$$

$$I_{\text{acero}} = 4.274.400,55 \text{ mm}^4 \text{ (Momento de inercia respecto al eje x de la pieza de refuerzo)}$$

$$I_{\text{madera}} = 36.562.500 \text{ mm}^4 \text{ (Momento de inercia respecto al eje x de la pieza de madera)}$$

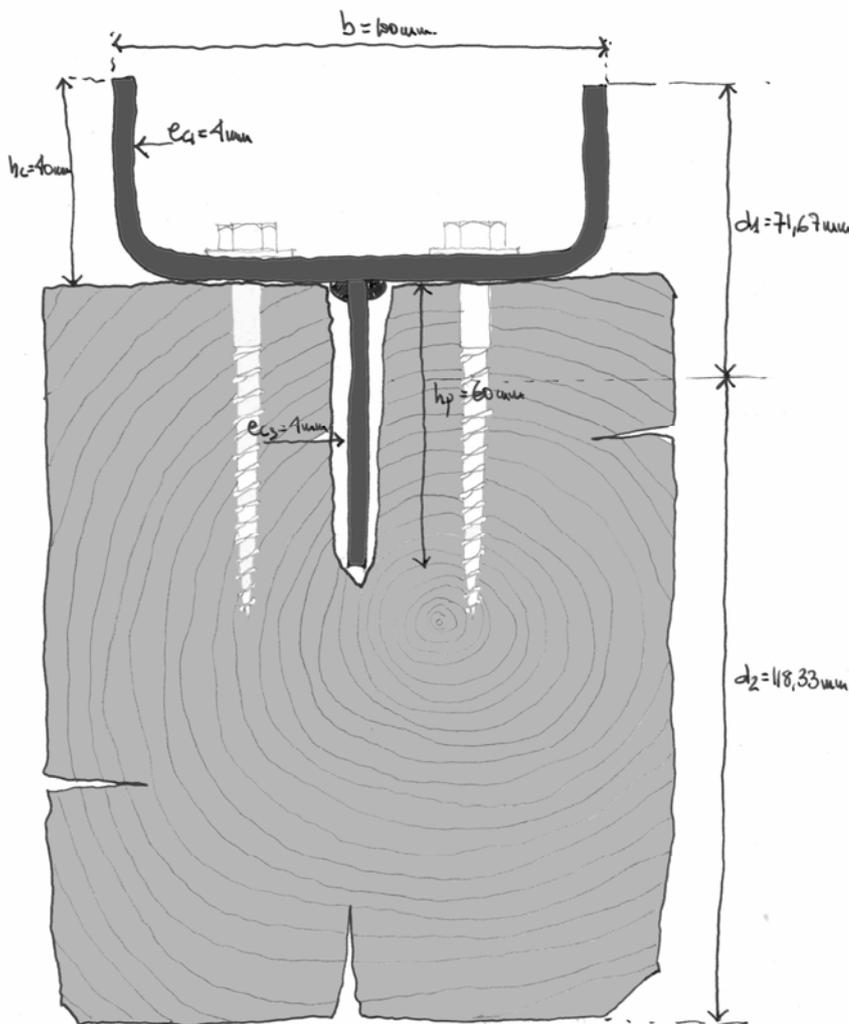


Figura nº 4.42

En esta figura podemos comprobar una pieza de refuerzo metálica ensamblada en una madera antigua de escuadría 130x150 mm, mediante tirafondos.

La holgura precisa en la madera nunca va a coincidir con el espesor de la pletina que se introduce en el interior de la madera por un condicionante de montaje como más adelante veremos.

El conjunto de pletina dentro de la madera y pletina doblada en el exterior tiene un cordón discontinuo de soldadura que funciona como conexión entre las dos chapas.

La madera tiene una rigidez del 29% con respecto al acero. El exceso de rigidez del acero se aprovecha en la estabilidad de la estructura, como comprobaremos en el análisis post-rotura de la madera.

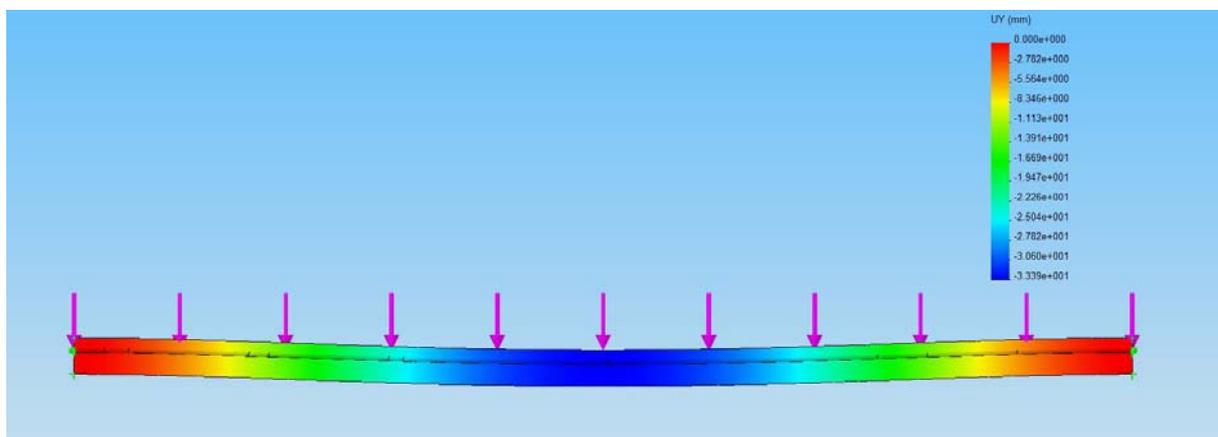
El acero debe acompañar a la madera durante el tramo elástico de ésta. Este acompañamiento, como ya dijimos más arriba, se realiza por la propia adaptabilidad de la pieza de acero y sobre todo por las uniones tipo clavija que generamos entre ambos materiales.

Si comprobamos la pieza de refuerzo metálica aisladamente (**Figura nº 4.43**), y su comportamiento en flexión (**Figura nº 4.44**), comprobaremos su comportamiento elástico. La diferencia de valores en los diagramas tensión deformación explican porque la madera rompe mientras el acero permanece en la fase elástica.

**Figura nº 4.43**

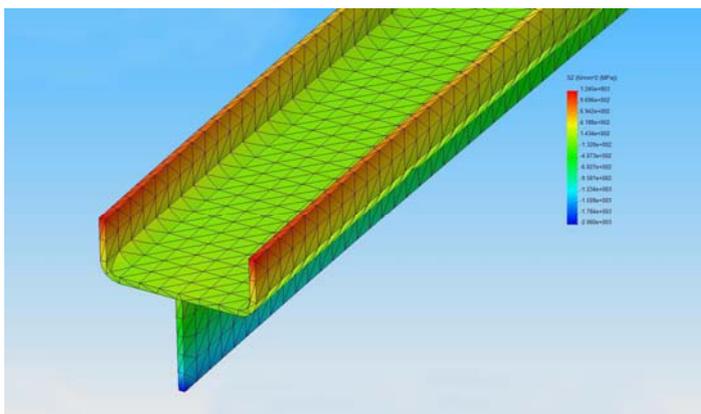
Pieza de refuerzo suma de dos placas, una de 4 mm plegada con dos partes verticales de 40 mm de altura y una inferior, de 4 mm de espesor y soldada mediante cordón discontinuo.

Esto, lejos de ser una desventaja y un desperdicio de material, confiere un coeficiente de seguridad importante al funcionar como retén de la madera, dado que ésta de colapsar, no se desplomaría.

**Figura nº 4.44**

En esta figura se puede comprobar la deformada de la pieza metálica calculada por MEF de forma aislada con la carga de rotura que se aplica a la pieza compuesta cuya media sería de aproximadamente 50 kN.

Si como veremos más adelante, el conjunto madera-acero tuvo un comportamiento a rotura de la madera de casi el doble de la que tendría la madera aisladamente, esa misma carga, sobre la pieza de refuerzo aislada, genera deformaciones y tensiones según el eje longitudinal de la pieza que nos indican la franja de trabajo mínimo de la pieza metálica.



**Figura nº 4.45**

En el mallado (discretización de la estructura) se comprueba que las tensiones que la pieza aislada sufre en la parte de máxima tracción, (color azul de la imagen) son del orden de  $2.060 \text{ N/mm}^2$  asumible con gran comodidad por parte del acero.

Al analizar el conjunto de acero-madera, nos encontramos con una sección no homogénea, en el que el módulo de elasticidad  $E$  de los dos materiales además de no ser constante para todas las fibras de la sección tiene rangos bastante distanciados. Esta falta de homogeneidad provocará saltos en el diagrama de tensiones (régimen elástico) de la pieza compuesta.

Si consideráramos el comportamiento del acero y de la madera, como si no se encontraran unidos, podríamos imaginar con bastante precisión que el deslizamiento que se produce entre las dos estructuras ante la flexión, corresponde al comportamiento de dos estructuras diferentes (**Figura nº 4.46**).



**Figura nº 4.46**

Deslizamiento entre acero (parte superior) y madera (parte inferior) cuando ambos no se encuentran unidos.

La homogeneización de la sección (**Figura nº 4.47**), necesaria en el cálculo lineal elástico, pasa por reducir el ancho de la pieza de madera, obteniéndose un ancho eficaz<sup>36</sup> de forma que se equilibran los momentos de las fuerzas interiores, es decir, para una curvatura dada, el alargamiento y contracción (Timoshenko, 1976). Esta rigidez eficaz a flexión corresponde al cálculo de la sección mixta.

El problema se reduce por tanto, al cálculo de una pieza acero a flexión y con forma de **T**. Con este cálculo obtenemos una familia de tensiones a lo largo de la altura de la sección, lo cual nos determina los rangos útiles de trabajo de la pieza compuesta.

<sup>36</sup> El ancho eficaz corresponde a  $b_1 = b (E_{madera}/E_{acero})$  donde  $b$  corresponde al ancho real de la pieza de madera.

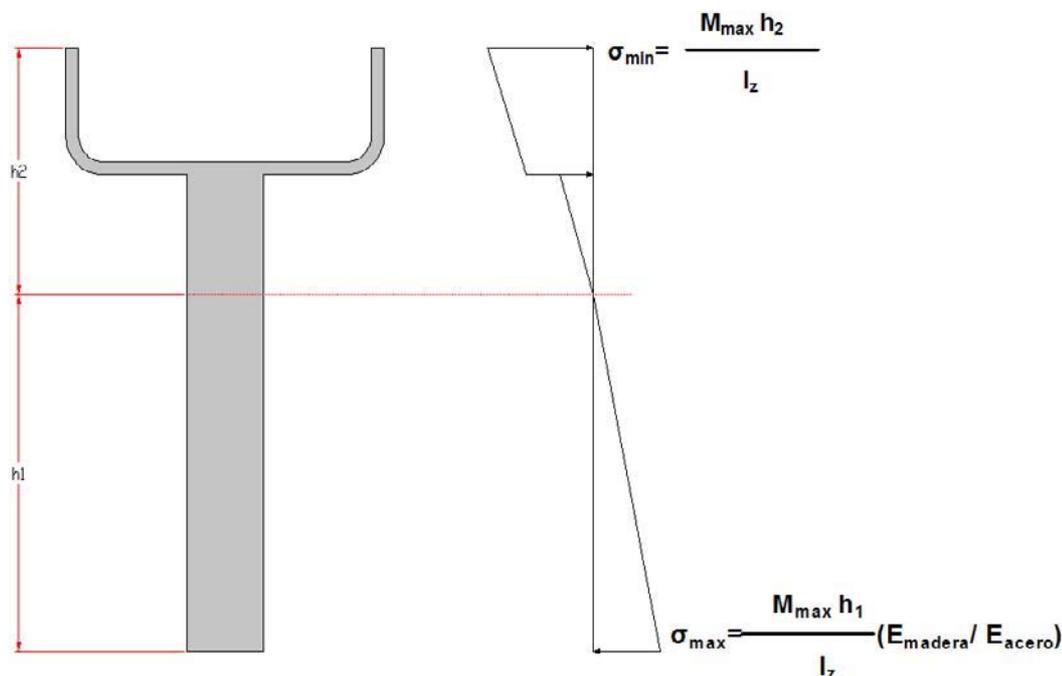


Figura nº 4.47

La sección homogeneizada se calcula teniendo en cuenta la conservación de la planeidad de las rebanadas tras la deformación y sabiendo que las deformaciones unitarias de alargamiento y contracción serán proporcionales a las distancias a la fibra neutra.

Como ya hemos indicado el contacto entre la chapa de acero y la madera es de especial interés para nuestro propósito por lo que a continuación analizaremos el cálculo de la tensión rasante y de la carga lateral que reciben los tirafondos en el sistema mixto de unión:

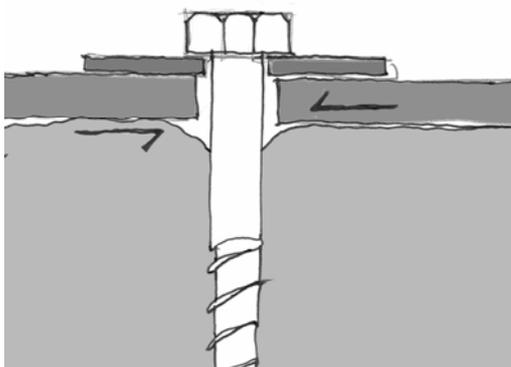
$$\tau = \frac{V \times S(y)}{I_x \times b(y)}$$

donde  $\tau$  es la tensión tangencial en  $N/mm^2$ ;  $V$  es el esfuerzo cortante en el punto considerado, en Newton y que en el apoyo sería  $Vx/2$ ;  $S(y)$  es el momento estático de la sección de acero en  $mm^3$ , respecto al eje que pasa por el centro de gravedad;  $I_x$  sería el momento de inercia de la pieza de acero y  $b(y)$  correspondería con la longitud de contacto entre la superficie de acero y la madera incluyendo el ancho de la acanaladura que se introduce dentro de la pieza leñosa.

Finalmente la carga lateral sobre los tirafondos saldría como resultado de la fórmula siguiente:

$$T = \tau \cdot b \cdot d$$

donde  $T$  es la carga lateral (**Figura nº 4.48**) sobre el tirafondos y  $d$  la distancia entre dos tirafondos consecutivos.

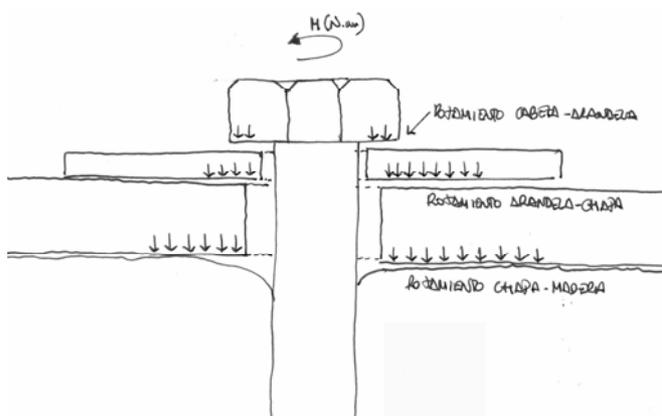


**Figura nº 4.48**

Unión entre chapa de refuerzo y pieza de madera mediante tirafondo con arandela de reparto de tensiones en cabeza.

En el estado de deformación por flexión se produce una serie de esfuerzos laterales (rasantes) materializados en el de la chapa de refuerzo que va hacia la izquierda.

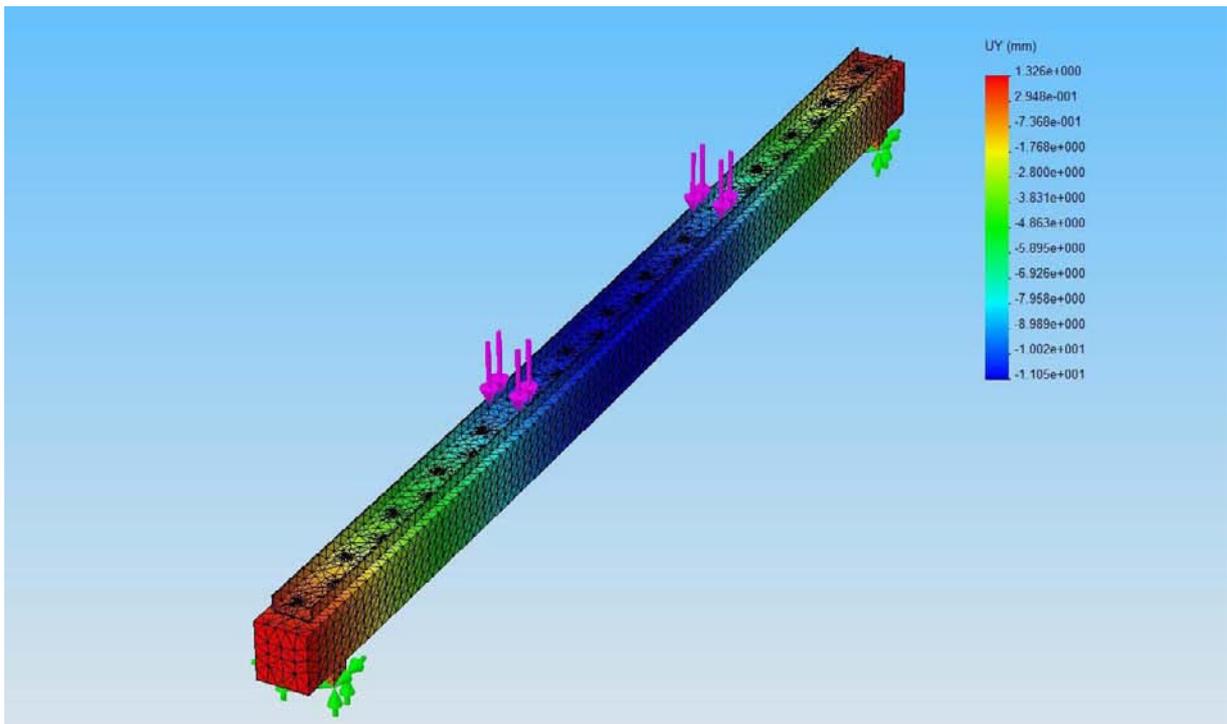
Otro aspecto muy relevante y que, como veremos en el análisis de los ensayos reviste importancia de cara a los resultado, es la incidencia del par de apriete de los tirafondos (**Figura nº 4.49**) sobre la chapa de refuerzo. Además, la carga que se transmite comprimiendo la pieza de acero contra la madera, posibilita el trabajo por rozamiento efectivo ente las distintas superficies de contacto acero-acero y acero-madera.



**Figura nº 4.49**

Presión generada por la cabeza de los tirafondos sobre arandela, chapa de acero y finalmente sobre la madera. Es importante reseñar que gracias a este par de apriete que aplica una compresión sobre el refuerzo uniéndolo a la madera será efectivo el rozamiento entre las superficies de contacto.

Dado que se validan los resultados del programa de cálculo, es interesante hacer uso de los valores del mismo, al posibilitar una aproximación muy precisa a los valores de las tensiones axiales y tangenciales de la pieza compuesta bajo flexión. Este cálculo (**Figuras nº 4.50 y nº 4.51**), al coincidir sensiblemente con el método de homogeneización antes mencionado, está además considerando contacto entre materiales y por ende rozamiento entre los mismos.

**Figura nº 4.50**

Modelo tridimensional de la pieza de madera antigua de 130x150 de escuadría reforzada mediante chapa de acero. Los valores mostrados refieren los desplazamientos verticales de la estructura con el esquema de cargas que tiene la pieza real en el ensayo EN 408.

Las simulaciones de estructuras de madera con uniones tipo clavija han dado resultados muy óptimos (Hong and Barret, 2006). La potencia de los programas informáticos actuales son de gran eficacia y permite simulaciones muy realistas del comportamiento mecánico de la estructura conjunta.

Como ya se habló en el apartado de Métodos, para esta simulación se realiza una discretización de la estructura mediante el mallado sólido de la misma a base de elementos tipo tetraedro cuyos vértices corresponden a los nodos y por ende ecuaciones lineales referidas más arriba.

La visualización del interior de la pieza mediante cortes realizados en puntos seleccionados nos permite detectar (gráficamente) el diferente comportamiento tensional del acero y de la madera.

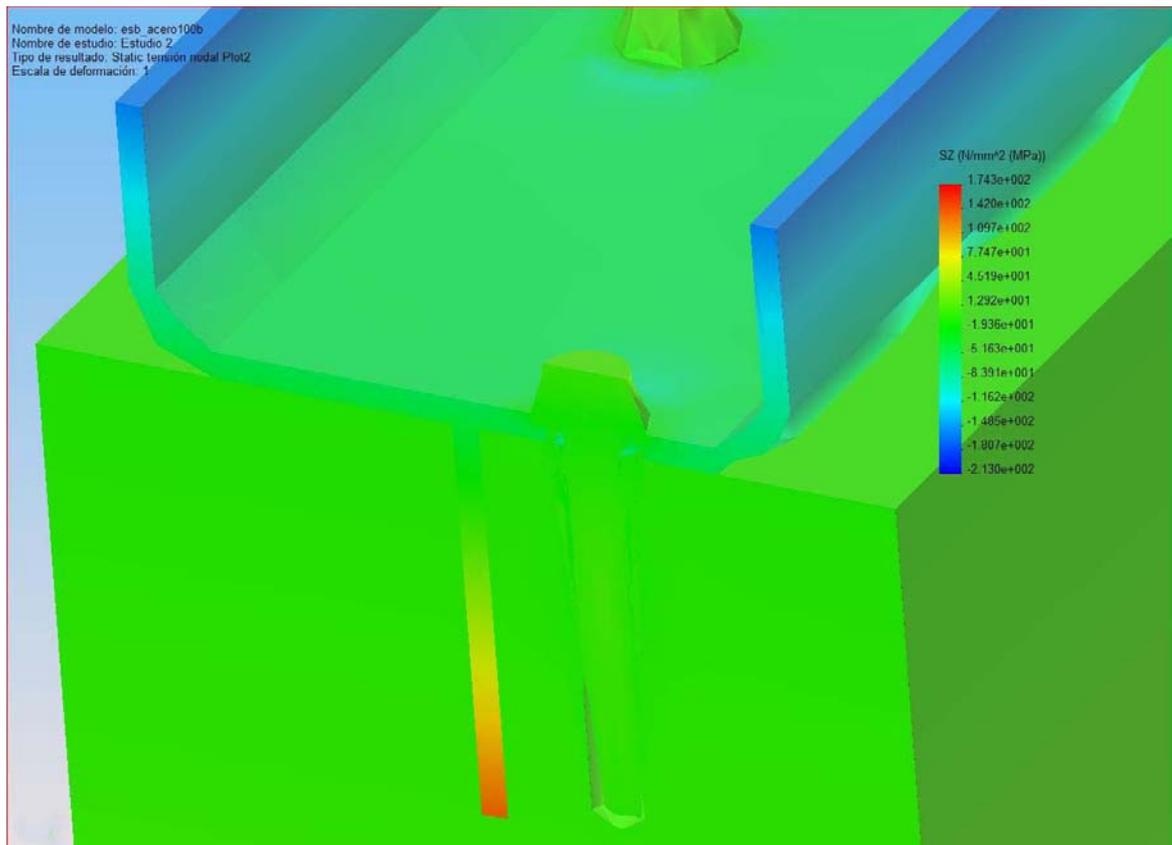


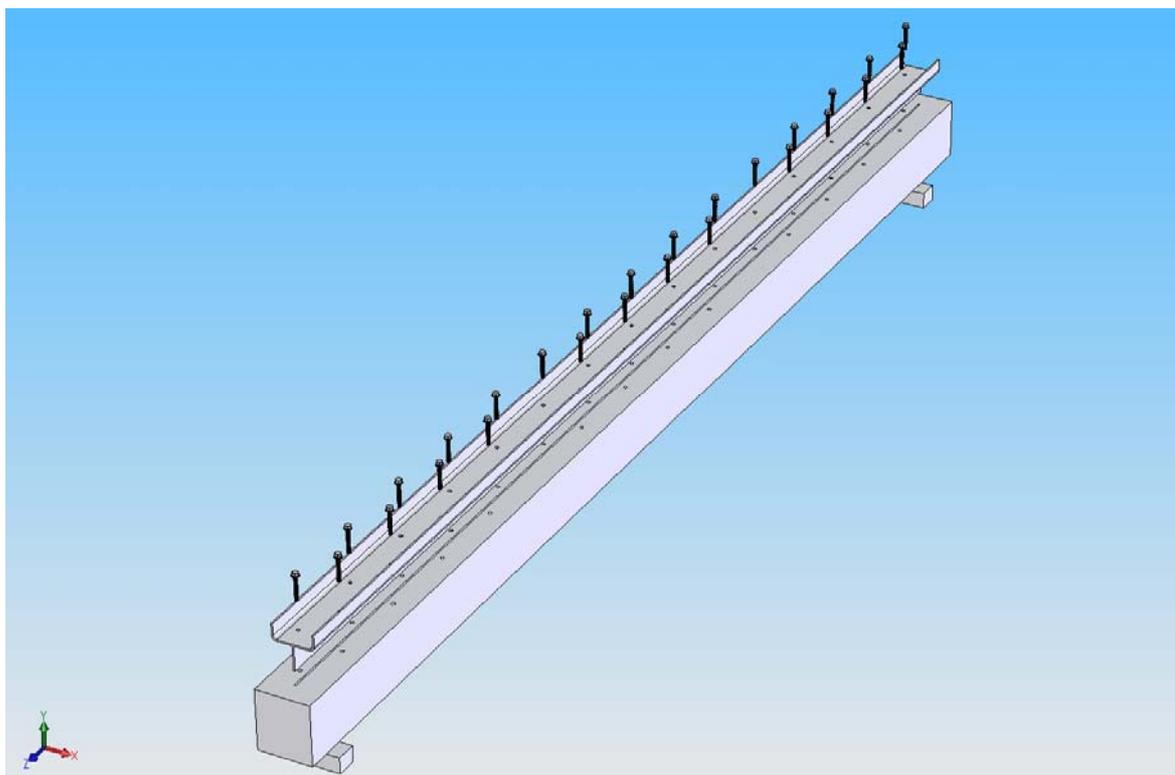
Figura nº 4.51

Corte de la pieza ampliada con los valores de tensión según eje z. Se pueden comprobar los valores cambiantes entre la madera y el acero a lo largo de sus correspondientes geometrías en todos los puntos del corte.

#### 4.4.2.3. Estudio de uniones y montaje de piezas en laboratorio.

Uno de los puntos ciertamente críticos de la eficacia constructiva de este sistema reside en la unión de elementos y su montaje físico. Dicho trabajo fue simulado en el software (**figura nº 4.52**) de cálculo para tener en cuenta el mayor número de variables posibles en cuanto a contactos entre piezas distintas de distintos materiales.

Esta fue una de las razones por las que se seleccionó, para esta fase del estudio, un software tan específico del comportamiento mecánico de piezas.

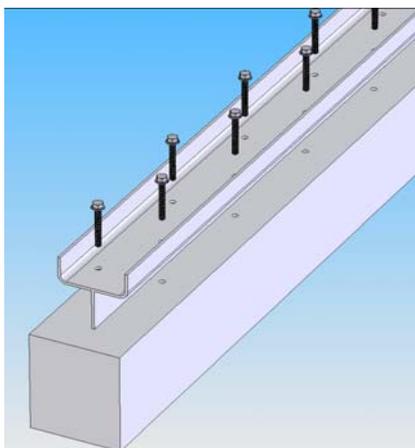


**Figura nº 4.52**

Modelo tridimensional de la superposición de elementos en el montaje del refuerzo. Tirafondos al tresbolillo, chapa de refuerzo, acanaladura vertical en la madera y finalmente vigueta de madera.

#### 4.4.2.3.1. Estudio de uniones.

El trabajo conjunto entre materiales distintos constituye un punto complejo y delicado del estudio por elementos finitos. Los programas (**Figura nº 4.53**) suelen denominar a esta parte, estudio de contactos y las variables implicadas aumentan los procesos de cálculo considerablemente.



**Figura nº 4.53**

Ampliación del montaje en el programa de cálculo. El estudio de taladros tiene en cuenta las perforaciones y los contactos entre las arandelas, la chapa y las paredes de las perforaciones con los tirafondos insertados en su interior.

En esta parte del programa se simula el comportamiento de los distintos materiales y lo que es más importante se pueden simular las interacciones entre ellos con bastante veracidad (Rahman et al., 1983). Pese a ello se simplificaron contactos entre elementos, como la unión dentada de tirafondos sobre la madera, aplicando a este caso la unión rígida de tornillo y la madera.

Un aspecto relevante del estudio consistió en el análisis del rozamiento entre distintos materiales, de metal-metal y de metal-madera. Los efectos del rozamiento entre algunas piezas se desarrollarán en el análisis post-rotura.

La disposición al tresbolillo de los tornillos en esta solución de refuerzo, está pensada para evitar la acumulación de cortantes sobre los mismos y el desgaste sobre la madera.

Además al ir rodeando la pletina superior y separando los tirafondos 100 mm entre ejes se consiguió una redistribución de tensiones más homogénea para el comportamiento a flexión de la pieza.

Se tuvieron en cuenta rozamientos de metal-metal y de metal-madera, como se explicó en el apartado de Métodos. Hemos de señalar que una de las partes que resultaron especialmente delicadas a la hora de estudiar y llevar a cabo el montaje de la pieza metálica sobre la madera fueron las acanaladuras (Figura nº 4.54 - 4.55) realizadas sobre la misma.

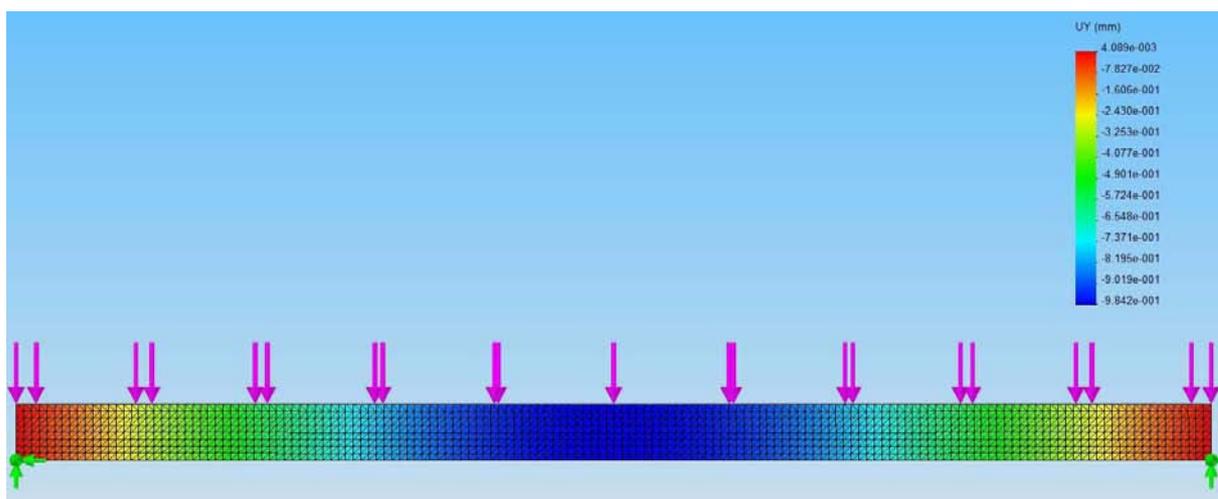


Figura nº 4.54

Alzado de viga de madera con acanaladura practicada y calculada por MEF y salida de resultados de desplazamientos verticales donde se puede comprobar la escasa flecha de la pieza.

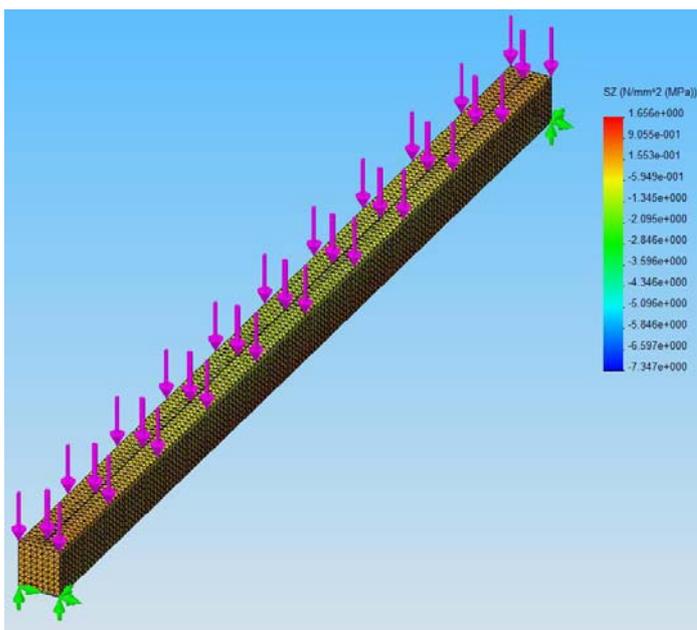


Figura n° 4.55

Estudio tensional de la pieza de madera con acanaladura practicada. La carga de trabajo se simuló en 1.500 N para comprobar la resistencia durante el montaje de las piezas de refuerzo.

Dado que una de las partes de la pieza de refuerzo tiene como misión introducirse dentro de la madera, el corte de la misma implicó el estudio (Figura n° 4.56) del comportamiento de la pieza de madera eliminando esa zona de la misma y así establecer que rango de resistencia y rigidez tendría en carga.

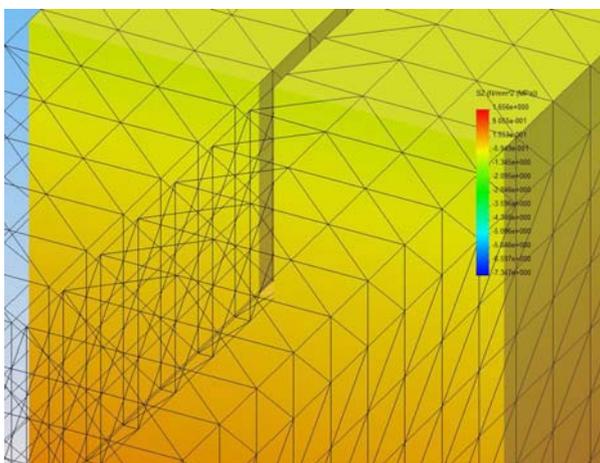
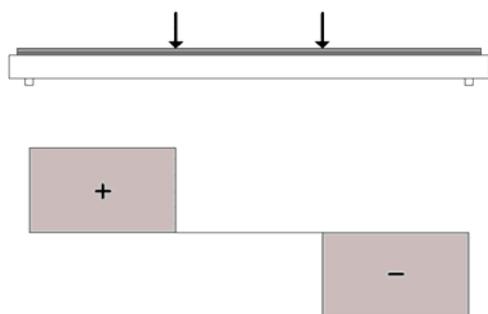


Figura n° 4.56

Estado tensional de la zona ahuecada de la madera tras realizar un corte de la pieza para comprobar el valor de las tensiones en el sentido de la fibra y ver posibles irregularidades en la distribución de las mismas.

Por otro lado se simularon distintas posibilidades y variables respecto de la unión entre refuerzo y madera por lo que a los tornillos se refiere. Concretamente lo referente a distancia de tornillo y sobre todo a número y posición de los mismos.

Para llevar a cabo dichas comprobaciones partimos del diagrama de cortante de la estructura objeto de estudio, que se muestra en la Figura n° 4.57, en donde los mayores valores se concentran en los extremos.

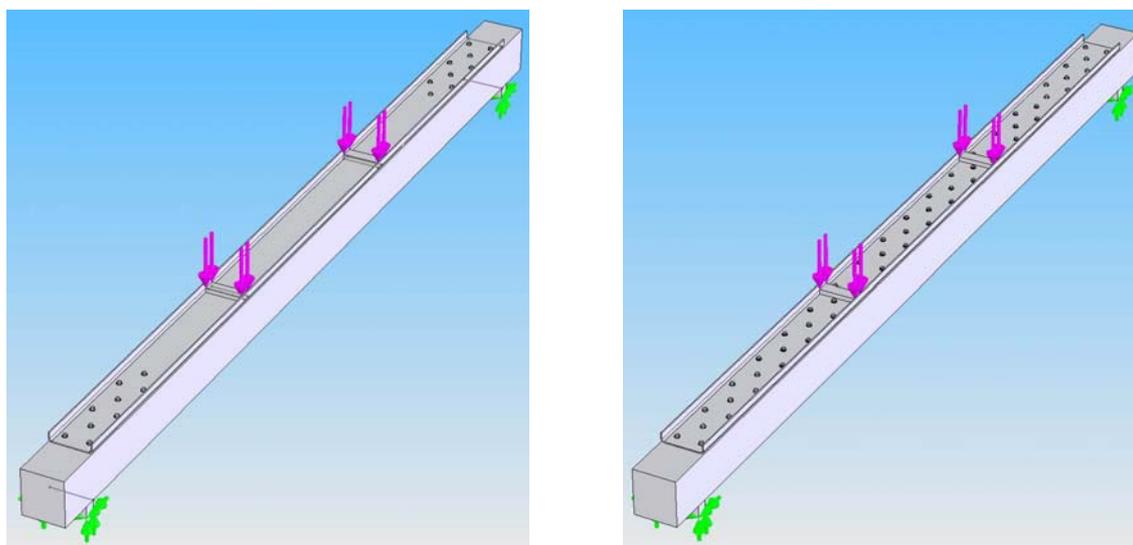


**Figura nº 4.57**

Diagrama a cortante mostrando las zonas de mayor influencia del mismo y cómo se transmite este en forma de tensión rasante a los tornillos que lo soportarán lateralmente.

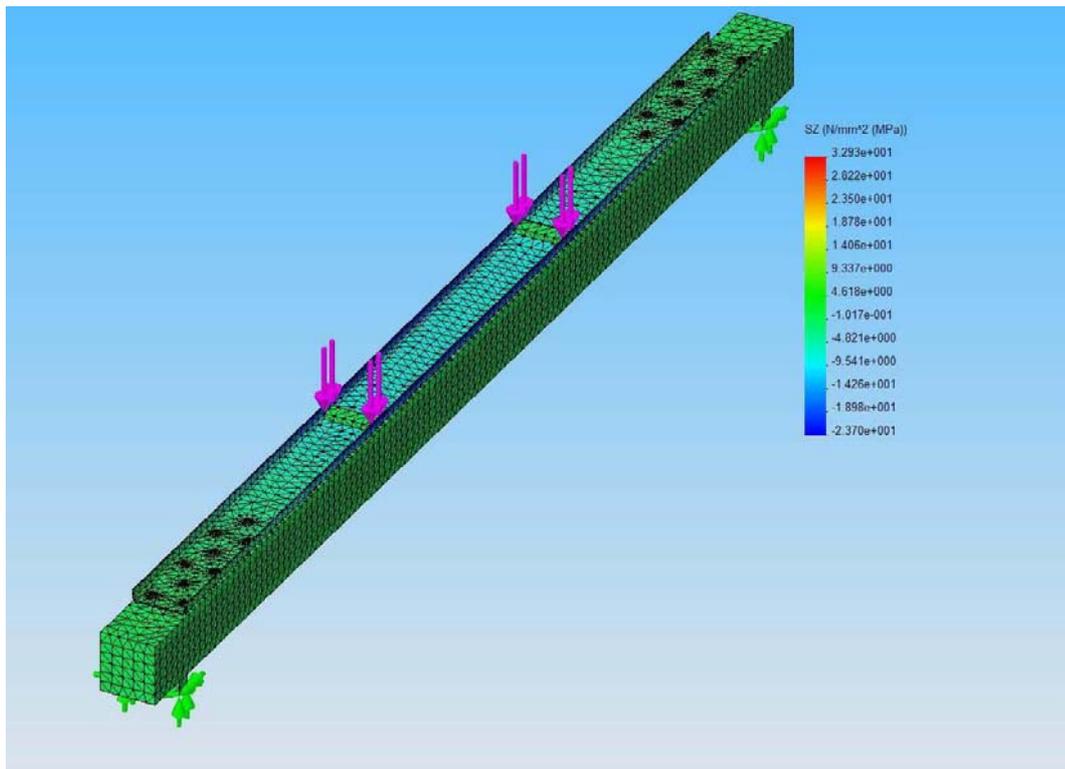
Dado que la carga lateral a que se ve sometido el tirafondo viene dado por el lugar que ocupe en el conjunto de la viga respecto del extremo y del valor a cortante que en ese punto existe, parece lógico pensar que la mayor distribución de tornillos debería localizarse en los extremos (**Figura nº 4.58**).

Las condiciones de carga así como las restricciones impuestas en esta simulación se llevan a cabo siguiendo la UNE EN 408, para así comparar con las estructuras reforzadas que finalmente se ensayaron. Se puede comprobar que, en el modelo de gran escuadría, la distribución de los tornillos se sitúa en los huecos en los que no hay pletina vertical y en esquema de tresbolillo, de forma similar a como se lleva a cabo en el refuerzo de escuadrías de madera antigua.



**Figura nº 4.58**

Esquemas de vigas reforzadas con las mismas restricciones y cargas impuestas pero con distinto número de elementos de fijación.

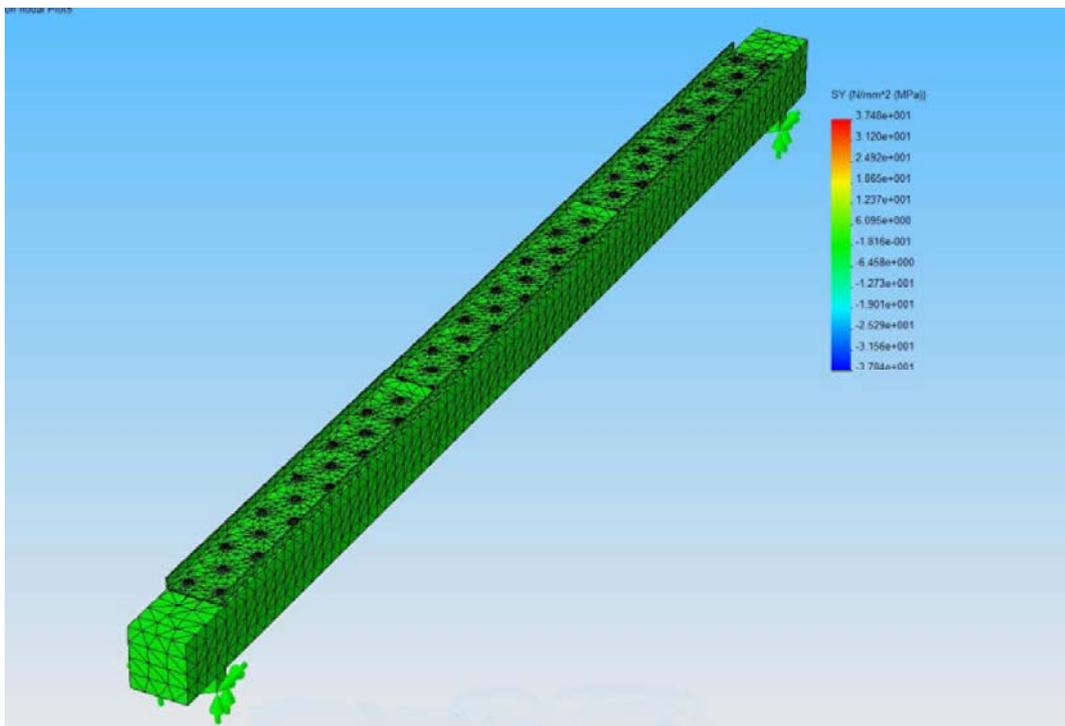


**Figura nº 4.59**

Mallado sólido tridimensional mediante tetraedros en viga de madera de gran escuadría (sierra). Los resultados corresponden a la tensión en el sentido de la fibra. Distribución de tornillos en los extremos.

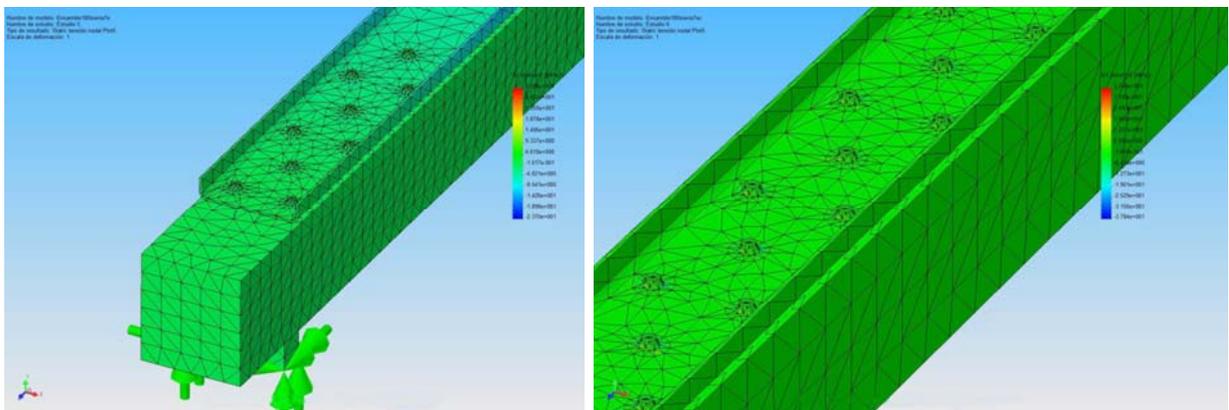
**Figura nº 4.60**

Mallado sólido tridimensional mediante tetraedros en viga de madera de gran escuadría (sierra). Los resultados corresponden a la tensión en el sentido de la fibra. Distribución de tornillos en toda la cara superior.



Si observamos las **Imágenes n° 4.59** y **n° 4.60**, en las que hay una perspectiva general de las opciones reforzadas, podremos observar que en el caso de la solución de atornillado en los extremos, la pletina vertical de los extremos del refuerzo tornada de color azulado está soportando tensiones cercanas a los  $23,7 \text{ N/mm}^2$  mientras que en caso del atornillado completo el valor en esos puntos es la mitad aproximadamente.

En el detalle del apoyo se puede advertir (**Figura n° 4.61**) como el mallado automático actúa reduciendo los valores de dimensión de elemento y por ende aumentando el valor de número de elementos para afinar en la precisión, dado que las acumulaciones de tensiones afectan más a esas zonas.

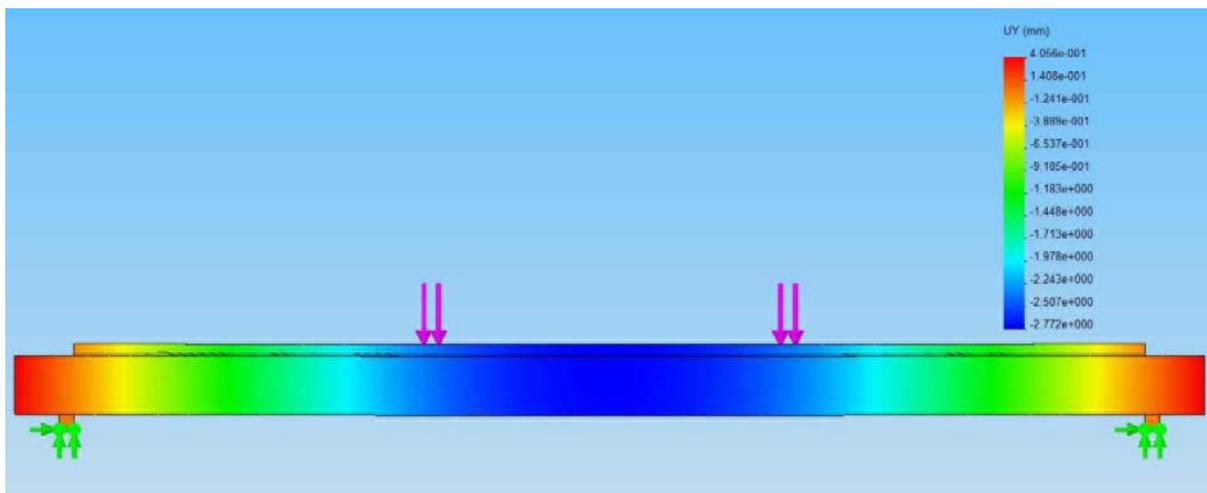


**Figura n° 4.61**

Detalle de mallado sólido tridimensional mediante tetraedros en viga de madera de gran escuadría (sierra). Los resultados corresponden a la tensión en el sentido de la fibra. Se puede comprobar en el mallado entorno a los tirafondos, como se adapta de forma automática disminuyendo el tamaño de elementos y aumentando el número de los mismos.

Otro tanto ocurre con el estudio de desplazamientos verticales. La comparativa ilustra el porqué de utilizar tornillos sólo en los extremos.

El valor de la flecha entre una opción y otra varía en  $0,01 \text{ mm}$ . En los ensayos se optó por distribución de tornillos en toda la superficie. La razón principal fue obtener la mayor unión entre acero y madera. Las desviaciones que se producen por efectos de segundo orden, no era posible mecanizarlas en el seguimiento del ensayo. Nos referimos al pandeo lateral del cordón comprimido, que como se observa en las **Figuras n° 4.62, 4.63 y n° 4.64** se llegaría a dar en las pletinas verticales de los refuerzos, cuando la distribución de tornillos se concentra en los extremos.

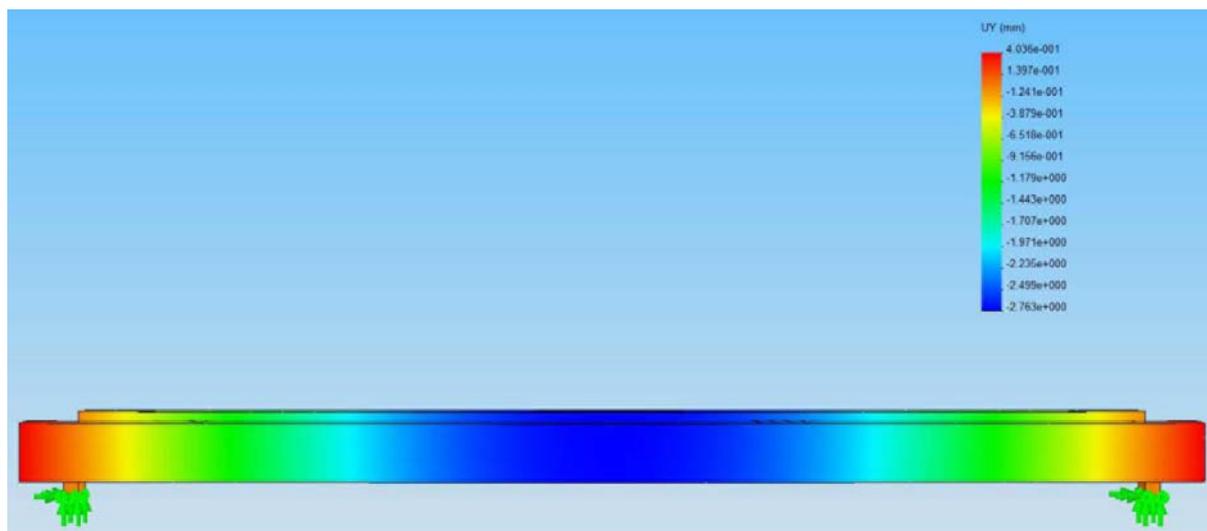


**Figura nº 4.62**

Alzado de viga de madera de gran escuadría (sierra) reforzada y tornillos distribuidos en los extremos. Valores de desplazamiento vertical en mm

**Figura nº 4.63**

Alzado de viga de madera de gran escuadría (sierra) reforzada y tornillos distribuidos en toda la cara superior. Valores de desplazamiento vertical en mm



Aún así, se produjo este efecto, como veremos en el análisis post-rotura, en varias ocasiones. Sobre todo se produjo en los ensayos de prótesis, al plastificar el acero en la zona de concentración de tensiones.

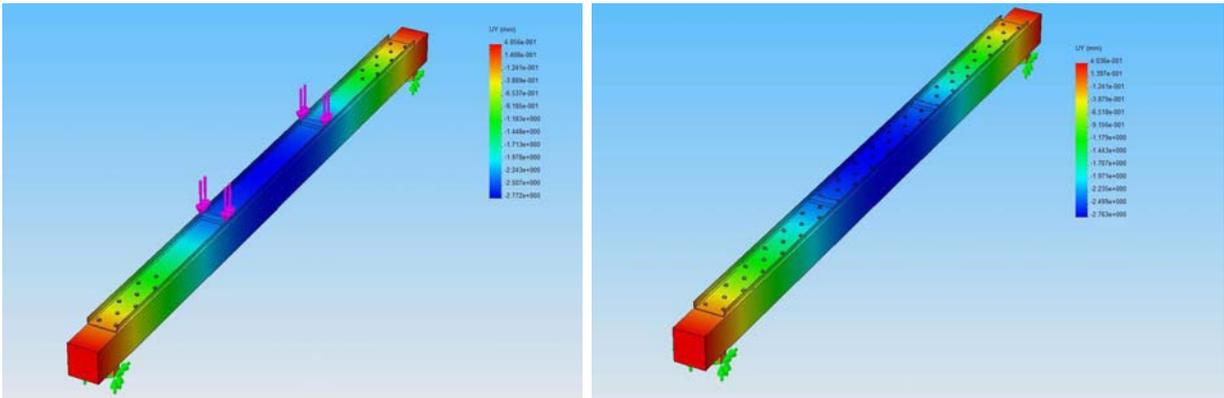


Figura nº 4.64

Comparativa de los desplazamientos verticales en las dos opciones de distribución de tornillos.

#### 4.4.2.3.2. Montaje en laboratorio.

De esta forma (Figura nº 4.65) se simularía un hipotético montaje de la pieza sobre la estructura de madera con la acanaladura realizada *in-situ*.

En esta fase del estudio fue importante determinar la acumulación de tensiones que se produciría en la fase de montaje en obra sobre las piezas de madera.

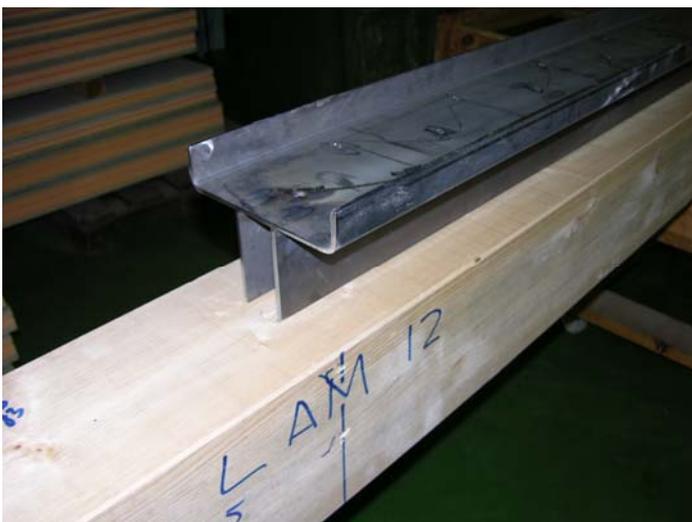


Figura nº 4.65

Refuerzo metálico sobre viga laminada.

El replanteo de la pieza de acero sobre la madera ayudó a marcar las zonas que posteriormente se calarían para generar las acanaladuras en la madera.

Las dimensiones de la acanaladura se hicieron proporcionales al espesor de la pletina (Figura nº 4.66) que se introduciría en el interior, previa limpieza de la zona con chorro de aire (Figura nº 4.67).



**Figura nº 4.66**

Corte de madera para practicar acanaladura mediante disco de 90 mm de penetración en perpendicular al corte.

Posteriormente se comprobó en laboratorio lo alejado de la realidad de esta suposición lo cual obligó a recalcular con nuevos anchos de acanaladura las secciones previamente al ensayo.



**Figura nº 4.67**

Sistema de limpieza de acanaladura practicada en la madera mediante chorro de aire.

Todo esto se vio agravado por la dificultad de montaje que las piezas tenían sobre la madera cuando en vez de una pletina embebida poseían dos pletinas dentro de la madera.

Esto sucede en los modelos que se ensayaron en las piezas de gran escuadría y además provocó cambios durante la fase de montaje en laboratorio, al plantearse la dificultad que tendría la implantación bajo condiciones más adversas como son la de la obra.

El corte con disco, tenía las siguientes limitaciones. Por una parte la profundidad de la pletina en las piezas de gran escuadría que se limitaba a 90 mm La portabilidad de estas cortadoras limitadas por tamaño y seguridad. Además se huyó del empleo de mano de obra especializada.

Los espesores de 2 mm del disco de corte obligan al montador a dar varias pasadas hasta conseguir holgura suficiente para la inducción de la pletina. Además se hace preciso el uso de un formón para eliminar y desbastar el interior de la acanaladura por las laminillas que en ella se alojan y que dificultarían el montaje y ensamble del acero.

Los espesores de trabajo de la acanaladura subieron por tanto de 4 mm hasta 6 mm Este espesor era complicado de obtener con la ayuda únicamente de disco de corte.

Finalmente se estudió la posibilidad de iniciar el corte con disco para que sirviera a modo de guía y delimitarlo finalmente con una motosierra (**Figura nº 4.68 y nº 4.69**) de pequeñas dimensiones.



**Figura nº 4.68**

Corte de piezas de gran escuadría con motosierra.

Obsérvese el ángulo de trabajo que en todo momento posibilita mediante marcado de la hoja, fijar la profundidad de corte.

Mediante un sencillo sistema de marca en la hoja de la sierra se fijaba la profundidad de corte además de crear, con muy pocas pasadas, la holgura de trabajo necesaria. La

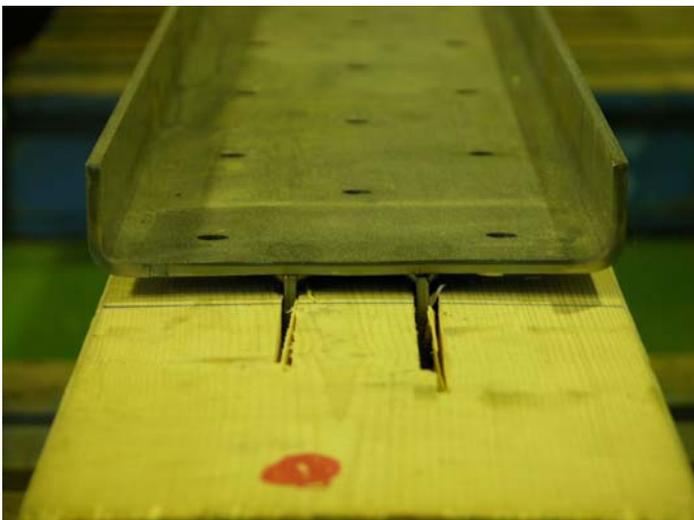
portabilidad de esta herramienta era muy factible de cara a la obra por lo que el sistema de corte se consolidó al realizarse en las 30 piezas de madera que se reforzaron.



**Figura nº 4.69**

Sistema de corte mediante motosierra realizado en el suelo y simulando condiciones de obra.

El sistema de corte con disco provocaba además un efecto de afilado de la acanaladura como se puede comprobar en la **Figura nº 4.70**, dado que el disco deja una zona sin cortar debido a su geometría.



**Figura nº 4.70**

Refuerzo de acero sobre gran escuadría de madera laminada encolada. Puede comprobarse que la acanaladura se prolonga una vez acabada la pieza de metal debido al sistema de corte con disco.

Esto plantearía una modificación posterior del refuerzo para su aplicación en los ensayos de campo, de forma que la pletina inferior se afile para recoger la forma creada por el disco al cortar la madera (**Figura nº 4.71**).

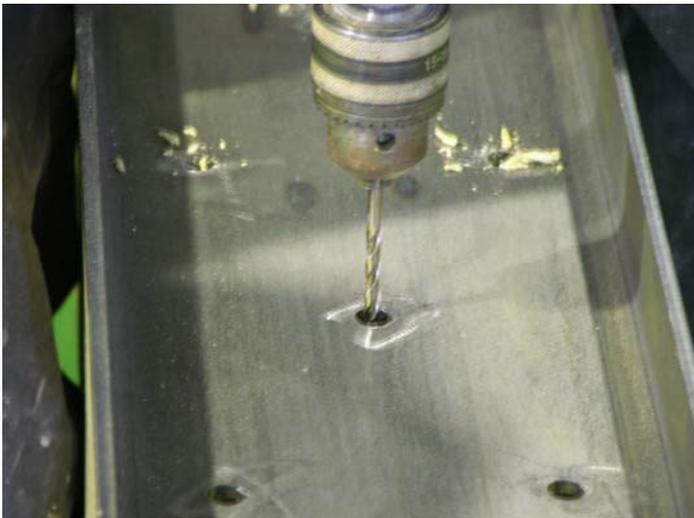
**Figura nº 4.71**

Afilado del refuerzo metálico para acomodarse a la forma dejada en el interior de la madera por el corte del disco.



Esta modificación no afectó a los cálculos ni a los resultados por lo que las piezas ensayadas no poseen este cambio. Además de cara a la obra, esa prolongación serviría de entrega en los muros laterales. Además se comprobó que la introducción del acero en la madera se producía con suavidad sin más que utilizar un pequeño martillo de goma para no provocar excesiva vibración ni cargas dinámicas durante el montaje.

Posteriormente y como culminación del montaje se encuentra el atornillado de los tirafondos sobre la pieza y la madera para su completa unión. En el proceso se siguieron las directrices del EC5<sup>37</sup> en el apartado de uniones tipo clavija. En ella se obliga al pretaladro (**Figura nº 4.72**) de la madera cuando los diámetros de los tirafondos igualan o superan los 6 mm como es el caso de los tirafondos empleados.

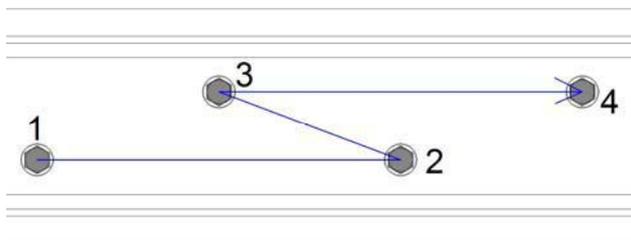
**Figura nº 4.72**

Pretaladro practicado en la madera previo a la fijación definitiva de los tirafondos sobre la madera.

El orden seguido en el par de apriete también fue una de las variables estudiadas durante el montaje (**Figura nº 4.73 y nº 4.74**). Se procuró que la entrada en carga de la madera en

<sup>37</sup> Real Decreto 314/2006. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. Madera. Art. 8.3.6 Tirafondos.

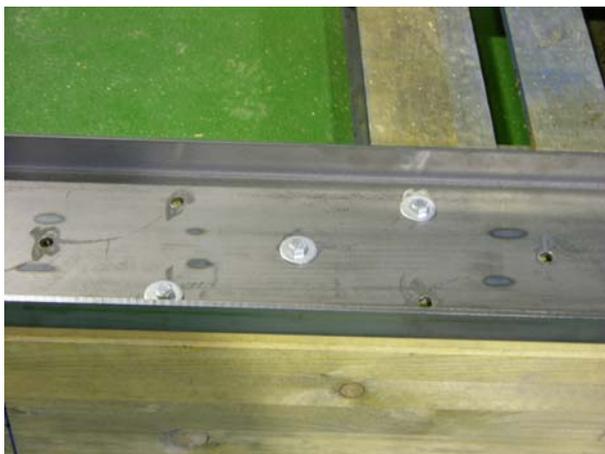
fase inicial se realizara de forma gradual. Por ello se siguió un orden en zig-zag característico del par que se aplica a los tornillos en otros ámbitos.



**Figura nº 4.73**

Configuración del sistema de montaje de tornillos al tresbolillo y atornillados de forma gradual para ir asumiendo las tensiones de la madera sin sobrecarga de la cabeza de los tirafondos y por tanto la rotura de los mismos.

La dureza de la madera influye decisivamente sobre las últimas vueltas del tirafondos al poderse producir la rotura del mismo en su rozamiento con la arandela. Por ello, las vueltas de carga final y apriete fueron manuales (**Figura nº 4.75**) para evitar dicha rotura.



**Figura nº 4.74**

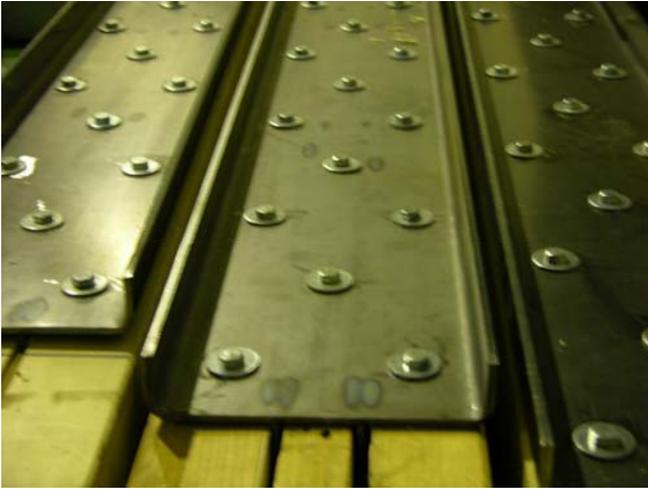
Refuerzo de gran escuadría con sistema alternado de fijación de trasfondos para repartir tensiones entre el tornillo y la madera.

A pesar de esto se produjo la rotura de algunos tirafondos, hecho que se repetiría en los ensayos de campo.



**Figura nº 4.75**

Par de apriete aplicado manualmente para evitar rotura de la caña de los tirafondos por sobre esfuerzo de torsión.

**Figura nº 4.76**

Refuerzos de gran escuadría atornillados sobre sus respectivas piezas de madera.

Se comprobó, en los ensayos de campo, la importancia del atornillado suave y gradual de los tirafondos. Este efecto de entrada gradual de las tensiones al recoger el tornillo poco a poco a la madera se desarrollará en el apartado de Análisis de resultados, ya que está relacionado con la recuperación de la deformación que se infiere en piezas que se encuentran flechadas en obra y que para el acople de su geometría con la del acero el tornillo hace un efecto de acercamiento de la madera hacia el acero.

**Figura nº 4.77**

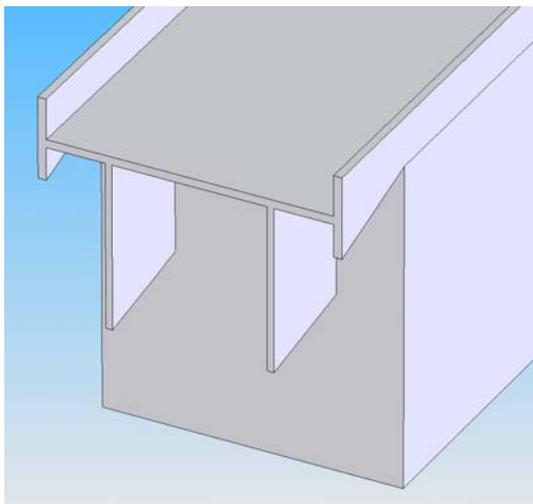
Refuerzo metálico sobre viga antigua. Se puede comprobar que el corte posee una profundidad (60 mm) proporcional al tamaño del refuerzo sobre la vigueta de madera en contraposición con los 90 mm de los refuerzo de gran escuadría.

#### 4.5. APLICACIÓN DE PRÓTESIS METÁLICAS EN PIEZAS DE MADERA SOMETIDAS A FLEXIÓN Y ATACADAS POR PUDRICIÓN EN EL APOYO.

Es tal el número de casos en el que este tipo de proceso patológico se repite en los edificios de forjados de madera que se planteó una solución de prótesis, a la luz de los estudios realizados con el refuerzo metálico y aprovechando su geometría.

##### 4.5.1. Parámetros de diseño, adaptación constructiva y comportamiento mecánico de la prótesis.

Este caso es un ejemplo claro de geometría heredada (**Figura nº 4.78**). Partimos de las secciones analizadas en el refuerzo de las viguetas. Al aproximarnos a un hipotético ataque de pudrición de viguetas en cabeza, simulamos éste cercenando 1 metro de pieza de madera y posteriormente estudiamos como se podría completar la pieza metálica.



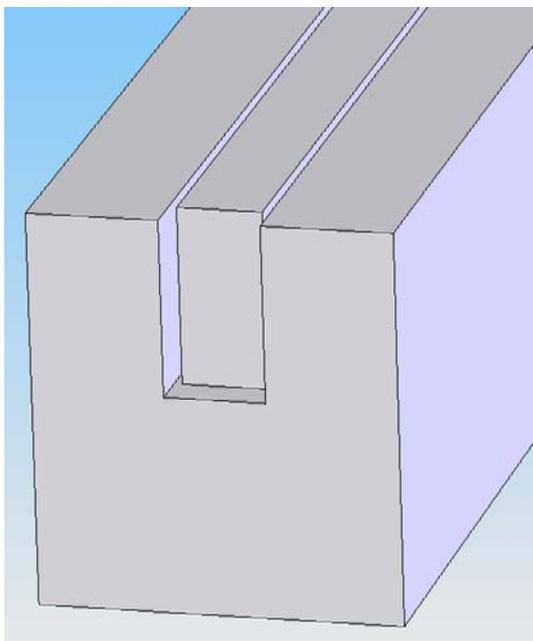
**Figura nº 4.78**

Una de las primeras geometrías que se analizaron para resolver la prótesis de la vigueta atacada por hongos de pudrición en la cabeza.

El riesgo obvio que tiene este proceso patológico es la ausencia estabilidad del forjado y por ello, su posible desplome. Cuando se produce un ataque de este tipo como ya hemos analizado en el capítulo correspondiente, se produce un descuelgue no sólo de una vigueta sino de dos o tres, dado que el ataque suele darse en varias pieza. El apuntalado suele venir obligado, para evitar la caída de esa zona del forjado que queda en el aire, sujeta generalmente por la socarrena.

Lógicamente el proceso pasa por eliminar o mejor dicho obviar la sección atacada que no cuenta con capacidad mecánica residual alguna. El punto delicado será el lugar de corte o

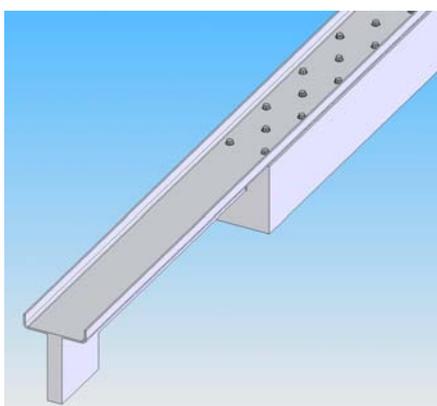
de comienzo de la prótesis que, de alguna manera, debe cajearse en la estructura leñosa sana (**Figura nº 4.79**).

**Figura nº 4.79**

Acanaladuras practicadas en la madera atacada por hongos una vez salvada la parte degradada. En este punto se materializa la unión entre la prótesis metálica y la madera sana a través de una conexión en caja.

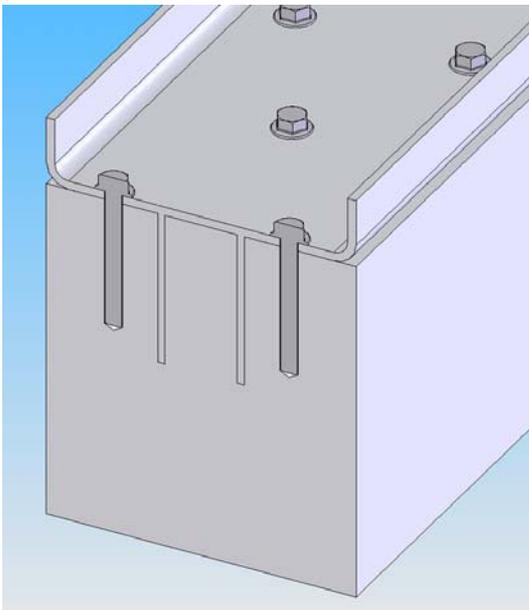
En el tramo de prótesis libre de madera el comportamiento de la estructura depende fundamentalmente de la sección de acero (**Figura 4.80**).

Con este sistema se siguen cumpliendo las premisas originales de no invasión de los laterales del forjado. Dado que el acero posee unas propiedades inmejorables para resolver estos esfuerzos, se pensó que la prótesis conservara la forma del refuerzo en la zona empotrada en la madera sana. En la zona de acero libre, la sección cuenta con un sub-refuerzo inferior convenientemente soldado y en forma de tubo hueco estructural (**Figura nº 4.81**).

**Figura nº 4.80**

Aspecto de la prótesis simulada en el programa de elementos finitos.

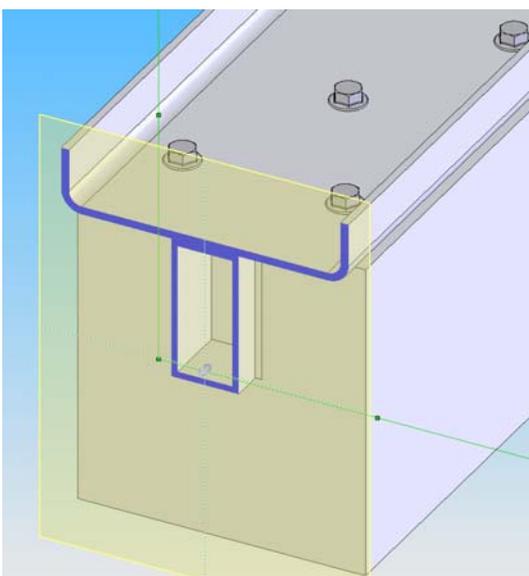
Realizando cortes verticales sucesivos en la prótesis para poder visualizar su geometría podemos comprobar la forma y disposición del acero por la parte superior e inferior (**Figura nº 4.81 y nº 4.82**).



**Figura nº 4.81**

Geometría de la prótesis en la zona de madera sana. Se puede comprobar que es el mismo tipo que el refuerzo visto más arriba.

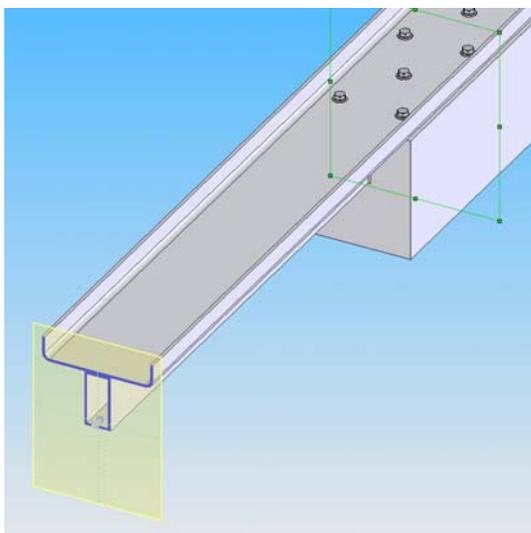
En la parte superior se reproduce la misma estructura de chapa de acero plegada. Por la parte inferior se regresa el espesor en la zona de adhesión del tubo estructural al producirse una unión por soldadura de la chapa plegada (superior) con un tubo hueco.



**Figura nº 4.82**

Tramo de prótesis seccionado para comprobar la geometría en la zona libre de madera.

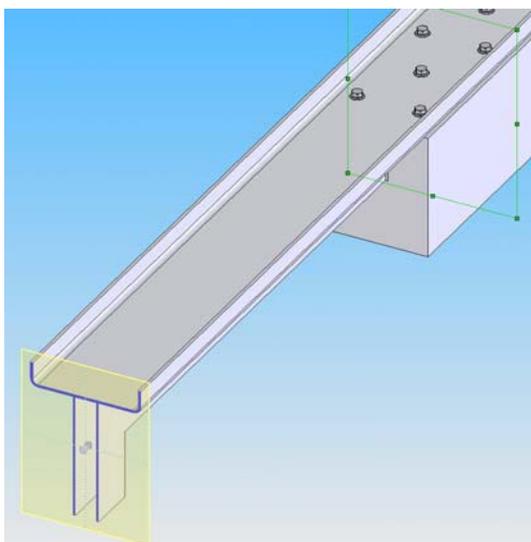
El tubo, en este caso de prótesis de gran escuadría, de 60.40.4 (**Figura nº 4.83**) para así conservar los espesores de trabajo de la zona embutida de acero dentro de la madera que como recordamos era constante de espesor.



**Figura nº 4.83**

Corte vertical próximo al apoyo donde se puede comprobar como la geometría de la pieza es constante durante su tramo libre de madera.

Esta geometría se conservará (**Figura nº 4.84**) ya hasta el apoyo donde se aumenta la altura del tubo adosado a la vez que se gira su geometría para salvar la distancia entre los dos planos. El plano del tubo horizontal y el del apoyo del ensayo UNE EN 408.



**Figura nº 4.84**

Corte vertical de la prótesis mostrando la zona del apoyo y cómo crece la pieza de acero para adaptarse a los niveles del ensayo EN 408.

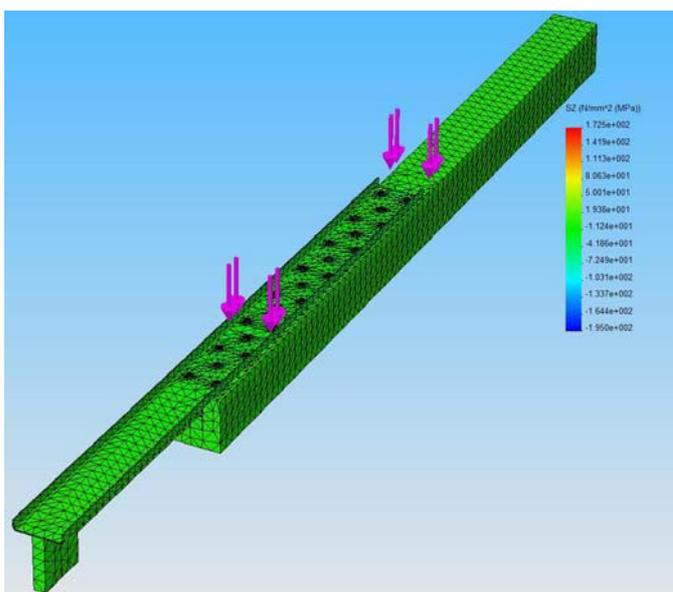
Ya en el apoyo se trata de entregar la prótesis en muro de carga o en jácena de madera y la solución de cotas variaría con el caso concreto. Por lo tanto, podría en la realidad (que no en laboratorio) no ser necesario el apoyo recrecido que se observa en las imágenes y que finalmente se ensayó.

Por último pero no menos importante, comentar que, para los ensayos de las piezas tanto las simulaciones como las realizadas en laboratorio, la unión entre el tubo estructural y las pletinas de la estructura de refuerzo que quedan a modo de empotramiento se realizó por solape y soldadura continua. En el caso de la prótesis para gran escuadría, las paredes del tubo estructural se continúan en dos pletinas de acero.

El punto de unión de dos geometrías diferentes de acero, se convierte en un punto delicado y que será reformulado posteriormente después del análisis de resultados.

Finalmente y antes de entrar en el comportamiento de la prótesis bajo las acciones de carga estática del ensayo EN 408, comentar brevemente que en el caso de prótesis se ensayaron distintas longitudes de empotramiento en la madera sana, optándose por la longitud de 1.500 mm para garantizar una unión solidaria entre elementos.

El estudio tensional de esta estructura arrojó resultados interesantes (**Figura nº 4.85**), lo suficiente como plantearse que la solución de prótesis podría llegar a funcionar en condiciones de servicio de forma razonablemente buena si lo lleváramos a ensayo. Pese a ello y como se puede comprobar lo valores de trabajo son sensiblemente más bajos que en el caso del refuerzo.



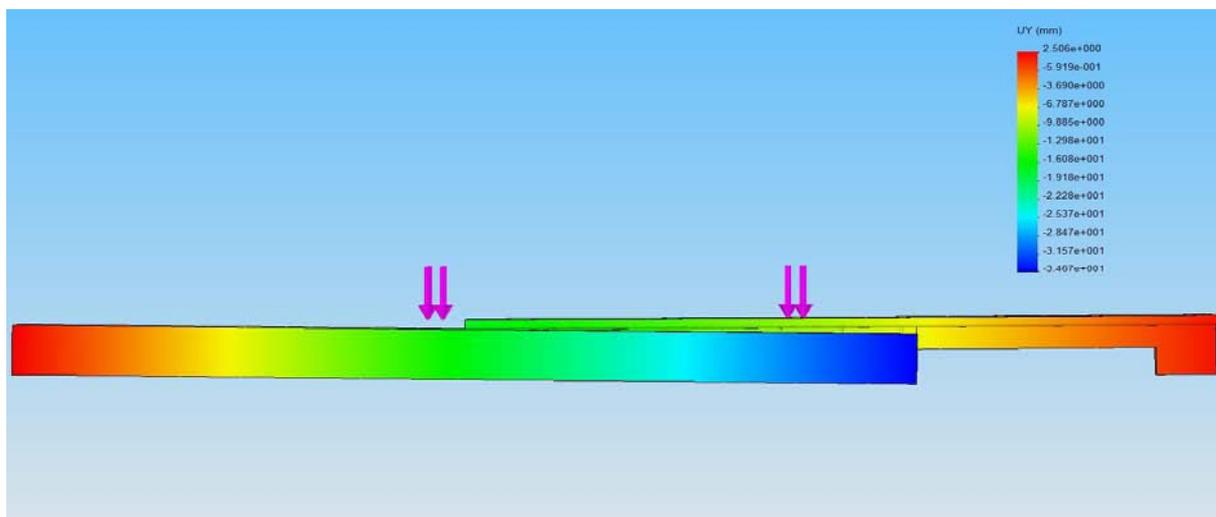
**Figura nº 4.85**

Prótesis de gran escuadría sobre pieza de madera. Mallado y análisis tensional en el sentido de la fibra.

La comparativa que realizamos del refuerzo con su testigo en el ensayo EN 408 es ciertamente procedente. Sin embargo, en el caso de la prótesis dicha comparación es poco menos que absurda. Esto se debe a varios motivos.

En la realidad constructiva, el trabajo de la estructura de madera más la prótesis adaptada a su geometría no va a trabajar en un sistema biapoyado. Por otro lado la carga será repartida y contará con un elemento rigidizante en la parte superior. Bien mediante una losa superior de forjado con hormigón, o bien con un entablado de madera que evita el vuelco lateral y arriostre todo el plano horizontal.

En las simulaciones se comprobó en los desplazamientos verticales la existencia de una separación importante entre los dos materiales (**Figura nº 4.86 y nº 4.87**). Las dos estructuras se separan en una zona, donde además existe un cambio de geometría y material. Tras analizar esto se nos planteó la posibilidad, para evitar esta separación de hacer pasante una varilla de acero con una placa bajo la pieza de madera.



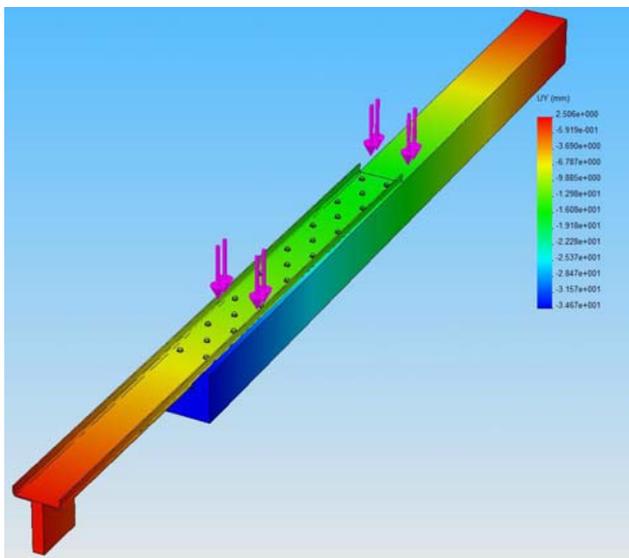
**Figura nº 4.86**

Alzado de la estructura de madera más la prótesis ante las cargas del EN 408. Resultados de desplazamientos verticales. Compruébese el punto de separación vertical de ambas estructuras.

Con esto y en cierto modo traicionaríamos una de las premisas originales que pretende un trabajo por la parte superior del forjado, decidimos comprobar como se producía esta separación y si se reproduciría así en el ensayo de laboratorio.

Como se detallará en el análisis post-rotura, la varilla no habría realizado ninguna función efectiva. Se demostrará que a pesar de la supuesta varilla, el trabajo de la pieza sería

idéntico y no se produciría siempre la separación que se alumbraba en el modelo informático.



**Figura nº 4.87**

Perspectiva de la estructura de madera más la prótesis ante las cargas del EN 408. Resultados de desplazamientos verticales. Compruébese el punto de separación vertical de ambas estructuras.

#### 4.5.2. Montaje de prótesis metálica.

El montaje de las prótesis metálicas tanto sobre las vigas de gran escuadría (**Figura nº 4.88**, **nº 4.89** y **nº 4.90**) (sierra y laminada) como en las piezas de menor sección en la madera antigua, resulto ser mucho más sencilla.



**Figura nº 4.88**

Pieza de madera laminada con prótesis implantada. Se puede comprobar que las condiciones de distancia y posición de los tirafondos es similar en la viga con prótesis (arriba) que en las vigas reforzadas (abajo).

Esta simplificación viene dada por la forma de ejecutar las acanaladuras longitudinales en la madera, empezando por la testa de la pieza, que se encuentra libre de ataque. Por otro

lado, al existir longitud de empotramiento la acanaladura tiene una dimensión menor en longitud.



**Figura nº 4.89**

Figura de viga de madera laminada de 3000 mm con prótesis implantada. Puede observarse por simple proporción como la zona de empotramiento sobre la madera sana corresponde a una longitud 1.5 veces la correspondiente a la zona libre de acero.

Por debajo de la prótesis se encuentran las vigas de madera laminada reforzadas en toda la parte superior obteniéndose estructuras similares en luz para poder realizar el ensayo de rotura (EN 408) en las mismas condiciones de distancia de apoyos (3600 mm).

Finalmente, el ensamble de la prótesis sobre la madera se realiza por gravedad, acoplándose los planos horizontales de prótesis y vigueta de madera con un suave golpeteo con martillo de pasta.



**Figura nº 4.90**

En esta perspectiva de la pieza ensamblada con prótesis metálica la solución de apoyo está compuesta por dos tubos de acero estructuras de 100.40.4 adosados y soldados en vertical.

Es importante señalar que las condiciones de colocación y posición de los tirafondos fue la misma, tanto para las vigas de gran escuadría con prótesis metálicas, como en las similares estructuras leñosas con refuerzo. Pese a ello sí que se introdujo una variación en la longitud de los tirafondos. En las estructuras de gran escuadría con prótesis los tirafondos tienen una longitud de 110 mm mientras que las soluciones con refuerzo utilizaron tirafondos de 90 mm.

El cajeadado necesario para ensamblar la prótesis en la madera, como se puede comprobar (**Figura nº 4.91**), no supuso, pese a lo que pueda parecer, problemas de ejecución dado que se llevó a cabo utilizando la motosierra empleada en la realización de las acanaladuras.



**Figura nº 4.91**

Cajeadado practicado en la madera previo a la implantación de la prótesis metálica.



## 5.1. ENSAYOS DE LABORATORIO

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en los ensayos a flexión de las piezas testigo de los tres tipos de madera, las piezas reforzadas y las piezas con suplemento de prótesis.

Con la idea de obtener unos parámetros de comparación suficientemente rigurosos, se realizaron, ensayos mecánicos de flexión (**Figura nº 5.1**) sin llegar a la rotura sobre todas las piezas de madera, tanto las piezas de testigo como las reforzadas y con prótesis, siempre antes de ser montadas sus correspondientes adhesiones metálicas<sup>38</sup>. Con ello se obtiene un valor inicial de módulo de elasticidad.

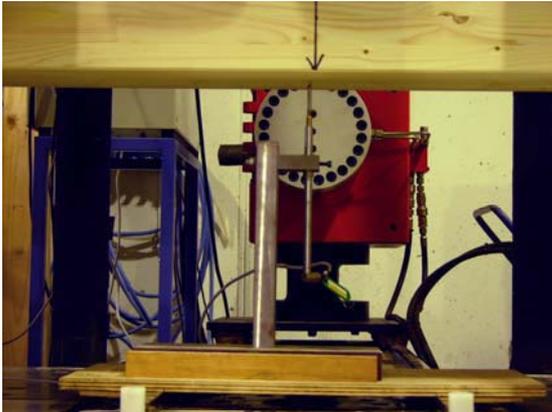


**Figura nº 5.1**

Ensayo de flexión sin llegar a rotura para obtención de módulo de elasticidad de la piezas y primera clasificación estructural.

El uso de un medidor de desplazamientos verticales LVDT (**Figura nº 5.2**), empleado durante la franja de rango elástico y hasta una carga preprogramada en el programa informático de ensayos facilitó los valores de deformación del centro del vano e su correspondencia con las cargas aplicadas por la máquina universal de ensayos. Posteriormente a la carga tope marcada, se retira el LVDT. Para comprobar las deformaciones hasta el límite elástico y previo a la rotura de las primeras fibras a tracción del borde inferior de las piezas, se tomaron los valores de flecha directamente de la carrera del pistón con la corrección adecuada de entrada en carga de las piezas para calibrarlo con el desplazamiento de LVDT.

<sup>38</sup> Para una comprobación de las medidas de los distintos tipos de aplicaciones empleadas en la madera para los ensayos referimos al Anexo Documental de fichas donde se detallan las 30 piezas que fueron ensayadas con algún tipo de refuerzo o prótesis.



**Figura nº 5.2**

LVDT para medición de desplazamiento o flecha del punto medio de la pieza en el ensayo normado EN 408.

Para asegurar la transmisión de los esfuerzos desde la máquina universal de ensayos a las piezas reforzadas y con prótesis, se procedió a insertar unos prismas de madera de Blanco (Figura nº 5.3), para así posibilitar una entrada en carga uniforme y acorde con el ensayo estático.



**Figura nº 5.3**

Elementos de transmisión de las cargas mediante prismas de madera elondo para poder salvar las pletinas de las piezas metálicas evitando así una carga anómala sobre las piezas.

La deformación (Figura nº 5.4) de las piezas en tiempo real fue registrada en video para su posterior estudio.



**Figura nº 5.4**

Deformada de una pieza de madera de sierra bajo ensayo EN 408, una vez retirado el medidor LVDT.

### 5.1.1. Módulo de elasticidad y tensión de rotura en las muestras ensayadas

En la **tabla 5.1** se muestra el resumen de los resultados de todas las piezas ensayadas. Los valores de  $E_1$  y  $E_2$  corresponden a los valores medios de los módulos de elasticidad de las piezas antes y después de aplicarse el refuerzo o prótesis respectivamente.

VIGA	$E_1$	$E_2$	CARGA ROTURA	TENSIÓN ROTURA	APLICACIÓN
LAMINADA	11.039	10.641	77,2	38,6	TESTIGO
LAMINADA	11.122	16.861	102,3	52,7	REFUERZO
LAMINADA	10.951	8.012	27,5	13,7	PRÓTESIS
SIERRA	7.936	7.923	61,9	30,9	TESTIGO
SIERRA	8.048	15.928	97,9	48,9	REFUERZO
SIERRA	7.859	7.249	27,3	13,6	PRÓTESIS
ANTIGUA	6.221	11.955	31,5	34,0	TESTIGO
ANTIGUA	6.885	7.332	40,1	24,6	REFUERZO
ANTIGUA	6.649	6.814	9,4	9,7	PRÓTESIS

Tabla 5.1. Resultados del ensayo EN UNE 408 sobre las muestras de madera

Las unidades de módulo de elasticidad y de tensión de rotura están  $N/mm^2$ . La carga de rotura está en kN. En la **tabla 5.2** se muestran los incrementos del módulo de elasticidad de todas las muestras ensayadas.

VIGA	$\Delta E$ (%)	Desviación típica	Coefficiente de variación	APLICACIÓN
LAMINADA	145	1.678	10,9	REFUERZO
LAMINADA	75	533	6,7	PRÓTESIS
SIERRA	201	2.156	13,5	REFUERZO
SIERRA	91,5	520	7,2	PRÓTESIS
ANTIGUA	163	2.450	20,5	REFUERZO
ANTIGUA	92,9	1.364	20,0	PRÓTESIS

Tabla 5.2. Incremento del módulo de elasticidad

Finalmente en la **tabla 5.3** se muestra el incremento de la tensión de rotura de las piezas de madera. Los valores de todas las piezas se pueden comprobar en el anexo documental, dado que aquí se han tabulado los valores medios.

VIGA	$\Delta$ Tensión Rotura (%)	Desviación típica	Valor característico muestral (5%)	Valor característico poblacional (5%)	Coefficiente de variación	APLICACIÓN
LAMINADA	126,7	8,5	43,7	38,6	16,1	REFUERZO
LAMINADA	35,5	0,6	12,8	11,7	4,6	PRÓTESIS
SIERRA	158,3	14,8	33,6	24,4	30,3	REFUERZO
SIERRA	44	0,5	13,1	12,3	3,6	PRÓTESIS
ANTIGUA	138	11,7	20,4	14,6	30,3	REFUERZO
ANTIGUA	39,4	2,3	6,5	6	23,1	PRÓTESIS

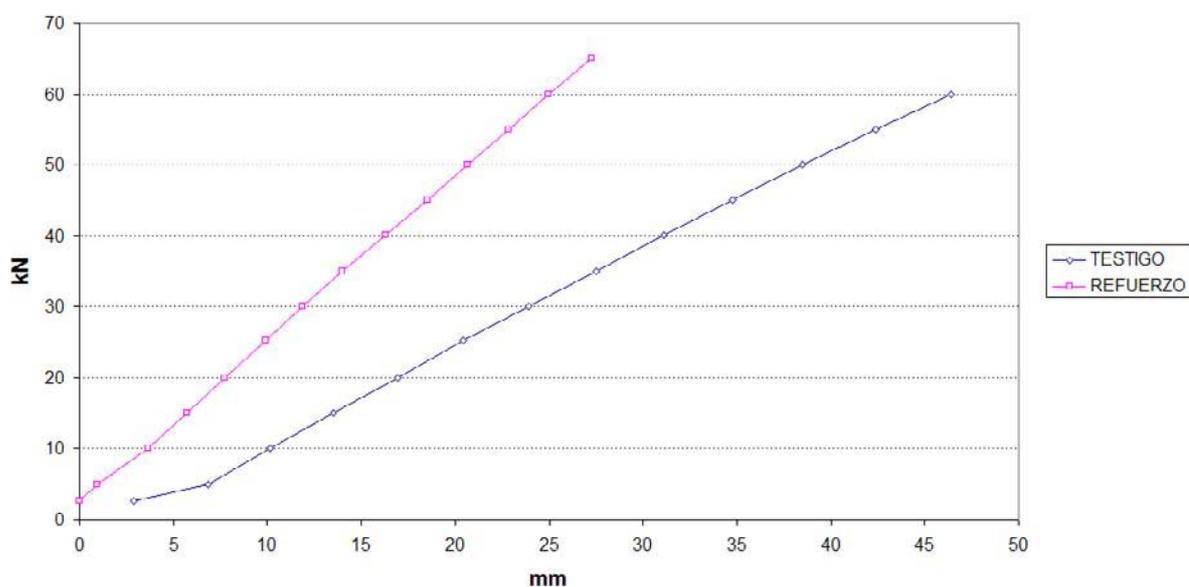
Tabla 5.3. Incremento de la tensión de rotura

### 5.1.2. Análisis de resultados

Para una visión global de los resultados se han realizado gráficas de comparación de los refuerzos y las prótesis con sus respectivos testigos. De esta forma entendemos que se comprueba claramente la ganancia de resistencia y rigidez en las piezas reforzadas.

Para ello las gráficas reflejarán en el eje Y la fuerza en kN aplicada por la máquina universal de ensayos y en el eje X los milímetros de desplazamiento registrados por el centro del vano de la pieza durante el ensayo a flexión.

Si hacemos una comparativa de los valores de deformación entre las piezas de madera laminada encolada reforzadas y las piezas testigo (**Figura nº 5.5**) podemos comprobar lo ya expuesto más arriba.



**Figura nº 5.5**

Deformación, a igualdad de carga, de las medias de testigo de madera laminada y las reforzadas.

La mejora del refuerzo es sensible y las deformaciones sufren unas reducciones importantes, con un incremento además de la pendiente que homogeniza el comportamiento de las piezas.

En lo que respecta a las prótesis, y sólo en el caso de la madera laminada encontramos que las deformaciones de las piezas con prótesis son menores que las de sus respectivas testigo (**Figura nº 5.6**).

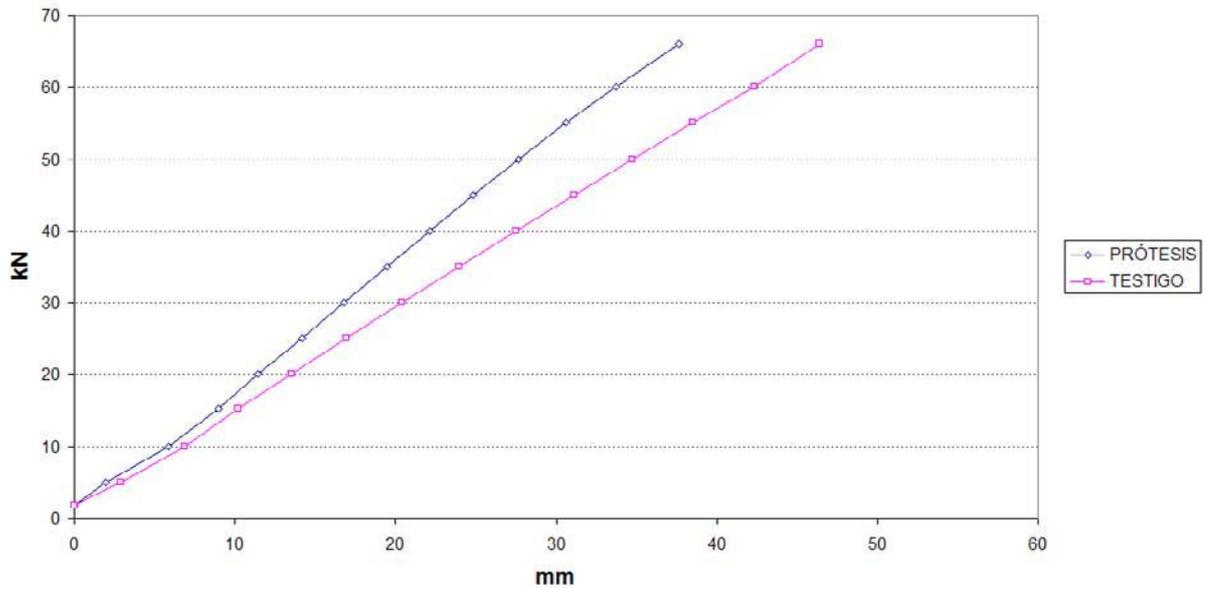


Figura nº 5.6

Deformación, a igualdad de carga, de las medias de testigo de madera laminada y las prótesis.

Por lo que respecta a la madera de sierra, en el caso del refuerzo volvemos a obtener mejoras considerables respecto de las piezas testigo, avalando la hipótesis de trabajo original.

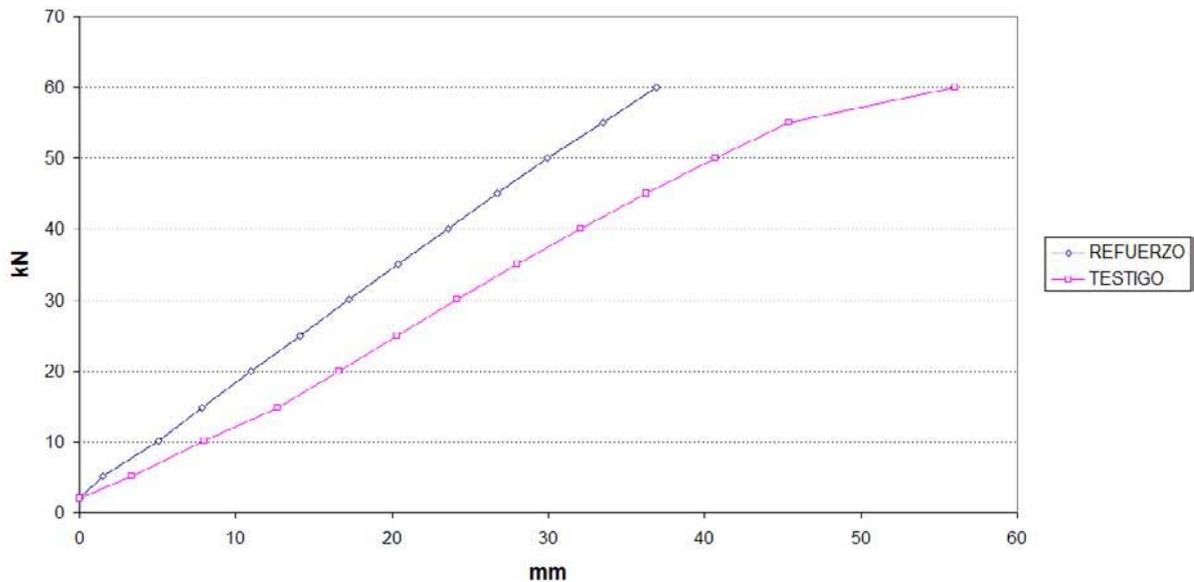
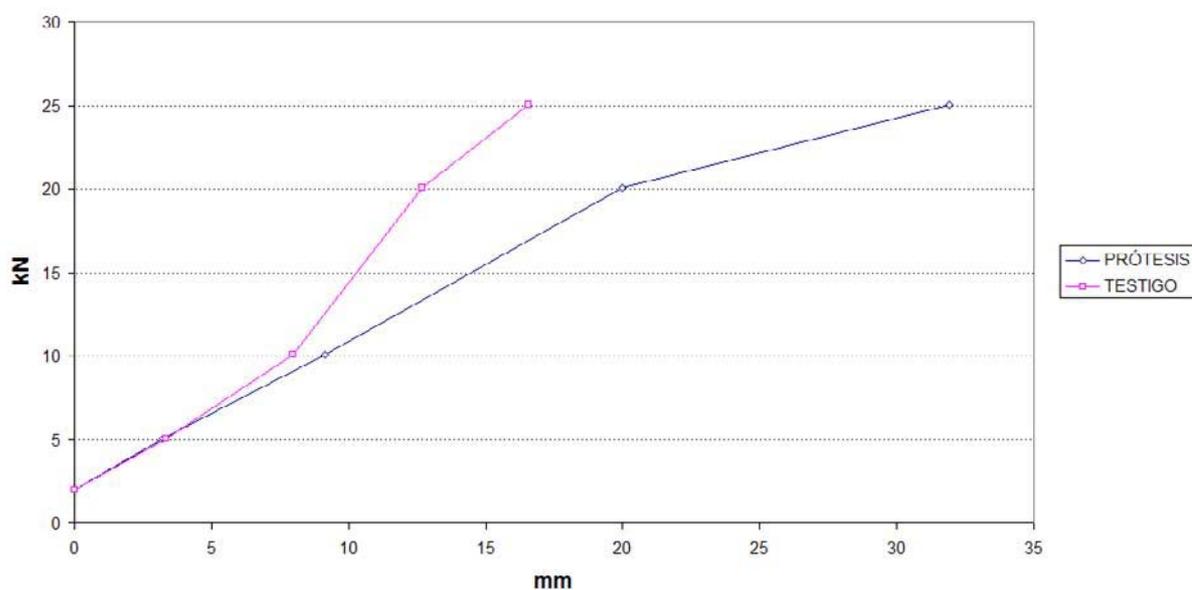


Figura nº 5.7

Deformación, a igualdad de carga, de las medias de testigo de madera de sierra y las reforzadas.

La madera de sierra (**Figura nº 5.7**) se acerca más a la utilizada habitualmente, con defectos y singularidades que la convierten en un material ciertamente variable. Como se expone en las conclusiones, se puede deducir algo inmediato de la mejora de las piezas de sierra reforzadas. La uniformidad de comportamiento sumado a la reducción de variabilidad. Es decir, la clasificación de la madera sube de rango al encontrarse reforzada, hecho por el cual se pueden realizar cálculos más precisos reduciendo escuadrías en obra nueva.

Por otro lado en la parte de prótesis sobre madera de sierra, encontramos respuestas peores como ya se dijo más arriba (**Figura nº 5.8**).



**Figura nº 5.8**

Deformación, a igualdad de carga, de las medias de testigo de madera de sierra y las prótesis.

A pesar de esto, insistimos en el comportamiento parejo de ambas piezas en un tramo de trabajo crítico, entre los 0 y los 7 kN.

Finalmente la madera antigua corresponde al material más realista, y que más se aproxima a los elementos que se encontrarán en las obras de intervención. Por este motivo los resultados obtenidos son importantes por lo que a los trabajos de reparación de estructuras antiguas se refiere.

Concretamente (**Figura nº 5.9**) en el caso del refuerzo la mejora implica reducciones importantes de deformación, y por ende posibilidad de implantación es estructuras con reducciones de escuadría por ataques bióticos. Las estructuras resultantes serán adaptadas

a las necesidades de seguridad de la estructura y lo que es muy importante, la deformación diferida será recuperada a través del sistema de fijación de refuerzo a la madera al roscar los tirafondos.

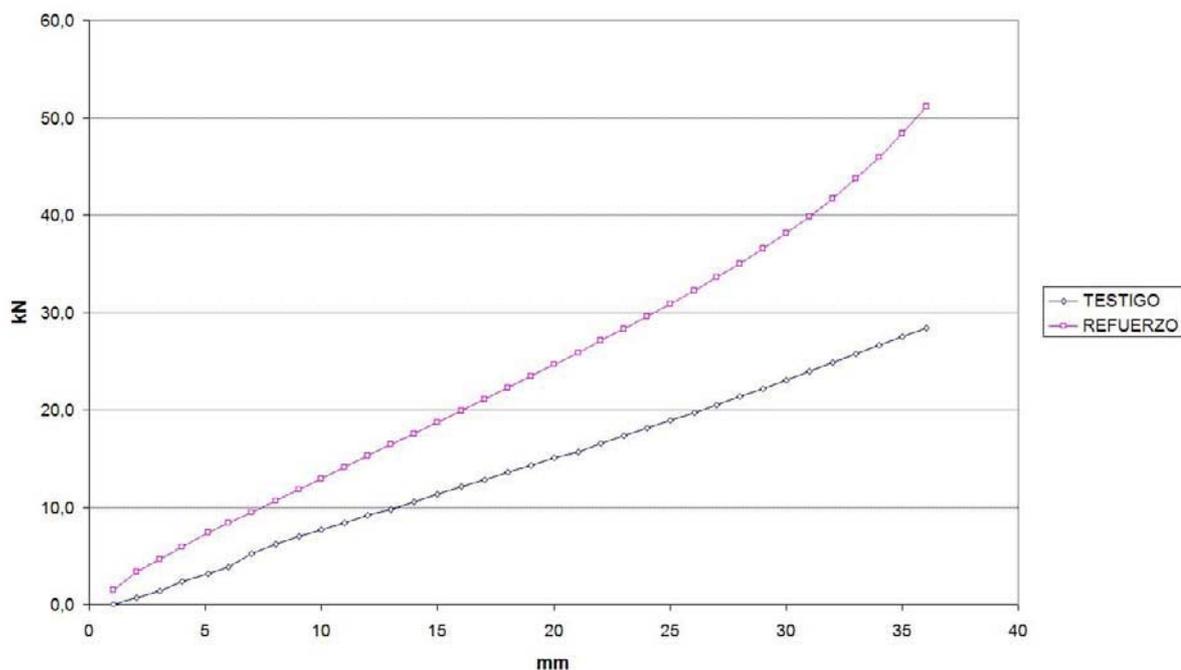


Figura nº 5.9

Deformación, a igualdad de carga, de las medias de testigo de madera antigua y las reforzadas.

Esta recuperación plantea una revitalización de estructuras antiguas que, pese a no encontrarse atacadas por agentes patógenos, si pueden ser reforzados de cara a nuevos usos y nuevas cargas. Esto, que actualmente se realiza a través de conectores puntuales a la madera, hacen colaborar conjuntamente a la madera con una losa de hormigón armado.

Sin embargo, en nuestro caso, los refuerzos se implantaría sobre los nervios de madera en toda su longitud y la losa se abarataría considerablemente al convertirse en un capa de compresión.

En lo referente a las prótesis sobre madera antigua, el comportamiento vuelve a ser peor (**Figura nº 5.10**), aunque se vuelve a repetir ese tramo de seguridad en el que ambas piezas van parejas en deformaciones.

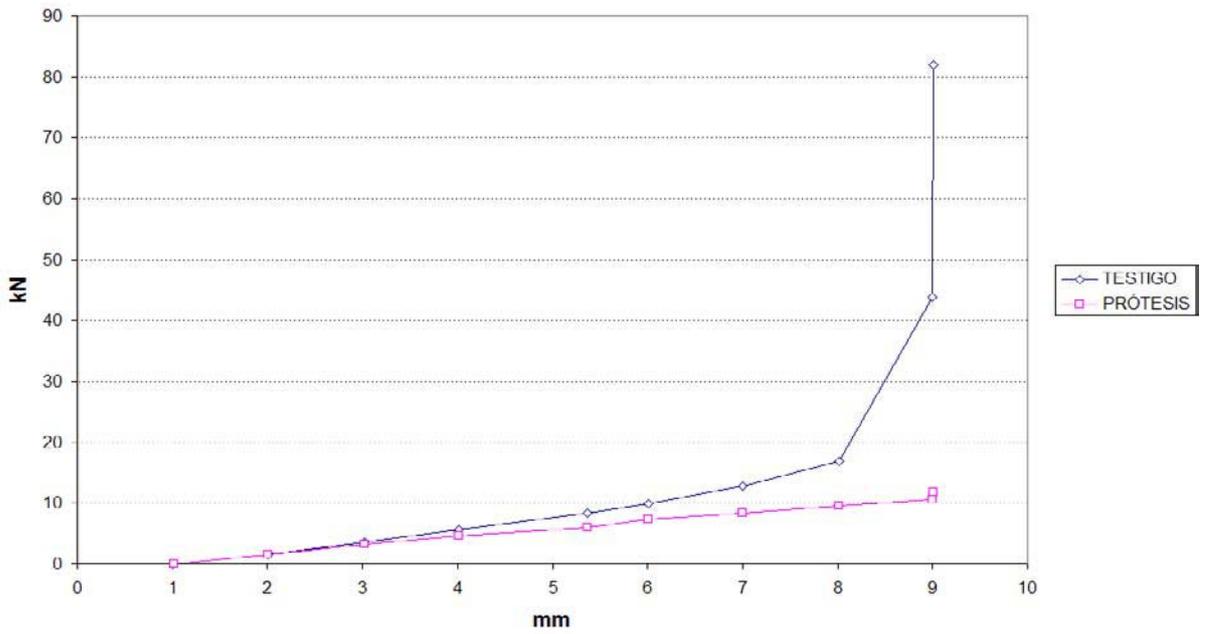


Figura nº 5.10

Deformación, a igualdad de carga, de las medias de testigo de madera antigua y las prótesis.

### 5.1.3. Análisis post-rotura de refuerzo metálico en piezas de madera sometidas a flexión

Una vez llevados a rotura, las piezas fueron analizadas para comprobar la idoneidad de los elementos y poder valorar su correcto funcionamiento. En algunos casos se llevó a las piezas a cargas post-rotura de la madera que produjeron un deterioro considerable en las muestras. Esto se llevó a cabo, en un afán de registrar datos referentes al comportamiento último y efectos de segundo orden (trabajo no lineal del acero en condiciones fuera de la franja de servicio).

En cualquier caso, parte de estos datos podría constituir el inicio de alguna de las futuras líneas de investigación que se expondrán al final de este trabajo.

En general el trabajo de las piezas reforzadas y a la luz de los datos obtenidos durante y después de las cargas que llevaron a rotura a la madera de las distintas piezas, conservó una cierta homogeneidad.

#### 5.1.3.1. Comportamiento del refuerzo metálico.

Como ya se ha indicado más arriba hubo una reducción del coeficiente de variación que obviamente fue absorbida por el comportamiento compuesto de acero más madera. En general el trabajo del acero, considerado aisladamente, fue en la mayor parte de las piezas de rango elástico puro (Imágenes nº 5.11 y 5.12).



**Figura nº 5.11**

Pieza de madera antigua procedente de derribo, reforzada con acero laminado y en el estado previo a la entrada de cargas.

Esto indica dos aspectos muy relevantes del funcionamiento de la viga de madera *armada* superiormente<sup>39</sup> con acero laminado.



**Figura nº 5.12**

Pieza de madera antigua procedente de derribo, reforzada con acero laminado y en el momento de rotura de la madera. Tras la retirada de las cargas el acero vuelve a su posición original al no haberse superado su límite elástico.

Por una parte, existe un incremento de la seguridad en la colocación de las piezas de acero sobre la madera por el efecto de retén que posee el primero respecto de la segunda ante posibles problemas de estabilidad.



**Figura nº 5.13**

Pieza de madera antigua procedente de derribo, reforzada con acero laminado y colocada para su reportaje fotográfico. Se puede comprobar que la deformación de la figura 5.6 se ha recuperado sensiblemente.

Además, augura un comportamiento muy interesante de la estructura conjunta ante la carga dinámica o cíclica, y por tanto ante la fatiga de la estructura. El margen de seguridad se incrementa considerablemente al depender casi en exclusividad de los apoyos y no de la parte intermedia de la pieza que conserva alto porcentaje de rigidez (**Figura nº 5.14**).

<sup>39</sup> El término *armada* es una referencia clara al hormigón por cuanto los resultados y comportamiento mecánico de las piezas han demostrado.



**Figura nº 5.14**

Alzado de pieza de madera antigua, tras la rotura de la madera que no es apreciable ni visualmente del agrietamiento de la pieza ni por deformada

Pese a ello, fue en las escuadrías grandes tanto de madera de sierra (**Figura nº 5.15**) como en la madera laminada, donde se produjeron entradas locales del acero en fase plástica.



**Figura nº 5.15**

Deformada de una pieza de madera de sierra bajo ensayo EN 408, una vez acabado el ensayo, y retirada la pieza de la máquina universal Ibertest. Nótese la deformación remanente del acero aún después de aplicada la carga.

Esto se produce generalmente coincidiendo con el tercio central y a veces en la posición donde se localizan las cargas, debido a una distribución no homogénea de la acción durante el ensayo.



**Figura nº 5.16**

Deformación lateral de una de las pletinas verticales exentas del refuerzo. Efecto conocido como pandeo lateral del cordón comprimido.

Esto se produce generalmente en el ámbito de la ingeniería civil, en la construcción de puentes en los que para evitarlo se suele acodalar los dos cordones lateralmente de forma que se eviten los desplazamientos en esos sentidos.

Acompañando a este efecto se produjo un pandeo lateral del cordón comprimido (**Figura nº 5.16**) tras la flexión de las piezas de madera reforzadas.

En pocos casos se llegó a producir localmente y en una de las pletinas únicamente este efecto que en las prótesis fue generalizada.



**Figura nº 5.17**

Cordón de soldadura de 30 mm uniendo las pletinas verticales que se introducen en la madera con la pletina horizontal plegada que queda por fuera de la misma en el ensamble.

Fotografía tomada tras la extracción del refuerzo de la madera y posterior al ensayo de rotura de la misma.

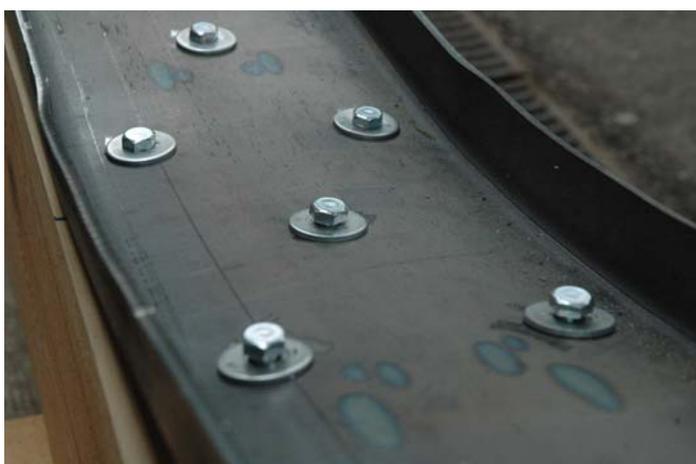
Ninguno de los cordones, a pesar de estar distanciados del orden de 300 mm sufrió pérdida de adherencia.

Finalmente, y dentro del análisis post-rotura de las piezas se desmontó el refuerzo de la madera para comprobar el estado de los cordones de soldadura. Esta comprobación (**Figura nº 5.17**) se llevó a cabo dado que en algunos de los ensayos se forzó deliberadamente al acero una vez se había producido la rotura y registrado los correspondientes datos normalizados.

### 5.1.3.2. Comportamiento de los elementos de unión.

Los tirafondos fueron seguidos en el proceso del ensayo a través de video para comprobar pequeños movimientos durante la flexión de las piezas. Su comportamiento al igual que en el caso del refuerzo fue muy homogéneo. Encontramos que en los casos en los que la deformada durante el ensayo fue pronunciada, se produjo un arrancamiento de los tirafondos en la parte central de la pieza, y visibles tras la recuperación de la mencionada deformación.

Aunque el levantamiento de los tirafondos no es dependiente únicamente de la carga aplicada y de la deformada adquirida por las piezas, las otras causas como la densidad de la madera y por tanto su dureza no fueron objeto de este estudio. Pese a ello podemos indicar que dada la calidad de la madera laminada encolada (*Picea abies*) en dónde los casos de levantamiento de tornillos (**figura nº 5.18**) fueron más espectaculares (Basterra et al., 2006).



**Figura nº 5.18**

Levantamiento de tirafondos tras el ensayo a rotura de las piezas de madera en el caso de viga de madera laminada de gran escuadría.

El estudio de las conexiones en la madera es un tema muy extendido desde hace décadas (Johansen, 1949) y que cuenta con un elenco considerable de investigadores dedicados a él (Fernández-Cabo, 2006). Actualmente, este estudio se concentra casi por entero en la conexión entre hormigón y madera. El caso de conexión entre acero y madera, reflejado en el EC5 y el CTE, se halla desarrollado en soluciones ya normalizadas.



**Figura nº 5.19**

Levantamiento de tornillos en pieza reforzada de madera antigua. Nótese que las arandelas de reparto han quedado liberadas tras el levantamiento.

Quizá por ello, al emplear esta solución de unión entre los dos materiales, el comportamiento en general fue bastante satisfactorio por cuanto en muchos casos (**Figura nº 5.20**) el movimiento fue imperceptible aún después de retirar la carga y extraer los tornillos de la madera.



**Figura nº 5.20**

Deformada de una pieza de madera de sierra bajo ensayo EN 408.

Una de las razones es la alta densidad de tornillos colocada en algunos refuerzos, y que como ya se explicó en el capítulo correspondiente obedeció a una búsqueda de máxima unión entre acero y madera.

**Figura nº 5.21**

Retirada de tirafondos de la chapa en piezas ensayadas, para comprobación del efecto del rozamiento entre materiales.

Se puede comprobar por los rastros dejados por las arandelas, que no existe una homogeneidad de tensiones rasantes a lo largo del ancho de la pieza.

Esto motivó el análisis de la chapa retirando tirafondos y tornillos, para comprobar los efectos del rozamiento (**Figura nº 5.21**) y el sentido del mismo durante el ensayo de flexión.

Existen pues zonas (**Figura nº 5.22**) en las que la arandela no está transmitiendo tensión desde la cabeza del tornillo a la chapa de acero, y zonas en las que el rozamiento es acusado.

**Figura nº 5.22**

Detalle de la figura nº 5.15 en donde se puede comprobar el rozamiento de la arandela y el efecto de reparto de tensiones de la cabeza del tirafondo, no tiene el sentido longitudinal de la viga, sino que está superficialmente extendido en diagonal al mismo.

Este efecto, que en las piezas de madera antigua no sería relevante<sup>40</sup>, se comprobó en las de madera de gran escuadría (sierra y laminada) dado que la geometría y posición de partida de los tirafondos era la correcta.

### 5.1.3.3. Comportamiento de la madera.

<sup>40</sup> Esta falta de relevancia está relacionada con la inclinación con la que se introduce el tirafondo en una pieza de madera antigua, poco homogénea y con las caras curvadas por lo que la verticalidad de los tirafondos es muy discutible.

Por último se comprobaron los contactos generados en el ensayo, y la deformación de los distintos elementos. Para ello, en el desmontado de los refuerzos, se estudió el estado de los taladros que habían alojado a los tirafondos (**Figura nº 5.23**).

El aspecto general y local en todos los casos resultó ser muy homogéneo. En la superficie de la madera, el taladro conservaba el borde sin un deterioro aparente (**Figura nº 5.24**).

Dado que los tirafondos, por diámetro y longitud, se encuentran alojados en el bloque de compresiones de la pieza compuesta, y dado que, se produce un esfuerzo rasante convertido en carga lateral en los tornillos, la colisión entre anclaje y madera predecía efectos de desgaste en la madera.

Lejos de producirse este devastado el aspecto de detalle de los taladros tras los ensayos de deformación indicaban un comportamiento de la madera muy aceptable.



**Figura nº 5.23**

Aspecto de las acanaladuras y de los taladros tras retirada de los refuerzos.

Se puede comprobar como en la franja de la imagen, que cuenta con 9 taladros, ninguno de ellos cuenta con deformaciones de la madera a su alrededor indicando el buen comportamiento de la misma.

Otro tanto se podría decir de las acanaladuras practicadas en la madera, y que tenían durante el ensayo alojadas pletinas de 4 mm de espesor y en los casos de madera de sierra (**Figura nº 5.24**) dos pletinas con una proximidad de 42 mm entre ellas y una profundidad de 90 mm dentro de la pieza leñosa.



**Figura nº 5.24**

Detalle de la figura nº 5.17 en la que se puede comprobar la integridad de los taladros y de las acanaladuras en las piezas en el estado pot-rotura.

Por lo que refiere a la rotura física de la madera, momento en el que se detiene el ensayo normalizado EN 408, existió variedad de casos en las piezas analizadas (**Figura nº 5.25**).



**Figura nº 5.25**

Marcado de rotura de pieza reforzada de madera de sierra. Obsérvese como las fisuras marcadas en azul bordean el nudo en canto de la pieza.

Generalmente, en el caso de la madera nueva o antigua, las roturas se produjeron próximas a nudos, en un alto porcentaje fuera del tercio central y por ende, aleatoriamente.



**Figura nº 5.26**

Rotura coincidiendo con defectos de madera. Se puede comprobar como en la fractura el nudo se ha salido de su localización y la rotura se produce coincidiendo por encima con la zona entre dos láminas de madera laminada encolada.

Para comprobar el origen del agrietamiento por rotura de la madera se extrajo de la grabación tres fotogramas consecutivos separados 1/24 segundos (**Imágenes nº 5.27, 5.28 y 5.29**).



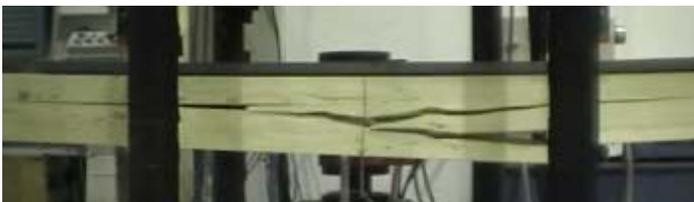
**Figura nº 5.27**

Deformada de una pieza reforzada de madera laminada encolada bajo ensayo EN 408, instante antes de rotura (1/24 s).



**Figura nº 5.28**

Instante de rotura. La grieta se manifiesta en la madera en menos de 0,042 segundos.



**Figura nº 5.29**

Momento en el que el software detecta la rotura y cesa la carga. Hay que señalar que el lugar de comienzo de la grieta en la madera tiene lugar fuera del tercio central y avanzando hacia él.

Se comprobó que en una rotura por el tercio central la fisura inicial comenzaba entre dos láminas encoladas fuera del tercio central y crecía exponencialmente hacia el mismo. Este

caso concreto, en el que no existen singularidades en la madera, muestra una rotura bastante limpia.



**Figura nº 5.30**

Pieza de madera de sierra tras rotura, descarga y recuperación de flecha.

También se comprobó en los ensayos que las grietas en la madera se cerraban tras la retirada de la carga y como ya se ha avanzado la horizontalidad de las piezas reforzadas era manifiesta (**Figura 5.30**).



**Figura nº 5.31**

Pieza de madera de sierra tras ensayo de acero con madera fracturada.

La pieza que más carga admitió antes de rotura, casualmente una pieza de madera de sierra (SIERR\_06), hasta los 144,90 kN fue sometida al ensayo y previo a la rotura tres cargas de 120 kN con retirada completa de la carga. A la vista de su repuesta a la fatiga y tras la rotura final de la madera y su posterior recuperación, se llevó mediante carrera libre<sup>41</sup>

<sup>41</sup> Término que indica que el pistón de la máquina universal de ensayos no tiene limitación impuesta y su parada es manual.

a la pieza con la madera ya fracturada para comprobar cuanto aguantaba el acero antes de entrara en un rango plástico ostensible (**Figura nº 5.31**).

El acero antes de deformarse por encima de los 60 mm aguantó la mitad de la carga de rotura de la pieza compuesta, es decir unos 70 kN. Esta pieza se aprovechó para comprobar deformaciones en tornillos, rozamientos, etc.

#### 5.1.4. Análisis post-rotura de prótesis metálica en piezas de madera sometidas a flexión

Al igual que en el caso del refuerzo, este análisis post-rotura en la madera con prótesis (Figura nº 5.32) tuvo una intención de análisis intensivo de los efectos de la carga en las piezas.



Figura nº 5.32

Ensayo EN 408 sobre pieza suplementada con prótesis metálica en madera de sierra de gran escuadría.

Hemos de mencionar que a pesar de que hemos utilizado el término post-rotura en las piezas de madera suplementadas con prótesis, nunca se llegó a romper ni la madera ni el acero en ninguno de los ensayos llevados a cabo.

Esto se debe a que al emplear un sistema de ensayo normalizado a flexión, por cargas a tercios para evitar una deformación por cortante, en el caso concreto de estas piezas se produjo una acumulación de tensiones del acero, en el punto de conexión entre el acero libre y el comienzo de la madera. Este hecho ocasionó una deformación y plastificación de rótula en la pieza de prótesis a partir de determinada carga impuesta por la máquina universal de ensayos Ibertest.

Como resultado de ello la madera no sufrió en ningún caso fractura y apenas roturas parciales de fibras. A continuación se detalla el comportamiento de cada elemento por separado.

#### 5.1.4.1. Comportamiento de la prótesis metálica.

Como ya hemos dicho, tanto en el caso de grandes escuadría como en el caso de madera antigua de escuadría pequeña, el diseño empleado prótesis sumado a su soldado entre las distintas piezas, posee una zona de acumulación de tensión (**Figura nº 5.33**).



**Figura nº 5.33**

Punto de acumulación de tensiones en el acero por cambio de geometría al someter a la prótesis a la acción vertical similar al de los ensayos de refuerzo.

Aquí se supera el límite elástico del acero y se forma una rótula y por ende fallo de la estructura, que sin desplomarse se queda irremediabilmente deformada (**Figura nº 5.34**).



**Figura nº 5.34**

Momentos antes y después de imposición de la carga en pieza de madera antigua suplementada con prótesis metálica.



Al llegar la carga a un valor determinado durante los ensayos el programa detecta que ya no hay resistencia de la pieza, cayendo la línea en la gráfica y cesando la carga en ese momento.



**Figura nº 5.35**

Prótesis de piezas de madera de gran escuadría.

Deformación de prótesis y aspecto de las soldaduras de pletinas verticales sobre la pieza horizontal.

También se puede comprobar el estado de la soldadura en el punto de cambio de geometría entre dos pletinas y un tubo estructural.

El comportamiento de las soldaduras fue bastante óptimo (**Figura nº 5.35**) en general. La integridad de la conexión, por lo que a la soldadura se refiere, fue completa. Esto se dio en los modelos de prótesis para grandes escuadrías. Aquí dos pletinas se unen mediante un solape de 20 mm con tubo estructural de 90.40.4 (**Figura nº 5.36**).



**Figura nº 5.36**

Vistas del punto de acumulación de tensiones en el cambio de geometría de la prótesis metálica para grandes escuadrías.



En los modelos de prótesis sobre madera antigua, donde la geometría de la prótesis por la parte inferior hace que se pase de un tubo estructural del 60.40.4 a una sola pletina de 4 mm de espesor y 60 mm de altura, el fallo por soldadura fue general (**Figura nº 5.37**).



**Figura nº 5.37**

Fallo de soldadura en prótesis de acero laminado en pieza de madera antigua.

Nótese que no se produjo levantamiento de tornillo en el borde. La parte de tirafondo que se observa corresponde a la zona que no llegó a introducirse en la madera en el montaje ante las irregularidades de la cara de la madera.

También se puede comprobar en la figura el padeo lateral del cordón comprimido correspondiente a las pletinas (pletina en este caso) que se abre hacia el exterior de la pieza tras la deformación.

En el estudio del comportamiento de la prótesis también se analizó la deformación de las pletinas, pronunciándose ésta de una forma mucho más ostensible que en el caso del refuerzo.



**Figura nº 5.38**

Abertura hacia fuera de las pletinas verticales tras el ensayo de flexión de pieza de madera antigua suplementada con prótesis metálica.

### 5.1.4.2. Comportamiento de los elementos de unión

Un aspecto ya mencionado en este trabajo refiere a la fijación de acero madera en el caso de suplemento mediante prótesis metálicas. En el capítulo 4 se habló, dentro del apartado correspondiente, de la incidencia, a la luz de los modelos informáticos, de la fijación entre acero y madera. Se planteó la posibilidad de fijar a la madera la pieza de acero mediante un pasador hasta la cara inferior de la pieza de madera y atado mediante una pletina de acero.

Esto que implicaba acceder por la cara inferior del forjado, fue descartado para observar el comportamiento más desfavorable de los tirafondos dentro de la madera. Se ilustra en las **Imágenes nº 5.39, 5.40 y 5.41** un caso en el que se produce levantamiento de tornillo durante el ensayo de flexión.

**Figura nº 5.39**

Ensayo de pieza de madera laminada encolada en el momento en el que se empieza a levantar el tirafondos del borde y a deformar la prótesis de acero laminado por el punto de máxima acumulación de tensiones.



**Figura nº 5.40**

Ensayo de pieza de madera laminada encolada, segundos después, el levantamiento ya es de casi 10 mm



**Figura nº 5.41**

Ensayo de pieza de madera laminada encolada en el momento que ante el avance de la carrera no se ofrece resistencia y se detiene el ensayo.



En esta situación la rótula plástica se forma en la zona de madera, y por lo tanto se produce levantamiento de los tirafondos de borde. Existen, pese a esto, otros casos en los que la

rótula del acero se forma en la zona de acero libre de madera, y no se produce levantamiento de tirafondos (**Figura nº 5.42**).



**Figura nº 5.42**

Distintos ángulos de un caso pieza con prótesis en el que no existe levantamiento de tornillo y la rótula se forma pasado en anclaje en la madera ya en la zona de acero libre de material leñoso.



En las piezas suplementadas de madera antigua se produce el fallo por soldadura antes mencionado, y los tornillos de borde no sufren arrancamiento del plano de la madera (**Figura nº 5.43**).



**Figura nº 5.43**

Tornillo de borde sin levantamiento en madera antigua, pero produciéndose fallo por soldadura.

También se produce el pandeo lateral de las pletinas verticales al funcionar a compresión.

Los tornillos sufren en cualquier caso el efecto de la carga lateral en la transmisión de la tensión rasante. Las deformaciones de la caña del tirafondo pueden llegar a deformarse por el efecto de dicha carga lateral, resultando perceptible, en algún caso concreto (**Figura nº 5.44**).



**Figura nº 5.44**

Tirafondos consecutivos en pieza de madera de sierra. El colocado a la izquierda es el que corresponde al borde de la pieza de madera. Se puede observar la deformación lateral de la caña del tirafondo.

La deformación es apreciable, aunque disminuye en el siguiente tirafondo (derecha).

### 5.1.4.3. Comportamiento de la madera

El comportamiento de la madera en los ensayos con prótesis metálica difiere de los ensayos de refuerzo. La madera no llega a fracturarse (**Figura nº 5.45**), y tras retirar la prótesis se comprueba que la integridad del material leñoso apenas ha variado durante el ensayo a flexión.



**Figura nº 5.45**

Alzado de los elementos desmontados de una prótesis y la correspondiente madera. La madera de sierra permanece inalterada después del ensayo y el acero se ha deformado considerablemente.

En este análisis, si se analiza el cajeadado practicado en la madera para el ensamble de la prótesis (**Figura nº 5.46**) se puede comprobar de nuevo que no existen aplastamientos lateral ni rotura de zonas.



**Figura nº 5.46**

Vista del cajeadado y acanaladuras de la madera suplementada con prótesis una vez desmontado el acero de la madera para comprobar la entidad de los posibles daños consecuencia de deformaciones excesivas.

También se comprueba que al igual que en el caso de los refuerzos, los taladros practicados en la madera no ha sufrido cambios tras los ensayos.

Por lo que refiere a los taladros practicados en la madera de nuevo observamos homogeneidad de comportamiento. Al analizar el cajeadado practicado en la madera para el ensamble de la prótesis (**Figura nº 5.46**) se puede comprobar de nuevo que no existen aplastamientos laterales ni rotura de zonas en el mismo.

### 5.1.5. Rango de uso y mejora del sistema de prótesis.

Como hemos podido comprobar en los resultados, las prótesis funcionan razonablemente bien en la franja de servicio de la estructura. El ámbito de servicio de la estructura, es decir, para cargas de uso y permanentes de un forjado normal el comportamiento está dentro de los límites de seguridad. Si por ejemplo comprobamos la carga (permanente + uso) utilizada para valores de servicio y para las luces habituales y reflejadas en los ensayos de piezas de madera de sierra, ésta corresponde a un valor 3,45 kN/m (2,15 + 1,3). El momento flector máximo es de 7,86 kNm. Por tanto la carga impuesta en el ensayo universal a la pieza es de **13,10 kN**. Para esta carga la desviación de la pieza con prótesis respecto del testigo es de menos de 1 mm de deformación.

Para poder cerrar el ciclo de diseño (**Figura 5.47**) se elaboró otra solución de prótesis, ganando en sencillez a la primera y por ende en facilidad de montaje y economía de medios. Dicha solución se simuló en el software específico llegando a los resultados que vamos a mostrar. La solución consiste en obviar el cambio de forma del acero en el punto de comienzo de la madera y continuar éste con la misma geometría desde el apoyo hasta el final del empotramiento. Lógicamente y por problemas de desarrollo esta solución no se ensayó en laboratorio pero si se simuló en el software MEF.



**Figura nº 5.47**

Esquema del proceso seguido para la validación de los resultados.

Para analizar la solución partimos de los fallos de la anterior. Si observamos el comportamiento de la prótesis de madera antigua, en el punto singular de concentración de tensiones (**Figura 5.48**) podemos comprobar el salto que se produce en los valores del acero en dos cortes separados 1 mm. También por lo que respecta al material xilemático se percibe una leve variación de tono indicando el diferencial comportamiento tensional entre las dos zonas.

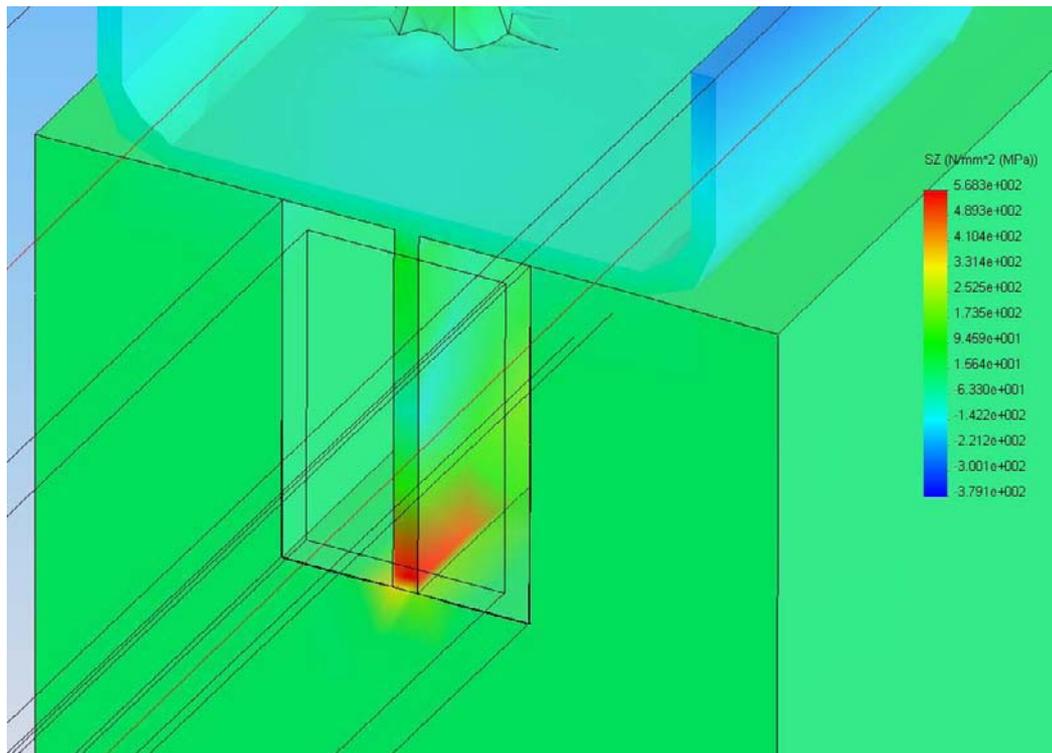
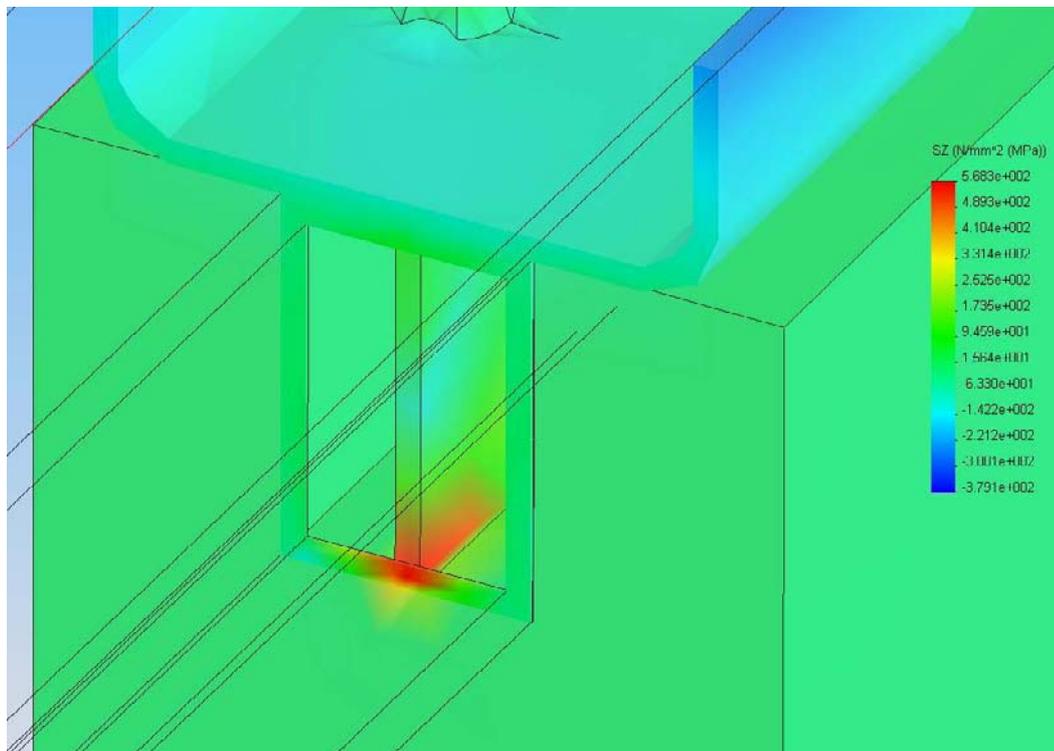
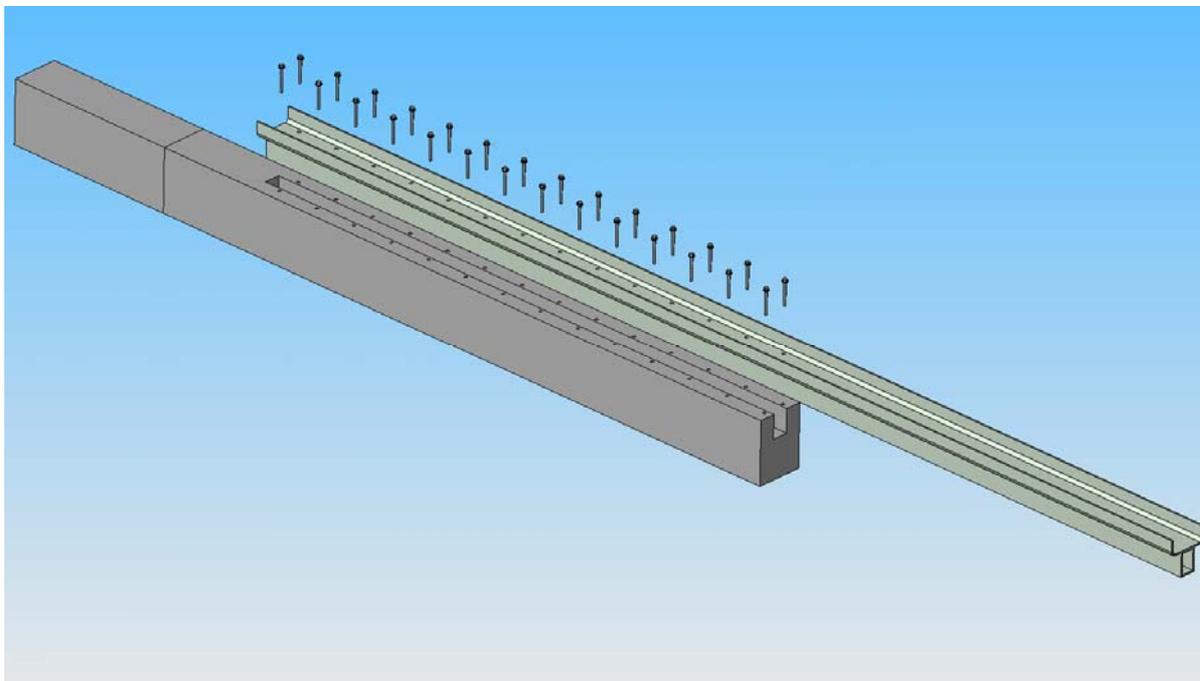


Figura nº 5.48

Cortes consecutivos (separados 1 mm) antes y después de quedar el acero libre de madera en un ensamble de prótesis sobre madera antigua. Se puede comprobar cómo se concentra el trabajo en la parte inferior de la pieza, justo en el punto que se produce un desgarramiento del cordón de soldadura.



Los resultados de esta simulación corroboraron que el diseño mejorado (**Figura nº 5.49**) cumpliría las expectativas de prótesis con mayor acierto que la inicialmente ensayada.



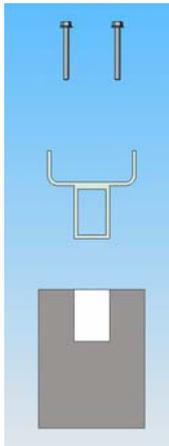
**Figura nº 5.49**

Ensamble de prótesis mejorada tras los resultados de los ensayos de laboratorio. Como se puede comprobar la sencillez es mayor y la acanaladura practicada en la madera coincide en el caso de las escuadrías menores con el ancho (40 mm) tubo estructural de 60.40.4.

Pese a que se muestra una prótesis de escuadría reducida, consideramos extensible los resultados de la misma al resto de modelos. Además es reseñable, que dado que cambiamos la forma de la pieza de prótesis, también se valoró otro orden en la fijación de la misma. Se puede observar que los tirafondos son siempre paralelos y dos en dos a diferencia de las soluciones ensayadas que van al tresbolillo.

Es importante recalcar que ambas piezas son hermanas por lo que a forma y materiales refiere. La chapa curvada (**Figura nº 5.50**) con pletinas laterales se repite en esta solución y el tubo estructural se suelda a la parte inferior de la mencionada chapa de forma discontinua.

El regresado del espesor que se producía en la parte libre de la prótesis en la versión ensayada aquí es continuo.

**Figura nº 5.50**

Vista explosionada del ensamble de prótesis de piezas de pequeña escuadría. La parte en la que espesor se doble (parte horizontal intermedia de la pieza metálica) se debe al soldado entre un tubo estructural de 60.40.4 a la chapa plegada de 4 mm de espesor.

Si realizamos el mismo corte de sección en la piezas de prótesis mejorada podemos comprobar como las tensiones que sufre el acero se reducen drásticamente a igualdad de cargas y condiciones de apoyo (**Figura nº 5.51**).

En el caso de la prótesis ensayada comprobamos que el acero está trabajando en sentido longitudinal a una tensión de 586 Mpa. En la versión mejorada se ha reducido a 146 Mpa<sup>42</sup>, al 25 % del trabajo que tenía en la versión de ensayo.

Más interesante es comprobar la rigidez de la prótesis de forma comparada, entre la versión de ensayos y la mejorada (**Figura nº 5.52**). Encontramos que la variación de flecha, en que en las mismas condiciones de cargas y de apoyo, suponen una reducción de menos de 1 mm

Todo esto nos sirve de alguna manera para corroborar que a pesar de que la prótesis ensayada no da resultados ante rotura como en el caso de los refuerzo, esto se debe a la formación de rótulas plásticas en el acero.

Por lo que refiere a las condiciones de servicio éstas se mantienen con respecto al testigo en valores próximos a estas piezas, siendo en la prótesis mejorada donde obtenemos las mismas deformaciones que en las piezas testigo.

<sup>42</sup> Recordemos que el límite elástico del acero es de 220,6 N/mm<sup>2</sup> (Mpa).

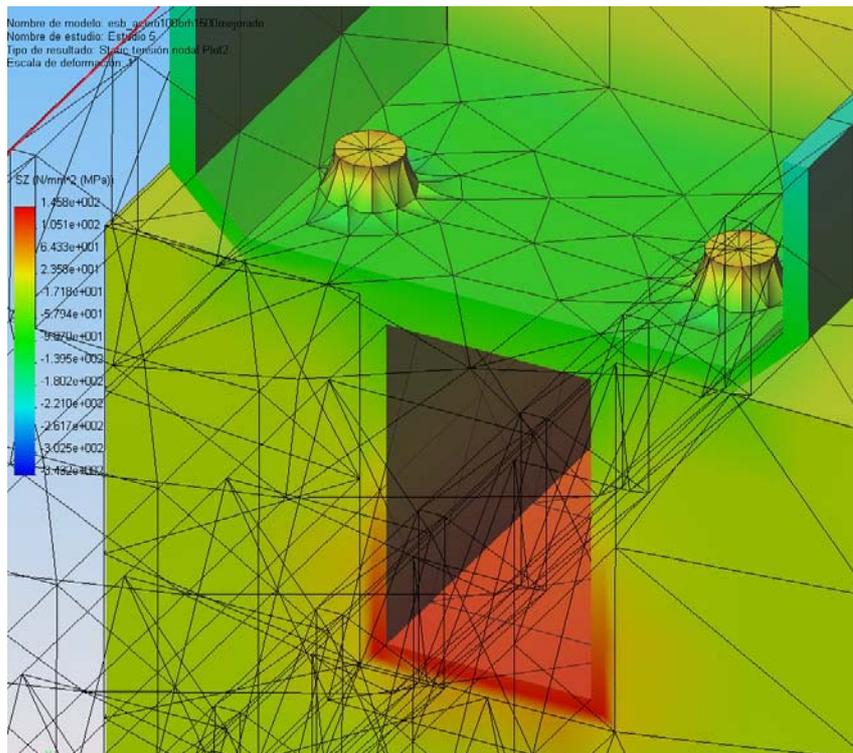
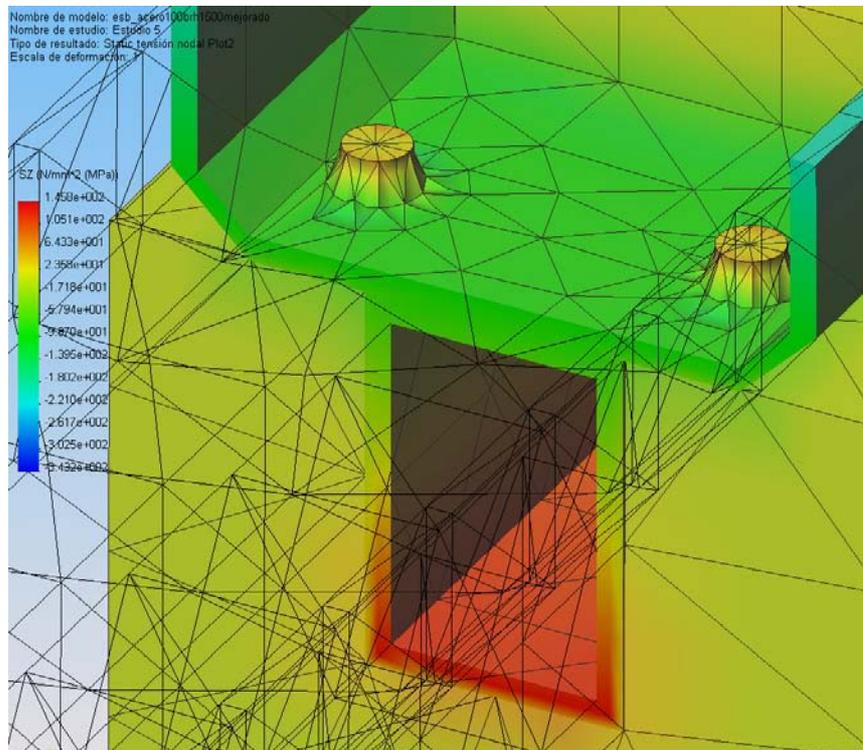


Figura nº 5.51

Cortes consecutivos (separados 1 mm) antes y después de quedar el acero libre de madera en un ensamble de prótesis mejorada sobre madera antigua. Se observa claramente que excepto un leve cambio de tono en la madera los valores del acero son constantes entre ambos puntos.



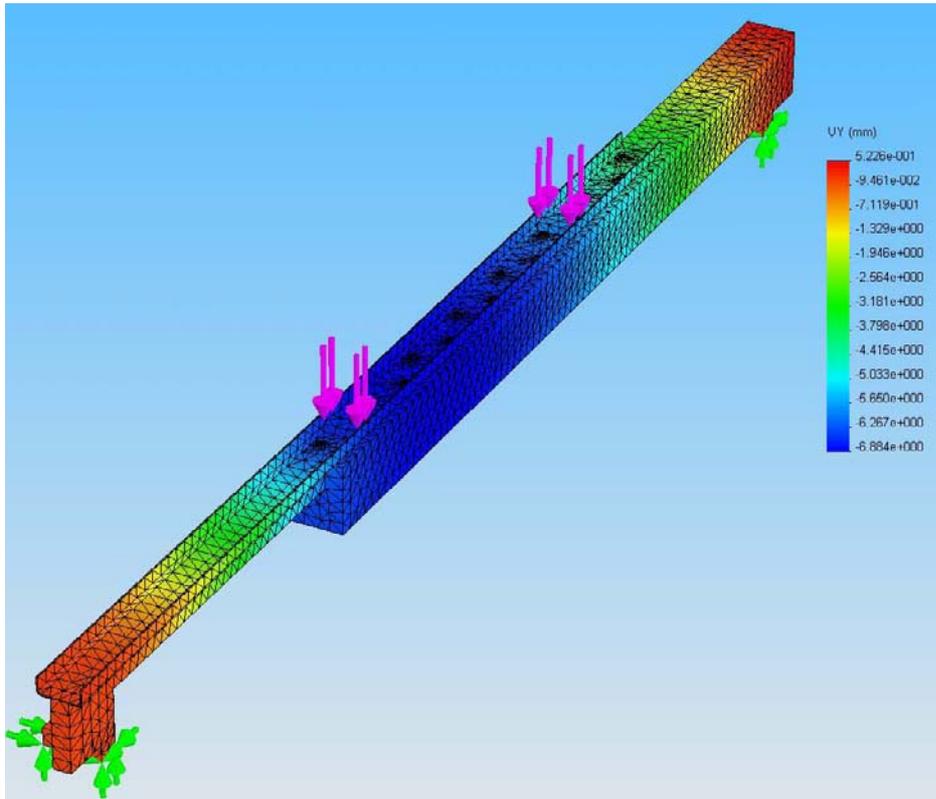
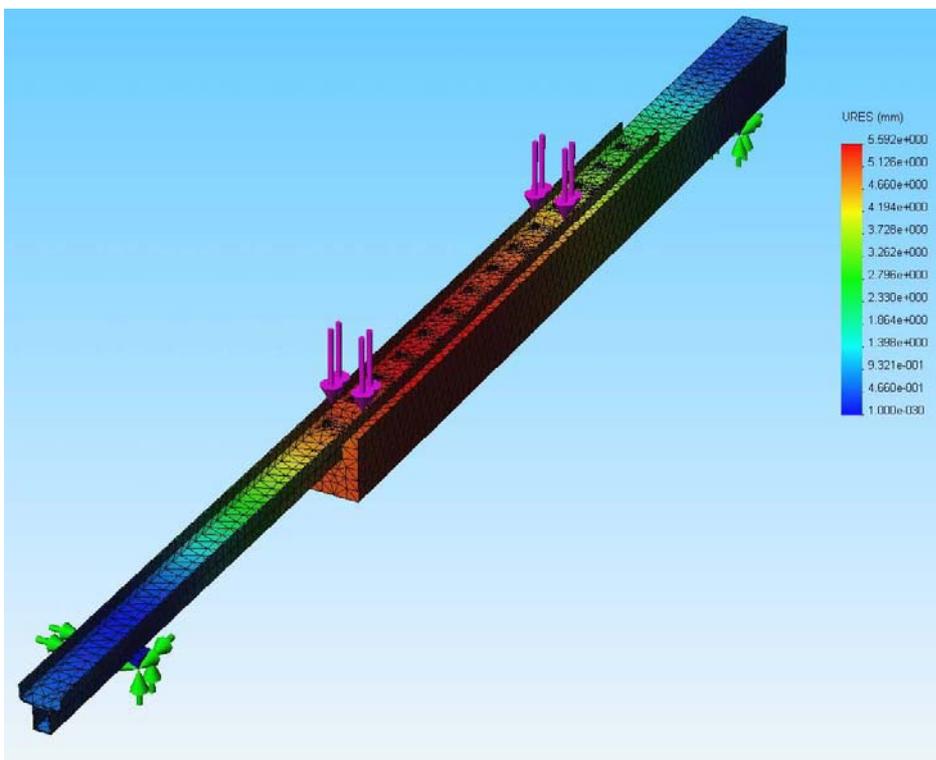


Figura nº 5.52

Comparativa de resultados de desplazamientos verticales en milímetros, entre prótesis ensayada (arriba) y prótesis mejorada (abajo).



Es decir, que utilizando la prótesis mejorada, el comportamiento es el mismo que si toda la pieza de madera estuviera sana.

## 5.2. ENSAYOS DE CAMPO

Una de las finalidades de la investigación llevada a cabo en esta Tesis consiste en la implantación del sistema de refuerzo o prótesis en obras de intervención. Encontrar un edificio que reuniese las características y condicionantes necesarios para aplicar un estudio científico de este tipo fue complicado. La instrumentación en obra ha sido tarea ardua, aunque se consiguieron registrar numerosos datos a través de video y del correspondiente reportaje fotográfico. Las distintas etapas, los cambios y adaptaciones propias de la obra se llevaron a cabo con la celeridad precisa y siguiendo el ritmo propio de la intervención. La viabilidad de los sistemas se basó en los principios de economía, rapidez de montaje y facilidad de los trabajos.

### 5.2.1. Descripción de la obra

El forjado pertenece a una vivienda en la quinta planta de un edificio del centro de Madrid, de más de 120 años de antigüedad. La estructura de forjados es de madera, y los muros de carga, de entramado madrileño. La cubierta inclinada está compuesta por vigas de madera.

El edificio ha tenido en los últimos 10 años numerosas intervenciones en la estructura, cubierta y fachadas. Por lo que refiere a los forjados, algunos paños han sido sustituidos por estructura metálica, en consonancia con la tendencia actual comentada al principio de este trabajo.

La aparición de deformaciones importantes (60 mm) en la zona del baño de la vivienda, motivaron el que se iniciara en la vivienda los trabajos de detección de procesos patológicos y el consecuente análisis de las causas. Para una representación gráfica de los procesos patológicos, véase el **Anexo I**.

Se inició una campaña de calas (**Figura nº 5.53**) que culminó con el levantamiento de todo el solado de la vivienda y su correspondiente capa de agarre. Como ya se indicó no existe en este tipo de forjados capa de compresión o losa superior de forjado.

**Figura nº 5.53**

Cala realizada en forjado de vivienda de la quinta planta. Las deformaciones comprobadas en el suelo del baño motivaron la realización de calas como la mostrada en esta imagen.

Se detectó un ataque por hongos de pudrición parda húmeda, de 10 mm de profundidad en la zona calada. Una de las viguetas próximas a la indicada y muy cercana a la bañera poseía un ataque completo (**Figura nº 5.54**) también por hongos de pudrición.

**Figura nº 5.54**

Ataque por hongos de pudrición parda húmeda en vigueta próxima a la bañera.

A pesar de que la única vigueta totalmente degradada se encontraba en el baño, la obra se prestó a una detección completa de ataques, por lo que, como ya se ha mencionado, se levantó el solado completo. Aparecieron distintos puntos con ataques someros pero sobre todo el forjado en general adolecía de fuertes deformaciones (**Figura nº 5.55**) en distintas zonas de la vivienda, llegándose en algunas hasta los 130 mm.

**Figura nº 5.55**

Zona del salón de la vivienda en la que tras retirar el solado se puede comprobar la gran deformación existente al compararse con la horizontalidad del rodapié.

En general el forjado objeto de estudio (**Figura nº 5.56**) se compone de viguetas de madera de escuadría media 100x130 mm entomizada a la socarrena que se compone de relleno de cascotes y yeso. La separación de nervios es irregular aunque la media se aproxima a los 250 mm.

**Figura nº 5.56**

Viguetas de forjado de madera *pinus*, de escuadría 100x130 mm y socarrena rellena de cascotes mezclado con yeso.

### 5.2.2. Análisis de su capacidad mecánica residual del forjado

En un análisis de la capacidad de la estructura y una vez descubierto el forjado por la cara superior de las viguetas, se realiza el cálculo de los distintos tipos de forjado. En el forjado tiene tres tipos de luces:

$L_1 = 5.000$  mm que corresponde con una luz de cálculo de 4.800 mm.

$L_2 = 4.600$  mm que corresponde con una luz de cálculo de 4.400 mm.

$L_3 = 4.400$  mm que corresponde con una luz de cálculo de 4.200 mm.

En las **tablas 5.4, 5.5 y 5.6** se muestran las características mecánicas de los distintos tipos de forjados.

Tipo forjado	b	h	D <sub>v-v</sub>	I	W	E	C	L
<i>pinus</i>	100	130	200	18.308.333,3	281.666, 7	7.000	14	4.800
<b>q<sub>per</sub></b>	<b>q<sub>uso</sub></b>	<b>Y<sub>m</sub></b>	<b>k<sub>mod-per</sub></b>	<b>k<sub>mod-per + uso</sub></b>	<b>k<sub>def-per</sub></b>	<b>k<sub>def-uso</sub></b>	<b>f<sub>m,k</sub></b>	<b>f<sub>v,k</sub></b>
0,66	0,4	1,3	0,6	0,8	0,6	0,18	14	1,7
<b>M<sub>per</sub></b>	<b>M<sub>per+uso</sub></b>	<b>σ<sub>m,d per</sub></b>	<b>σ<sub>m,d per + uso</sub></b>	<b>f<sub>m,d(per)</sub></b>	<b>f<sub>m,d(per+uso)</sub></b>	<b>V<sub>d (per + uso)</sub></b>	<b>τ<sub>d</sub></b>	<b>f<sub>v,d</sub></b>
2,6	4,3	9,1	15,2	6,5	8,6	3,6	0,4	1,05

**Tabla 5.4. Características mecánicas del forjado de luz L<sub>1</sub>**

Tipo forjado	b	h	D <sub>v-v</sub>	I	W	E	C	L
<i>pinus</i>	100	130	200	18.308.333,3	281.666, 7	7.000	14	4.400
<b>q<sub>per</sub></b>	<b>q<sub>uso</sub></b>	<b>Y<sub>m</sub></b>	<b>k<sub>mod-per</sub></b>	<b>k<sub>mod-per + uso</sub></b>	<b>k<sub>def-per</sub></b>	<b>k<sub>def-uso</sub></b>	<b>f<sub>m,k</sub></b>	<b>f<sub>v,k</sub></b>
0,66	0,4	1,3	0,6	0,8	0,6	0,18	14	1,7
<b>M<sub>per</sub></b>	<b>M<sub>per+uso</sub></b>	<b>σ<sub>m,d per</sub></b>	<b>σ<sub>m,d per + uso</sub></b>	<b>f<sub>m,d(per)</sub></b>	<b>f<sub>m,d(per+uso)</sub></b>	<b>V<sub>d (per + uso)</sub></b>	<b>τ<sub>d</sub></b>	<b>f<sub>v,d</sub></b>
2,2	3,6	7,7	12,8	6,5	8,6	3,3	0,4	1,05

**Tabla 5.5. Características mecánicas del forjado de luz L<sub>2</sub>**

Tipo forjado	b	h	D <sub>v-v</sub>	I	W	E	C	L
<i>pinus</i>	100	130	200	18.308.333,3	281.666, 7	7.000	14	4.200
<b>q<sub>per</sub></b>	<b>q<sub>uso</sub></b>	<b>Y<sub>m</sub></b>	<b>k<sub>mod-per</sub></b>	<b>k<sub>mod-per + uso</sub></b>	<b>k<sub>def-per</sub></b>	<b>k<sub>def-uso</sub></b>	<b>f<sub>m,k</sub></b>	<b>f<sub>v,k</sub></b>
0,66	0,4	1,3	0,6	0,8	0,6	0,18	14	1,7
<b>M<sub>per</sub></b>	<b>M<sub>per+uso</sub></b>	<b>σ<sub>m,d per</sub></b>	<b>σ<sub>m,d per + uso</sub></b>	<b>f<sub>m,d(per)</sub></b>	<b>f<sub>m,d(per+uso)</sub></b>	<b>V<sub>d (per + uso)</sub></b>	<b>τ<sub>d</sub></b>	<b>f<sub>v,d</sub></b>
1,9	3,3	6,9	11,7	6,5	8,6	3,1	0,3	1,05

**Tabla 5.6. Características mecánicas del forjado de luz L<sub>3</sub>**

Siendo:

**b** = Ancho de la vigueta en milímetros

**h** = Canto de la vigueta en milímetros

**D<sub>v-v</sub>** = Distancia entre viguetas en milímetros

**I** = Momento de inercia de la vigueta en mm<sup>4</sup>

**W** = Módulo resistente de la sección respecto de la fibra neutra en mm<sup>3</sup>

**E** = Módulo de elasticidad medio paralelo a las fibras

**C** = Clasificación Estructural

**L** = Luz de cálculo del forjado en mm

**q<sub>per</sub>** = Carga permanente que descansa sobre la vigueta en N/mm

**q<sub>uso</sub>** = Sobrecarga de uso que descansa sobre la vigueta en N/mm

**γ<sub>m</sub>** = Coeficiente parcial de seguridad para el material

**k<sub>mod-per</sub>** = Factor de modificación de la resistencia para carga permanente

**k<sub>mod-per + uso</sub>** = Factor de modificación de la resistencia para carga total

**k<sub>def-per</sub>** = Factor de modificación de la rigidez para carga permanente

**k<sub>def-uso</sub>** = Factor de modificación de la rigidez para sobrecarga de uso

**f<sub>m,k</sub>** = Resistencia máxima a flexión en N/mm<sup>2</sup>

**f<sub>v,k</sub>** = Resistencia máxima a cortante en N/mm<sup>2</sup>

**M<sub>per</sub>** = Momento flector máximo por carga permanente en Nmm

**M<sub>per+uso</sub>** = Momento flector máximo por carga total en Nmm

**σ<sub>m,d per</sub>** = Tensión de cálculo por carga permanente en N/mm<sup>2</sup>

**σ<sub>m,d per + uso</sub>** = Tensión de cálculo por carga total en N/mm<sup>2</sup>

**f<sub>m,d(per)</sub>** = Resistencia de cálculo a flexión por carga permanente en N/mm<sup>2</sup>

**f<sub>m,d(per+uso)</sub>** = Resistencia de cálculo a flexión por carga total en N/mm<sup>2</sup>

**V<sub>d (per + uso)</sub>** = Cortante máximo por carga total en N

**τ<sub>d</sub>** = Resistencia máxima de cálculo a cortante en N/mm<sup>2</sup>

**f<sub>v,d</sub>** = Resistencia de cálculo a cortante en N/mm<sup>2</sup>

Como comentarios a las tablas podemos establecer las siguientes conclusiones.

#### **Del forjado de L<sub>1</sub> :**

La flecha inicial **u<sub>i</sub>** es de 21,6 mm.

La flecha final **u<sub>f</sub>** es de 82,4 mm.

Con la carga permanente, la vigueta está 141% de su capacidad mecánica a flexión.

Con la carga total, la vigueta está 177% de su capacidad mecánica a flexión.

La capacidad mecánica a cortante de la vigueta está al 40%.

#### **Del forjado de $L_2$ :**

La flecha inicial  $u_i$  es de 15,2 mm.

La flecha final  $u_f$  es de 58,2 mm.

Con la carga permanente, la vigueta está 118 % de su capacidad mecánica a flexión.

Con la carga total, la vigueta está 148 % de su capacidad mecánica a flexión.

La capacidad mecánica a cortante de la vigueta está al 36 %.

#### **Del forjado de $L_3$ :**

La flecha inicial  $u_i$  es de 12,6 mm.

La flecha final  $u_f$  es de 48,3 mm.

Con la carga permanente, la vigueta está 108 % de su capacidad mecánica a flexión.

Con la carga total, la vigueta está 135 % de su capacidad mecánica a flexión.

La capacidad mecánica a cortante de la vigueta está al 35%.

### **5.2.3. Estudio de la geometría del forjado**

Antes de plantear el tipo de refuerzo a emplear y conociendo las deformaciones de los tres tipos de forjado, es preciso conocer la geometría del forjado con la finalidad de prever los inconvenientes en la adaptación de sistema en obra.

En la **Figura nº 5.57** podemos comprobar un alzado de la vigueta de  $L_1$ , y de cómo la deformación de la pieza va a determinar entre otras cosas la longitud de los tirafondos a emplear.

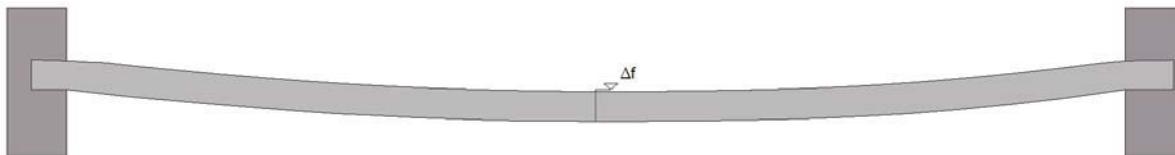


Figura nº 5.57

Alzado de la vigueta de  $L_1$ . El valor de  $\Delta f$  para este paño de forjado es de 21,6 mm en su valor inicial y de 82,4 mm en el final.

Al ensamblarse la pieza metálica, ésta se va a flexionar (al ser atornillada a la madera) para adaptarse a la deformada de la pieza de madera, entrando en carga el acero.

Si observamos la planta de la vigueta tipo (**Figura nº 5.58**) podemos detectar la deformación  $\Delta f$  lateral. Las causas de estas deformaciones las encontraremos en factores como la duración de la carga, las imperfecciones existentes en la madera antes de ser colocada, el efecto de vuelco lateral contenido parcialmente por la socarrena aún fresca en su colocación, el pandeo lateral debido a las compresiones operantes en la mitad superior de la sección de la vigueta de madera, etc.

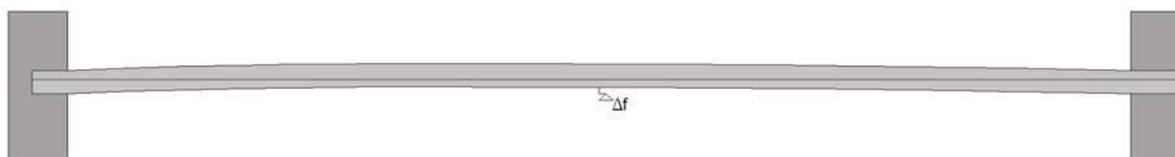
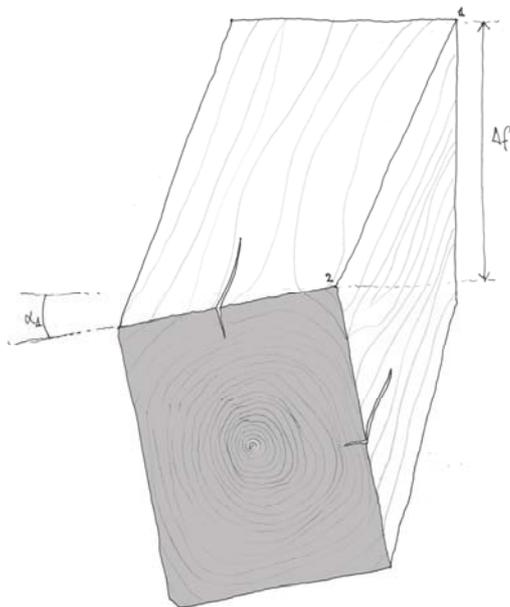


Figura nº 5.58

Deformación de la planta de la vigueta tipo del forjado  $L_1$ .

El fenómeno en cuestión, llamado comúnmente revirado de la estructura, plantea ciertos problemas para la adaptación de la pieza metálica, de fabricación y directriz recta por principio. Es cierto, no obstante, que este efecto de torsión (**Figura nº 5.59**) de la estructura sucede en algunas piezas más que en otras. También sabemos que la deformación por torsión máxima no sucede necesariamente en el centro del vano sino que puede suceder en zonas próximas a los apoyos, lo que avala las razones enunciadas más arriba de la interferencia de factores higo-térmicos junto con los de acciones mecánicas. Pese a ello, en obra se pudieron resolver los problemas de inserción del refuerzo empleado (como veremos en el apartado correspondiente), al replantear la línea de corte de forma que siempre entrara en la cara de la vigueta.

Figura nº 5.59



Torsión de la vigueta de madera de 100x130 mm en donde se puede comprobar las dos deformaciones superpuestas.  $\Delta f$  como deformación vertical y  $\alpha_1$  como deformación angular en la torsión de la pieza.

Para una comprobación de las deformaciones laterales de las piezas del forjado se remite al **Anexo I**.

#### 5.2.4. Tipo de refuerzo empleado

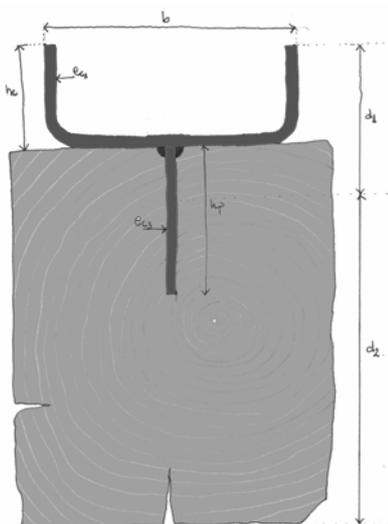
La elección del tipo de refuerzo se realizó en base a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio para las escuadrías de madera antigua. Se optó por una de las variantes ensayadas (**Figura nº 5.60**), aunque con algunos cambios. La pletina superior curvada que queda por encima de la madera fue de 30 mm (**Figura nº 5.61**) para que sirviera de sujeción al mallazo de reparto de diámetro 4 mm, y separación de cuadrícula de 150 mm. De la influencia y adaptación del hormigón como losa superior de forjado se hablará en el apartado de montaje y viabilidad.

Se comprobó en los tres tipos de luces los valores de la tensión máxima de cálculo por el método de homogeneización, dando los siguientes resultados:

**Forjado de  $L_1$**  = Tensión máxima de tracción en la cara inferior de la madera  $\sigma_{\max} = 7,32$  N/mm<sup>2</sup>

**Forjado de  $L_2$**  = Tensión máxima de tracción en la cara inferior de la madera  $\sigma_{\max} = 6,73 \text{ N/mm}^2$

**Forjado de  $L_3$**  = Tensión máxima de tracción en la cara inferior de la madera  $\sigma_{\max} = 5,61 \text{ N/mm}^2$



**Figura nº 5.60**

El refuerzo empleado corresponde a la variante nº 9.1, teniendo en cuenta que la escuadría de la madera es de 100x130 mm.

Espesor pletina inferior  $e_{c3} = 4 \text{ mm}$

Espesor pletina superior  $e_{c1} = 4 \text{ mm}$

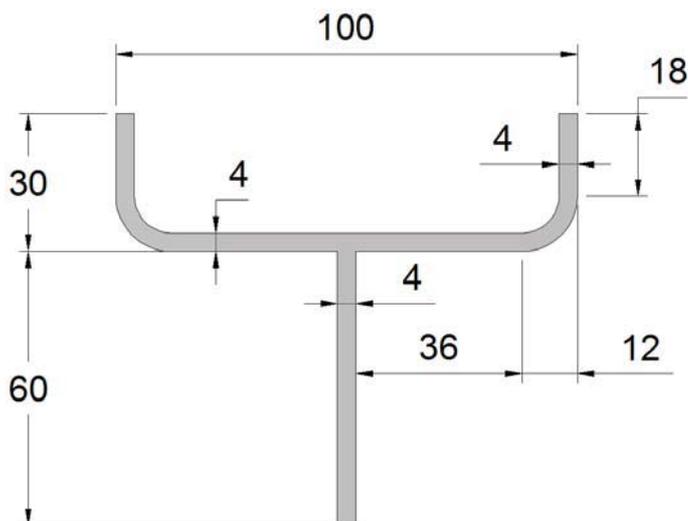
Altura de pletina por encima de la madera  $h_c = 30 \text{ mm}$

Distancia de la fibra neutra a la parte superior de la pieza  $d_1 = 54,91 \text{ mm}$

Peso de la pieza metálica  $6,43 \text{ kg/ml}$

Momento de inercia de la sección homogeneizada respecto del eje  $x$   $I_x = 2.032.619,9 \text{ mm}^4$

Como se puede comprobar en los tres casos, la tensión no supera el valor de la resistencia máxima de cálculo de  $8,6 \text{ N/mm}^2$ . En el forjado de mayor luz, la resistencia de la vigueta trabaja al 85 % de su resistencia, en el intermedio al 78% y en el de menor luz al 65% de su capacidad a flexión.



**Figura nº 5.61**

Refuerzo empleado en los ensayos de campo llevados a cabo en un forjado de viguetas de madera de 100x130 mm de escuadría.

Todos estos valores no cuentan con la ganancia debida a la colaboración del hormigón a compresión por encima de los nervios mixtos de acero-madera.

### 5.2.5. Montaje, adaptación a la obra

Sin duda el momento más interesante de análisis de esta adaptación está en el montaje en obra de las piezas de refuerzo.

Partimos de la base de que para la adaptación a obra, las herramientas serían las mismas que las empleadas en el laboratorio del INIA, habida cuenta de los resultados obtenidos. Se empleó una sierra de disco marca Hitachi de diámetro 90 mm, regulada para que la acanaladura fuera igual a la altura de la pletina que se introduce en la madera (60 mm). La misión de este disco, igual que en los montajes de laboratorio consistió en abrir el canal de la madera para que sirviera de guía en la posterior abertura mediante motosierra.

Los tirafondos empleados, dadas las flechas diferidas de las piezas fueron de cabeza hexagonal, diámetro de la caña 7 mm y longitud 100 mm.

Como losa superior de forjado se empleó hormigón HA-25/B/IIa/20, de peso 20 Kg/m<sup>2</sup> por cada 10 mm de espesor. Para que la losa fuera de mínimo espesor (35-40 mm), se aligeró todo el conjunto mediante hormigón aligerado en los riñones.

A continuación pasamos a exponer las etapas del montaje:

En primer lugar se demuele la entrega de la vigueta de madera en los muros (**Figura nº 5.62**) para poder empotrar a los mismos el refuerzo ensamblado sobre la vigueta.



**Figura nº 5.62**

Picado de la entrega de la vigueta de madera para poder empotrara el refuerzo ensamblado.

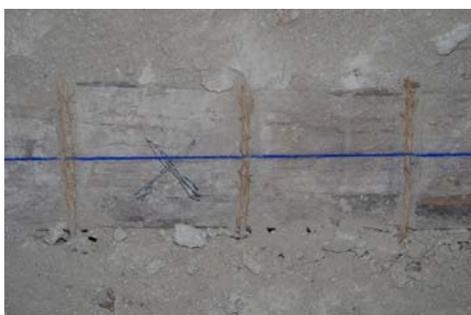
Seguidamente se marca la cara superior de la vigueta (**Figura nº 5.63**), para poder ejecutar la acanaladura.



**Figura nº 5.63**

Marcado con azulina de la cara superior de la vigueta replanteando el lugar de la acanaladura a practicar en la madera.

Hemos de recordar lo señalado en el estudio de la geometría del forjado (**Figura nº 5.64**), dado que en este punto es donde más se acusan las deformaciones laterales de la madera.



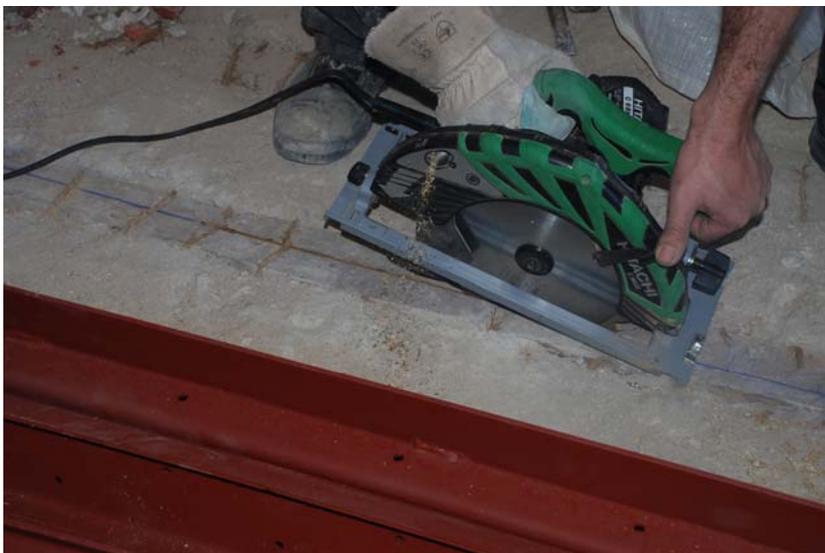
**Figura nº 5.64**

Línea de marcado para replanteo del corte de la madera. En este caso, la línea queda muy centrada en la pieza, siendo esta la situación ideal.

A partir de ese momento se puede practicar mediante disco el primer corte en la madera (**Figura nº 5.65**) que aunque no tendrá el espesor de 4 mm necesario si que llegará a los 60 mm de profundidad para servir de guía a la motosierra.

El disco puede tener alguna resistencia al entrara en la madera por la existencia de nudos interiores o clavos, pero generalmente el corte se ejerce con mucha suavidad, no teniendo que ejercer apenas fuerza hacia abajo ni tampoco en el momento el deslizamiento. Ya se ha comentado la necesidad de calibrar la longitud de corte del disco acorde con la profundidad necesaria de acanaladura. El disco al ir formando la base de acanaladura va cortando a su

paso el entomizado, que se ha de retirar de las proximidades del canal para evitar que entre en el mismo.



**Figura nº 5.65**

Corte con disco siguiendo la línea trazada en azul previamente sobre la cara superior de la vigueta.

Una vez que se ha realizado el primer corte con el disco, en toda la longitud de la pieza se procede al corte mediante motosierra eléctrica (**Figura nº 5.66**). A diferencia del corte con disco, la motosierra si ejerce un esfuerzo hacia arriba que ha de compensarse manualmente con otro en sentido contrario.



**Figura nº 5.66**

Corte mediante motosierra eléctrica. Las manchas negras corresponden a la salpicadura del aceite de engrase de la motosierra.

La facilidad de aplicación de corte con motosierra eléctrica de pequeño tamaño estriba en la posibilidad de acceso a los encuentros con los muros (**Figura nº 5.67**) de forma que se puede llegar hasta la testa de la pieza en muchos casos. Pese a ello, no siempre se llegó a la testa, porque ello implicaba abrir el muro de carga en exceso. El inconveniente se resolvió, como veremos más adelante, sin afectar al comportamiento estructural del conjunto.



**Figura nº 5.67**

Corte mediante motosierra eléctrica en la zona de entrega de las piezas de madera al muro de carga.

Se analizaron los cortes detenidamente a medida que se practicaban (**Figura nº 5.68**), para comprobar que la profundidad era constante en toda la acanaladura. Esa comprobación además pasaba por retirar, como ya se indicó anteriormente, la tomiza del interior de la madera y además las posibles piedrecillas de escombro procedentes de la socarrena.



**Figura nº 5.68**

Comprobación de acanaladura para confirmación de espesor y profundidad necesarios.

Una vez comprobado el corte practicado y en los casos, en los que no fue accesible la testa de la pieza al corte, se practicó un afilado (**Figura nº 5.69**) de la pletina inferior del refuerzo. Esta operación basada en la sobrada resistencia a cortante de la madera en los apoyos, facilitó notablemente los trabajos de ensamble posterior.



**Figura nº 5.69**

Sucesión de imágenes donde se realiza el afilado en obra del refuerzo para su posterior ensamble en la entrega de los muros.

Recordemos que el cordón de soldadura aplicado para unir las dos piezas metálicas (pletina inferior y pletina plegada en la parte superior) del refuerzo, es discontinuo, por lo que para afilar la pletina no es necesario más que cortar uno de los cordones y el ejercicio es bastante rápido.

Para el ensamble de la pieza metálica sobre la vigueta (**Figura nº 5.70**) se manipula entre dos operarios dado el poco peso de la pieza (6,43 kg/ml) y lo reducido de sus dimensiones.



**Figura nº 5.70**

Montaje desde arriba de la pieza metálica sobre la de madera realizado por un operario a cada lado de las misma.

Para que la pletina vertical inferior se introduzca adecuadamente (**Figura nº 5.71**) en el canal practicado fue preciso aplicar una pequeña presión sobre la pieza metálica de forma que se ajusten la geometría del acero y de la madera.



**Figura nº 5.71**

Pieza insertada en la acanaladura practicada en la madera.

Hay que señalar que al estar deformada la madera, la pieza metálica antes de ser atornillada, tiene en el centro del vano una distancia con respecto a la cara superior de la vigueta (**Figura nº 5.72**).



Figura nº 5.72

Distancia entre el refuerzo metálico y la vigueta de madera antes de ser atornillada.

Para comprobar el descenso de la pieza metálica y el micro-ascenso de la madera, se colocó un tirafondos (**Figura nº 5.73**) en la zona de mayor vano, que al ir entrando en carga el metal iba ascendiendo paulatinamente.



Figura nº 5.73

Tirafondos de referencia colocado en el centro del vano.

El atornillado general se realizó alternadamente desde los extremos (**Figura nº 5.74**) hacia el centro para poder ir ganando profundidad en la penetración. Al igual que sucedió en el laboratorio durante el montaje de las muestras ensayadas, se produjo la rotura de tornillos. En obras se resolvió sumergiendo los tirafondos en cera virgen para evitar que al entrar en rozamiento la cabeza hexagonal con la arandela se produjera la rotura por torsión del vástago. Dado que a medida que se atornillaba la pieza los tirafondos se iban levantando<sup>43</sup> (**Figura nº 5.75**) fue necesario apretar varias veces los mismos durante el proceso.

<sup>43</sup> En realidad el efecto que se produce es el descenso del refuerzo de metal al ser atornillado contra la madera. También en algunos casos, se comprobó un cierto ascenso de la pieza de madera al moverse en entrevigado.



Figura nº 5.74

Atornillado de tirafondos desde los extremos hacia el centro de la pieza.

Otro de los efectos que se observó fue el de deformación diferencial propia de los forjados de viguetas que no cuentan con una losa superior de forjado. La deformación diferencial entre las viguetas de madera se vio atenuada sensiblemente al ensamblar los refuerzos sobre las mismas (**Figura nº 5.76**).



Figura nº 5.75

Atornillado de tirafondos desde los extremos hacia el centro de la pieza.

Esta homogeneidad se comprueba en la planta del forjado tras la aplicación del refuerzo que posteriormente se vio refrendada con la capa de hormigón aligerado y estructural de reparto de acciones.

En la **Figura nº 5.76** también se puede comprobar que la entrega de los refuerzos en los muros de carga, no supone un debilitamiento de los mismos. Posteriormente a la apertura y recibido de los refuerzos, se macizaban los huecos (**Figura nº 5.77**) con mortero de cemento para solidificar dicha entrega<sup>44</sup>.

<sup>44</sup> Hay que tener en cuenta que el macizado del extremo de la vigueta implica la existencia de un momento de empotramiento en los extremos. Dicho momento negativo podría aproximarse a  $M_e/4$  siendo  $M_e$  el momento flector máximo en el centro del vano de la vigueta. La

**Figura nº 5.76**

Deformación diferencial entre piezas ya reforzadas de madera.

También la disminución del coeficiente de variación en obra minimiza los comportamientos diferenciales del paño de forjado de madera original, que como se puede observar posee entrevigado de medidas variables (**Figura nº 5.78**).

**Figura nº 5.77**

Paño de forjado reforzado con algunas entregas macizadas y otras abiertas.

También, debido a la poca sección y ligereza de las piezas metálicas, la instrumentación de la obra no se vio afectada por los acopios de material, produciéndose estos en los paños de trabajo. Algo más problemático fueron las longitudes de algunas viguetas, de hasta 5.000 mm.

Es importante mencionar la versatilidad del montaje en obra de los refuerzos, la rapidez y eficacia de los medios, aunque esto será desarrollado en el punto siguiente.

---

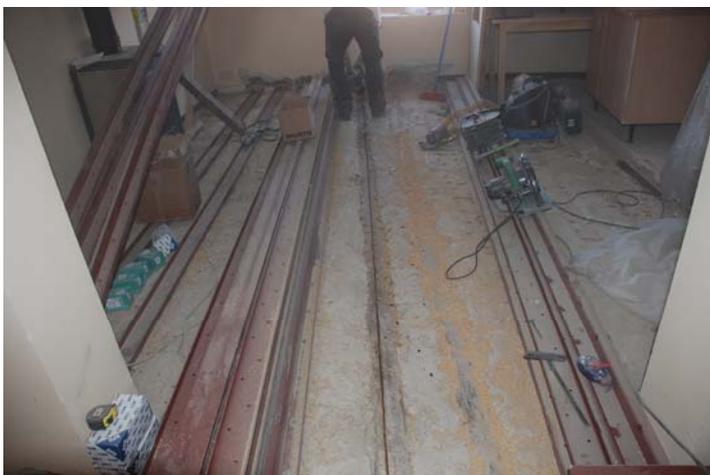
primera consecuencia estriba en la disminución del momento del vano con respecto a la solución ideal teórica biapoyada, que es la ensayada. Esta mejora de la capacidad mecánica redonda positivamente en el funcionamiento de la vigueta al tener en los extremos reforzado el momento negativo gracias a la pieza ensamblada.

---

**Figura nº 5.78**

Refuerzo aplicado donde se puede comprobar la homogeneidad estructural del sistema.

En la **Figura nº 5.79** se puede comprobar el caso de una vigueta con torsión en la que se ha practicado una acanaladura en toda su longitud, no situándose ésta en el centro geométrico de la vigueta. Dado que el refuerzo metálico está en la mayoría de los casos sustituyendo un bloque de compresiones de madera por otro de acero, el material de refuerzo homogeniza las posibles desviaciones impuestas por el montaje regularizando el comportamiento mecánico del conjunto.

**Figura nº 5.79**

Acanaladura practicada en vigueta de 5.000 mm donde se puede comprobar la torsión de la pieza con respecto a la directriz recta del corte.

En los casos de apoyo en jácena o muro de carga intermedio podemos encontrar que la vigueta de madera asoma completamente (**Figura nº 5.80**) mostrando la solución adoptada. Los sistemas constructivos empleados en la época, como se puede comprobar en la planta del forjado (**véase anexo 1**), cambian el sentido del forjado de un paño a otro, con cambio de longitudes de viguetas y acrecentando los problemas de deformaciones. Esto también queda mitigado sensiblemente con la unión de viguetas a través de la losa superior de forjado.



**Figura nº 5.80**

Extremo de vigueta reforzada en el que se observa la profundidad de la acanaladura (60 mm) practicada en la escuadría de madera.

Cómo antes se mencionó, en el centro del vano, los tirafondos quedan parcialmente al aire, a pesar de la deformación adquirida por el refuerzo metálico (**Figura nº 5.81**).



**Figura nº 5.81**

Tirafondos parcialmente al aire en el refuerzo ensamblado.

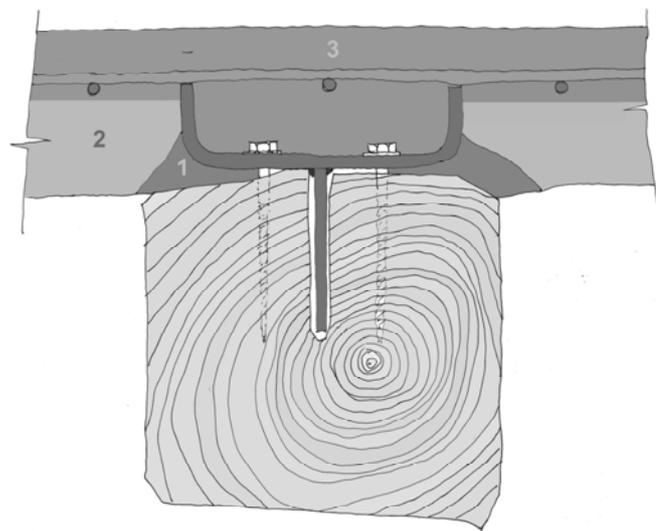
Para evitar que hubiera una zona de los tirafondos que trabajada sin cohesión se procedió al retacado de los laterales del refuerzo (**Figura nº 5.82**) macizando así en esta etapa la sección de acero-madera.



**Figura nº 5.82**

Retacado de los laterales del refuerzo, macizando la sección de acero y madera.

De esta forma se consiguió que los nervios (**Figura nº 5.83**) sumaran a su rigidez la parte de sección de cemento para asumir los posibles esfuerzos rasantes que se transmiten a los tirafondos, evitando así la deformación de la caña del tornillo.



**Figura nº 5.83**

Sección final de vigueta de madera más acero más hormigón. La zona 1 refiere al retacado con cemento en la zona de tirafondos al aire. La zona 2 corresponde con la zona de hormigón aligerado y la zona 3 corresponde con la losa superior de forjado de hormigón armado H25/B/11a/20.

La forma en T del nervio recuerda el de los forjados de hormigón armado, en la que la zona más pesada, la zona de hormigón armado, se reduce sensiblemente respecto de las soluciones de losa sobre viguetas, y las soluciones de conectores. Los nervios se convierten en las líneas estructurales reconstituidas. La madera en la zona de tracciones, y el acero a modo de conector con el hormigón, que queda en la zona de compresiones.

Por tanto y antes de rellenar los laterales de hormigón aligerado, el retacado completa la consolidación de los refuerzos sobre la madera (**Figura nº 5.84**).



**Figura nº 5.84**

Vista de un paño del forjado reforzado en el han sido retacados los laterales del refuerzo por debajo del acero.

El relleno de los laterales (**Figura nº 5.85**) con hormigón aligerado sirve de encofrado de la losa superior de forjado cuando las deformaciones de las viguetas plantean una elástica muy acusada (**Figura nº 5.86**).



**Figura nº 5.85**

Relleno de hormigón aligerado en los laterales de los refuerzos.

El aligeramiento sobre el peso propio del forjado es considerable y constituye, como se desarrollará en el punto siguiente, uno de los elementos fundamentales de la implantación del sistema constructivo en obra.



**Figura nº 5.86**

Relleno de hormigón aligerado sobresaliendo de los nervios de los refuerzos.

El incremento de la capa de aligeramiento puede llegar en algunos casos hasta los 130 mm desde la parte superior del refuerzo. La consistencia de esta capa es suficiente para el vertido del hormigón armado una vez ha endurecido pasadas 24 horas desde su vertido. Ha pesar de ello es común el desprendimiento de las partículas de arcilla (**Figura nº 5.87**) que se limpian del interior del vaso formado por el refuerzo de manera que esa zona la ocupe el hormigón armado como vimos anteriormente

**Figura nº 5.87**

Detalle de relleno de hormigón aligerado en la socarrena del forjado. Desprendimiento de algunas partículas de arcilla procedentes del hormigón aligerado.

Finalmente, y cuidando minuciosamente el espesor de esta última capa, se hace el vertido de hormigón estructural (**Figura nº 5.88**) que funcionará como una losa de reparto de esfuerzos. Esta capa queda perfectamente horizontal y en la zona de socarrena no pasa de 30-40 mm. El armado consiste en una parrilla electro-soldada de acero corrugado de diámetro 4 mm con separación de 150 x 150 mm.

Finalmente podemos concluir en el montaje que los elementos empleados son comunes y de fácil acceso y manipulación sin medios especializados.

**Figura nº 5.88**

Refuerzo aplicado donde se puede comprobar la homogeneidad estructural del sistema.

### 5.2.6. Análisis de costes y viabilidad del sistema

En el análisis del sistema, por lo que a la manipulación y disposición de elementos constructivos se refiere, debemos hacer una breve enumeración de los mismos.

1. Levantado del solado y capa de agarre y extracción de los escombros.
2. Demolición de entregas en muros de carga y posterior tapado con mortero de cemento de dosificación 1:4:4.
3. Refuerzos de acero en los refuerzos, de poco espesor (4 mm) y bajo peso (6,43 kg/ml).
4. Tirafondos de uso habitual en rehabilitación y construcción con madera y de diámetro 7 mm y longitud 100 mm en los ensayos de campo.
5. Corte de la madera con disco portátil de 90 mm de diámetro o inferior.
6. Corte de madera con motosierra de pequeñas dimensiones y alimentada eléctricamente.
7. Mortero de cemento M15, para retacado de los refuerzos lateralmente.
8. Hormigón aligerado para relleno de zona desnivelada y encofrado de la losa superior de forjado.
9. Hormigón armado HA25/B/IIa/20 para reparto de las cargas activas y rigidización del conjunto.
10. Horas de un oficial de segunda y un peón.

**El coste de ejecución material del sistema es aproximadamente está entre 90 y 100 €/m<sup>2</sup>**

Si por otro lado valoramos los trabajos para la sustitución de la estructura tenemos los siguientes elementos:

1. Levantado del solado y capa de agarre y extracción de los escombros.
2. Demolición del forjado, interviniendo en la vivienda superior e inferior simultáneamente y extracción de escombros.
3. Posible apeo de muros de carga al variar el acoplamiento de los mismos.
4. Construcción de forjado de viguetas de hormigón pretensado o acero laminado, con bovedillas de bajo perfil y capa de compresión con mallazo de reparto.
5. Horas de dos oficiales de segunda y dos peones.

**El coste de ejecución material del sistema es aproximadamente está entre 180 y 200 €/m<sup>2</sup>**

La reducción del coste en un 50 % respecto del sistema convencional es una de las ventajas de implantación del sistema constructivo de refuerzo descrito. Sin embargo existen otras facetas del proceso constructivo que a nuestro parecer dinamizan y hacen más eficaz este tipo de reparaciones estructurales. La menor cantidad de escombros generados, con las reducciones de jornales de mano de obra que ello implica. Los factores colaterales a la sustitución del forjado como apeos, acodamientos, influencia sobre estructuras colindantes o propias del edificio o la redistribución drástica de las acciones sobre los elementos portantes.

Además existe un factor de gran importancia en el desarrollo de los trabajos y que constituyó desde un principio una de las condiciones básicas. Los trabajos se realizan por la cara superior sin afectar a la vivienda inferior. Esto implica una política de intervención respetuosa con el edificio, por lo que a los aspectos estructurales anteriores se refiere. El respecto además se plasma en una seguridad añadida en las intervenciones que generalmente se ejecutan por vía de urgencia, al ser necesario en los sistemas convencionales, el acceso a la parte inferior del forjado que suele ser muy problemática<sup>45</sup>.

Por otro lado, si consideramos los sistemas de refuerzo a base de conectores y losa de hormigón con zona aligerada, las cargas de peso propio debido a la mencionada losa son considerables. Teóricamente los espesores van entre 50 y 80 mm. En la realidad de la obra, el incremento de espesor de la capa de hormigón por nivelación de suelos suele oscilar entre un 20 y un 30 % más. Eso supone un espesor añadido respecto de la solución propuesta en esta tesis que oscila entre los 60 y los 105 mm, que en peso se transforma en 1,5 kN/m<sup>2</sup> más de peso propio del forjado.

---

<sup>45</sup> Hemos de recordar que por encima de normativas locales se encuentra lo establecido en la Constitución Española que en su artículo 18.2 reza *El domicilio es inviolable. Ninguna entrada o registro podrá hacerse en él sin consentimiento del titular o resolución judicial, salvo en caso de flagrante delito.*

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Se pretende en este capítulo concluir de alguna forma las ideas, pre-ensayos, ensayos y el retorno a las ideas y diseños que en algún caso ha propiciado el análisis de resultados.

Los refuerzos ensayados ratificaron el comportamiento mecánico de los modelos informáticos. El método de simulación empleando “cálculo por elementos finitos” ha sido, no sólo una *herramienta* de trabajo útil y eficaz, sino que se ha convertido en observador atento y disciplinado desde los bocetos iniciales hasta llegar a criticar juiciosamente los resultados de los ensayos.

Siempre quedó hasta que se realizaron los ensayos esa duda, de la veracidad de los resultados informáticos. Es sano, en nuestra opinión, dudar de la tecnología cuando eso la convierte en herramienta veraz y controlada de la investigación científica.

Con la idea de facilitar la visión de conjunto, hemos agrupado las conclusiones en varios apartados.

### **Sobre la mejora de la capacidad mecánica de los refuerzos.**

Por lo que respecta a la madera laminada la mejora de la capacidad mecánica a flexión es del 45 % respecto de las muestras testigo. Esto implica que como se vio en los primeros capítulos, ante un ataque biótico o abiótico, la pérdida de perímetro puede llegar a ser considerable sin que por ello haya que desechar el material. Por lo que respecta a la rotura, el refuerzo mejora en un 27% la media de la tensión de rotura del testigo pero son los valores característicos (muestral y poblacional) los que superan al testigo en más del 40%.

En la madera aserrada, la mejora del refuerzo, es del doble con respecto a las muestras de testigo. Los resultados tan espectaculares ratifican por tanto un resultado que ya conocíamos pero que parecía optimista en exceso. Bien, la experiencia de laboratorio ha corroborado el buen comportamiento de ambos materiales (acero y madera) trabajando al unísono. En la carga a rotura, la mejora llega al 58 % respecto del testigo siendo los límites de seguridad (Valores característicos), los que mejoran entre el 30 y el 40% según utilicemos valores muestrales o poblacionales.

En la madera antigua obtenemos resultados del módulo de elasticidad un 63% por encima de los valores testigo. Estos datos son quizá los más interesantes al ser este tipo de madera

el que vamos a encontrar en los forjados de los edificios en las intervenciones arquitectónicas. En la carga media de rotura obtenemos mejoras del 38% respecto del testigo y por lo que respecta a los valores de seguridad son de casi el doble.

### **Sobre la mejora de la capacidad mecánica de las prótesis.**

Es importante señalar que la función de la prótesis no es mejorar a la madera sana sino igualarla. Al suplementar la madera mediante una prótesis metálica, queremos que la pieza estructural en cuestión sea mecánicamente igual a si la madera colocada fuera sana y sin ataque en la punta.

En la madera laminada la prótesis llega al 75% del valor obtenido en el testigo. Esto nos hace plantearnos la necesidad de rediseñar la prótesis para alcanzar los valores del testigo. Pese a ello la prótesis está aportando estabilidad ante el posible desplome como se desprende de los ensayos.

En la madera de sierra la prótesis llega al 90% disminuyendo además al 58% la variabilidad del material con el consecuente aporte de fiabilidad a la estructura.

La madera antigua tiene una respuesta por encima del 90% respecto del obtenido en testigos, no siendo estadísticamente significativa la diferencia testigo-prótesis.

Por lo que respecta al análisis de rotura de las piezas de madera suplementadas con prótesis metálicas, no son relevantes por cuanto los ensayos no son apropiados al tipo de estructura analizada. Pese a ello, y tras la mejora de la prótesis podemos augurar que los resultados de los ensayos sobre estas prótesis igualarían sino mejorarían al propio testigo.

### **Sobre el montaje en obra**

La adaptación a obra del sistema de refuerzo similar al empleado en las muestras de madera antigua de los ensayos de laboratorio a resultado muy óptimo. El montaje ha sido rápido y sencillo de medios. Se han empleado los mismos pasos que en laboratorio sin incidencias. El refuerzo ha cumplido su misión y ha posibilitado incluso el estudio de una sección compuesta por tres materiales. La existencia de madera, acero y hormigón

redistribuye las tensiones de forma que los materiales más capaces asumen los esfuerzos correspondientes a sus propiedades mecánicas. Madera en las tracciones, acero a modo de conector y hormigón en las compresiones.

### **Sobre los costes y viabilidad del sistema**

El sistema propuesto se ha demostrado como el más económico con diferencia respecto del convencional. Así mismo redundaba en su economía la intervención por una única zona del forjado (la superior), haciendo acumulativas las reducciones de mano de obra escombros generados, etc.

Así mismo se ha comprobado que la eficacia de la implantación en obra resulta apta para mano de obra no especializada, reduciendo aún más los costos de trabajo.

## **CAPÍTULO 7. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

Son varias las vías de investigación que se abren a partir de este trabajo y que pasamos a enumerar:

- Ensayos de Laboratorio y de campo de las prótesis mejoradas.
- Estudio del comportamiento mecánico de variantes descritas con longitudes menores de refuerzo sobre la madera.
- Estudio sobre vigas prefabricadas de acero-madera nueva.
- Ensayos de laboratorio orientados a analizar dimensiones de tirafondos, separaciones, espesores de chapas de acero, etc.
- Ensayos con chapa conformada en frío con y sin capa de compresión.
- Ensayos de viga madera-acero-hormigón con las secciones y dimensiones llevadas a cabo en obra para comprobar límites de agotamiento y luces máximas.



**Abásolo, Andrés** (1998).

Reparación de estructuras leñosas. Capítulo III. Patología y Técnicas de intervención. Elementos estructurales. Tratado de Rehabilitación. DCTA.

**Alam, P. et al.** (2006).

Repair of fractured spruce beams with bonded-in reinforcements. 9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering WCTE 2006.

**Akbiyik, A. et al.** (2007).

Feasibility investigation of the shear repair of timber stringers with horizontal splits. Construction and buildings materials (2007) 991-1000.

**Argüelles Álvarez, Ramón** (1975).

La estructura metálica hoy. Vol. I. Bellisco. Madrid.

**Argüelles Bustillo, Ramón** (1994).

Predicción con simulación animada del compartimento de piezas de madera. ETSIM. Tesis Doctoral.

**Argüelles Bustillo, Ramón** (1999).

Predicción con simulación animada del comportamiento de piezas de madera. Tesis Doctoral. ETSIM-UPM.

**Argüelles, Ramón y Arriaga, Francisco** (1996).

Estructuras de madera. Diseño y cálculo. AITIM. Madrid.

**Arriaga, F. et al.** (1992).

Estructuras de madera: Restauración. Estudio experimental de la capacidad resistente de forjados realizados con vigas de madera. Memoria del Proyecto de Investigación PAT 90-0224. Vol. I.

**Arriaga, F. et al.** (2005 b).

Assessment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don). Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Hannover.

**Arriaga, F., Esteban, M., y Relea, E.** (2005).

Evaluation of the load carrying of large cross section coniferous timber in standing structures. Materiales de Construcción. Vol. 55, nº 280, pp: 43-52.

**Arriaga, F., Íñiguez, G. y Esteban, M.** (2005).

Assessment of strength and stiffness properties using longitudinal stress wave on structural gross cross section timber of radiata pine (*pinus radiata* D.Don). Proceedings of the 14th International symposium on Nondestructive Testing of wood. Hannover.

**Arriaga, Francisco; Peraza, Fernando; Esteban, Miguel; Bobadilla, Ignacio y García Fernández, Ignacio** (2002).

Intervención en estructuras de madera. AITIM. Madrid.

**Ayerst, G.** (1969).

The effect of moisture and temperature on growth and spore germination of some fungi. Journal of Stored Products Research 5, 127-141.

**Basterra, A. et al.** (2006).

Técnicas de ensayo pseudo no destructivas en madera estructural mediante extracción de tornillos. Recopar, 2.

**Beck-Anderson, J.** (1987).

Productions, function and neutralization of oxalic acid produced by the dry rot fungus and other brown-rot fungi. International Research group of wood Preservation.

**Bekhata, P. et al.** (2000).

The study of sound propagation in the wood-based composite materials. 12th International Symposium on Non-Destructive Testing of wood.

**Böstrom, L.** (1994).

Machine strength grading: comparison of four different systems. Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology SP Report 49,

**Böstrom, L.** (1999).

Determination of the modulus of elasticity in bending of structural timber comparison of two methods. Swedish National Testing and Research Institute, Holz als Roh-und Werkstoff, 57.

**Bucur, v. y Archer, R.R.** (1984).

Elastic constants for wood by an ultrasonic method. Wood Science and Technology 18. 255-265.

**Capuz Lladró, R.** (2006).

Dry-Parasite. Protección y sistema de tratamiento de la madera. Escuela Técnica Superior de Gestión de la Edificación.

**Chiltón, J.C.** (1995).

History of timber Structures. Timber Engineering (STEP 2) Salland De Lange. Deventer (Netherlands), 1995.

**Clausen, C.A. y Green, F.** (2003).

Oxalic acid over production by copper-tolerant brown-rot basidiomycetes on southern yellow pine treated with copper-based preservatives. International Biodeterioration and Biodegradation 51, 139-144.

**Coswling, E.B. y Brown. W.** (1969).

Structural features of cellulosic materials in relation to enzymatic hydrolysis. In cellulases and their Applications. Hajny and Roese.

**Cowlig, E.B.** (1961).

Comparative biochemistry of the decay of sweetgum sapwood by white-rot and brown-rot fungi. Department of Agriculture, Washington.

**CTE. Real Decreto 314/2006.**

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico. Seguridad Estructural. Madera.

**Curry. W.T. y Tory, J.C.** (1976).

The relation between the modulus of rupture-ultimate bending stress and modulus of elasticity of timber. Princes Risborough Laboratory.

**Díez, M.R. y Fernández-Golfín, J.I.** (1998).

Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *Pinus Sylvestris*, L. Revista de Investigación Agraria.

**Díez, M.R. et al.** (2001).

Rendimiento de madera estructural en función del diámetro en punta delgada de las trozas de aserrío. III Congreso Forestal Español de Granada.

**Díez, M.R., Fdez.-Golfín, J.I. y Hermoso, E.** (2001).

Causas de las deformaciones en madera estructural de *Pinus nigra*. Revista de Investigación Agraria 10 (2).

**Divos, F.** (2002).

Portable Lumber grader. 13<sup>th</sup> International Symposium on Non-destructive Testing of wood. Berkeley, California. USA.

**EC5. UNE ENV 1995-1-1.**

Eurocódigo 5: Proyecto de Estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación.

**Esteban Herrero, Miguel (2003).**

Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escudería y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera. Tesis Doctoral. ETSIM-UPM.

**Fernández Alba, Antonio (1997).**

Relaciones entre Patrimonio Histórico-Arquitectónico y Proyecto de arquitectura. Teoría e Historia de la Restauración. A.A.V.V. Munilla-Lería. Madrid.

**Fernández-Cabo, José L., Ávila Nieto, Miguel y López-Rodríguez, Gamaliel (2006).**

A parametric study on the load-bearing capacity of a dowel connection under static load: the definition and variables of the optimal slenderness. 9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering WCTE 2006.

**Fernández-Cabo, J.L. et al. (2006).**

A parametric study on the load-bearing capacity of a dowel connection under static load: the definition and variables of the optimal slenderness. 9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering WCTE 2006.

**Fernández-Golfín, J.I. et al. (2000).**

Caracterización de la madera de pinus nigra subsp. Salzamannii. Informe final del Proyecto SC96-045-C.2.

**Feynman, Richard P. (1999).**

Qué significa todo eso. Reflexiones de un científico-ciudadano. Drakontos. Barcelona.

**Flournoy, D.S. et al. (1991).**

Changes in pore size and pore volume in wood decayed by the brown-rot fungus *Postia placenta*. *Holzforschung* 45 (5), 383-388.

**Gadd, G.M. (1993).**

Interactions of fungi with toxic metals. *New Phytologist* 124, 25-60.

**García Esteban, Luis; Guindeo Casasús, Antonio; Peraza Oramas, César y de Palacios de Palacios, Paloma (2003).**

La madera y su anatomía. AITIM. Madrid.

**Gotoh, M.** (1978).

A theory of plastic anisotropy based on a yield function of fourth order (plane stress state) Int. J. Mech. Sci., 19:505-20.

**Gotoh, M.A.** (1978).

Theory of plastic anisotropy based of a yield function of fourth order (plane stress plete) Int. J. Mech. Sci., 19. 505-520.

**Green III, F. y Highley, T.L.** (1996).

Mechanism of Brown-Rot Decay: Paradigm or Paradox. International Biodeterioration and Biodegradation. Vol. 39. nº 2-3, 113-124.

**Green, F. III et al.** (1992).

Immunoscanning electron microscopic localization of extracellular polysaccharides within fibrillar sheath of the brown-rot fungus *Postia placenta*. Canadian Journal of Botany, 38, 898-904.

**Green. III, F. et al.** (1989).

Proposed model for the penetration and decay of wood by the hyphal sheath of the brown-rot fungus, *Postia placenta*. International Research group of wood Preservation.

**Grethlein, H.E.** (1985).

The effect of pore size distribution on the rate of enzymatic hydrolysis of cellulose substrates. Biotechnology, 3. 155-160.

**Haiman, Miljemko** (2004).

30 analysis of timber structures.

**Hausen, L.S. y Vang Tensen, K.** (1996).

Upper lethal temperature limits of the common furniture Beetle *Admission punctatum* (Coleoptera Anobiidae). International Biodeterioration and Biodegradation. 225-232.

**Hermoso Prieto, Eva** (2003).

Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus nigra sylvestris* L. CIFOR-INIA. Tesis Doctoral.

**Hermoso, E., Fernández-Golfin, J.I. y Díez, M.R.** (2001).

Análisis del factor de altura RH en la madera aserrada estructural de pino silvestre. III Congreso Forestal Español de Granada.

**Highley, T.L.** (1978).

How moisture and pit aspiration affect decay of wood by white-rot and brown-rot fungi. *Material and Organismen*, 13 (3), 198-206.

**Highley, T.L. y Murmanis, L.L.** (1987).

Micromorphology of degradation in western hemlock and sweetgum, by the white-rot fungus *Coriolus versicolor*. *Holzforschung*, 41, 67-71.

**Hill, R.** (1950).

The matemaical theory of plasticity. Oxford, N.Y. Oxford university Press.

**Hill, R.** (1950).

The matematical theory of elasticity. Oxford, N.Y.

**Hirt, R.R.** (1949).

A isolate of *Poria xantha* on media containing copper. *Phytopatologist* 39, 31-36.

**Hong, Jung-Pyo and Barrett J. David** (2006).

Empirical wood material model for three dimensional finite element analysis of a nail joint.

**Hong, Jung-Pyo anda Barrett J. David** (2006).

Empirical wood material model for three dimensionel finite element analysis of a mail joint. Proceeding of the 15<sup>th</sup> International syposium on Nondestructive testing of wood.

**Íñiguez, G.** (2007).

Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de conífera de gran escuadría para uso no estructural. ETSIM. Tesis Doctoral.

**Johansen, R.W.** (1949).

Theory of Timber Conections. *IABSE*, 9 (249-262).

**Kharonf et al.** (2003).

Elasto-plastic modeling of wood bolted conections. *Computers and structures*, 81, 747-754.

**Kharouf, N. et al.** (2003).

Elastic-plastic modeling of wood bolted connections. *Computers and Structures*, 81, 747-754.

**Kollman, F. y Krech, H.** (1960).

Dynamische messungen der elastischen Holzcingschafter und der Dampfuny. Holz als Round Werstoff. 18.

**Kolman, F.** (1959).

Tecnología de la madera y sus aplicaciones. I.F.I.E. Madrid. Mº Agricultura.

**Kraemer Koeller, Gustav** (1958).

Compendio de la conservación de maderas. Santander.

**Kuo, M. et al.** (1988).

Microscopy of progresive decay of cottonwood by the brown-rot fungus gloeophyllum trabeum. Wood and Fiber Science, 20, 405-414.

**Lasheras Merino, Félix** (1998).

Patología de la madera. Capítulo III. Recuperación de Estructuras de madera. Patología y Técnicas de intervención. Elementos Estructurales. Tratado de Rehabilitación. DCTA-UPM. Madrid.

**Lee et al.** (2003).

Development of a metlodology for a simplified finite element model and optimus desing. Computers and Structures 81, pp. 1449-1460.

**Lee, K.W. et al.** (2003).

Development of a methodology for a simplified finite element model and optimun desing. Computers and structures 81. 1449-1460.

**Leonowicz, A. et al.** (1999).

Biodegradation of ligmin by white Rot fungi. Fungal genetics and Biology, 27; 175-185.

**Liotta, Giovanni** (2000).

Los insectos y sus daños en la madera. Nerea. Hodarribia. Guipuzcua.

**Lobjois, Ch.** (2004).

Uniones y soldaduras. Barcelona.

**Lorsen, M. y Green, F.** (1992).

Microfibrillar cell wall extensions in the hyphal sheath of Postia placenta, Canadiam Journal of Botany, 38, 905-911.

**Madsen, B. y Nielsen, L.F.** (1992).

Structural behaviour of timber. Appendix: The theory of wood as a cracked visco-elastic material. Timber Engineering. L.T.D.

**Maldonado, Luis** (1999).

Toma de datos en patología constructiva. Capítulo II. La documentación técnica. Metodología de la restauración y de la rehabilitación. Tratado de rehabilitación. DCTA-UPM. Madrid.

**Maldonado, Luis y Vela Cossío, Fernando** (1998).

De Arquitectura y Arqueología. Madrid.

**Maldonado, Luis; Rivera Gámez, David y Vela Cossío, Fernando** (2002).

Arquitectura y Construcción con tierra. Tradición e innovación. Madrid.

**Martin, L., et al.** (2006).

Pre-stressed FRP for the in-situ strengthening of timber structures. 9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering WCTE 2006.

**Martínez Calzón, J. y Ortíz Herrera, J.** (1950).

Construcción mixta. Hormigón-Acero. Ed. Rueda. Madrid.

**Mizumoto, S** (1965).

The effect of decay caused by gloeophyllum trabeum on the strength properties of Japanese red pine sapwood. Journal of the Japanese forestry Society. 48 (1), 7-11.

**Monjo Carrió, Juan** (1999).

La Patología y los estudios patológicos. Capítulo II. Metodología de la Restauración y de la Rehabilitación. Tratado de Rehabilitación. DCTA.-UPM. Madrid.

**Monjo Carrió, Juan y Lacambra Montero, Joaquín** (2007).

El Detalle Constructivo en Arquitectura. Manual para la Redacción de Proyectos y Dirección de Obras. Volumen I. Munilla-Lería. Madrid.

**Monjo Carrió, Juan y Maldonado, Luís** (2001).

Patología y Técnicas de Intervención en Estructuras Arquitectónicas. Munilla-Lería. Madrid.

**Nielsen, K.F.** (2003).

Review: mycotoxin production by indoor molds. Fungal genetics and Biology 39,103-117.

**Nielsen, K.F.; Holm, G.; Utrupm L.P. y Nielsen, P.A.** (2004).

Mould growth on building materials under low water activities. Influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism. *Internacional Biodeterioration and Biodegradation* 54.325-236.

**Nuere Matauco, Enrique** (2003).

La carpintería de armar española. Instituto Español de Arquitectura. Munilla-Lería. Madrid.

**Peraza Sánchez, Fernando** (2001).

Protección preventiva de la madera. AITIM. Madrid.

**Rahman, M.U. et al.** (1984).

An iterative procedure for finite-element stress analysis of frictional contact problems. *Computers and Structures*. Vol. 18, 947-954.

**Rahman, M.U., Rowlands, R.E. y Cook, R.D.** (1984).

An iterative procedure for finite-element stress analysis of frictional contact problems. *Computers and structures*. Vol. 18, nº 6, pp 947-954.

**Ramón y Cajal, Santiago** (1941).

Reglas y consejos sobre investigación científica. Los tónicos de la voluntad. Espasa Calpe. Madrid.

**Richards, D.B.** (1954).

Physical changes in decaying Wood. *Journal of forestry* 52, 260-265.

**Rodríguez, I. et al.** (2007).

Estudio del contenido de humedad de vigas de madera de distintas especies por medio de la técnica no destructiva del georradar. Valencia.

**Ross, R.J. y Hunt, M.O.** (2000).

Stress wave timing non-destructive evaluation tools for inspecting historic structures. A guide for use and interpretation. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-119. Madison, WI: Us Department of Agriculture Forest Service. Forest Products Laboratory.

**Sandoval Solis, M.L.** (2006).

Métodos interactivos eficientes para problemas de convección-difusión transitoria. UPC. Tesis Doctoral.

**Smedley, D., et al.** (2006).

George Street, St. Albans, UK – a case study in the repair of historic timber structures using bonded-in pultruded plates. 9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering WCTE 2006

**Smith, W.F.** (2004).

Ciencia e Ingeniería de Materiales. McGraw-Hill 81. 1449-1460.

**Sokal, R.R. y Rohlf, F.J.** (1979).

Biometría. Blume Ediciones. Madrid.

**Steel, R.G.G. y Torrie, J.H.** (1985).

Bioestadística. Mc Graw Hill. Bogotá.

**Tampone, Genaro** (1996).

Il Restauro delle structure di legno. Hoepli. Milano. Italy.

**Timoshenko, S.** (1976).

Resistencia de materiales. Vol. I. Espasa Calpe. Madrid.

**Tanaka, H. et al.** (2006).

Evaluation of bucking strength of hybrid timber columns reinforced with steel plates and carbon fiber sheets. 9<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering WCTE 2006.

**Toole, E.R.** (1971).

Reduction in crushing strength and weight asociated with decay by rot fungi. Wood sciencie, 3 (3)172-178.

**Ucar, G.** (1990).

Pretreatment of poplar by acid and alkali for enzymatic hidrolisis. Wood Science and Technology, 24, 171-180.

**Villanueva Domínguez, Luis de** (2000).

Compatibilidad de materiales en la construcción. XII Master en Restauración Arquitectónica. Curso de Patología de la Edificación y Técnicas de Intervención. DCTA-ETSAM-UPM.

**Vázquez, Manuel y López, Eloísa** (2001).

El método de lo elemento finitos aplicando al análisis estructural. Editorial Noela. Madrid.

**Wang, X. et al.** (2001).

General non-destructive evaluation techniques for assessing stiffness and moe of small-diameter logs. Res. Raper IPL-RP-600. Medison, WI: Us Departament of Agriculture, Forest Service. Forest Products laboratory.

**Williams, J.M. et al.** (2000).

Failure modeling of sawn lumber with a fastener hole. Finite Elements in Analysis and Desing, 36, 83-98.

**Willians et al.** (2000).

Failure modeling of sawn lumber with a fasteuer lole. Finite Elements in Analysis and Desing. 36, pp. 83-98.

**Wood Handbook** (1998).

Wood as an Engineering Material. USDA. Forest Service, Forest Products laboratory, Madison WI.

**Wood, Lyman W.** (1947).

Behaviour of wood under continued loading. Eugineering News. Record, Vol. 139, nº 24.

**Zevi, Bruno** (1991).

Saber ver la arquitectura. Poseidón. Barcelona.

### **Normativa**

**UNE ENV 1995-1-1.**

Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera.

**UNE EN 408, 1999.**

Madera estructural. Madera estructural y laminada. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.

**DIN 571:1986.**

Hexagon head screws.

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA  
ARQUITECTÓNICA**



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE ARQUITECTURA DE MADRID**

**RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN  
PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN  
ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA  
CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS  
METÁLICAS.**

**ANEXO DOCUMENTAL**

**TESIS DOCTORAL (TOMO II)**

**CARLOS GONZÁLEZ BRAVO**

**Arquitecto**

**Director: LUIS MALDONADO RAMOS**

**Codirector: MODESTO RAFAEL DÍEZ BARRA**

**2007**

## INDICE ANEXO II

TABLAS DE RESULTADOS MADERA LAMINADA	4
TABLAS DE RESULTADOS MADERA ASERRADA	5
TABLAS DE RESULTADOS MADERA ANTIGUA	6
FICHAS DE LAS PIEZAS DE LABORATORIO ENSAYADAS CON REFUERZO O PRÓTESIS	7
FICHA DE ENSAYOS DE CAMPO	38



**RESULTADOS DE LAS PIEZAS DE MADERA LAMINADA**

VIGA	Subgrupo	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	Carga Rotura	Tensión rotura	Aplicación			
LAM_01	1	10.707	7.943	27,5	13,7	PRÓTESIS			
LAM_03	1	11.401	8.253	27,6	13,8	PRÓTESIS			
LAM_04	1	10.188	7.111	25,5	12,8	PRÓTESIS			
LAM_07	1	10.857	8.378	29,1	14,6	PRÓTESIS			
LAM_08	1	11.603	<b>10.951</b>	8.375	<b>8.012</b>	27,7	13,8	<b>13,7</b>	PRÓTESIS
LAM_02	2	11.252	10.916	81,0	40,5	TESTIGO			
LAM_05	2	10.469	10.095	59,3	29,6	TESTIGO			
LAM_10	2	10.206	9.634	67,9	33,9	TESTIGO			
LAM_14	2	11.710	11.437	82,7	41,3	TESTIGO			
LAM_15	2	11.560	<b>11.039</b>	11.122	<b>10.641</b>	95,4	47,7	<b>38,6</b>	TESTIGO
LAM_06	3	10.211	13.418	93,0	46,5	REFUERZO			
LAM_09	3	10.393	23.210	87,4	43,7	REFUERZO			
LAM_11	3	12.006	17.733	128,0	64,0	REFUERZO			
LAM_12	3	11.385	15.635	117,3	58,7	REFUERZO			
LAM_13	3	11.617	<b>11.122</b>	14.307	<b>16.861</b>	100,8	50,4	<b>52,7</b>	REFUERZO

## RESULTADOS DE LAS PIEZAS DE MADERA ASERRADA

VIGA	Subgrupo	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	Carga Rotura	Tensión rotura	Aplicación			
SIERRA_02	3	7.582	14.971	67,2	33,6	REFUERZO			
SIERRA_06	3	10.747	18.951	144,9	72,4	REFUERZO			
SIERRA_11	3	7.103	14.634	87,5	43,7	REFUERZO			
SIERRA_12	3	6.299	13.729	83,8	41,9	REFUERZO			
SIERRA_13	3	8.507	<b>8.048</b>	17.353	<b>15.928</b>	106,0	53,0	<b>48,9</b>	REFUERZO
SIERRA_03	2	7.253	7.003	46,4	23,2	TESTIGO			
SIERRA_04	2	7.872	8.317	65,9	33,0	TESTIGO			
SIERRA_09	2	7.037	6.869	50,5	25,2	TESTIGO			
SIERRA_14	2	8.359	8.214	61,9	31,0	TESTIGO			
SIERRA_15	2	9.158	<b>7.936</b>	9.210	<b>7.923</b>	84,7	42,3	<b>30,9</b>	TESTIGO
SIERRA_01	1	7.383	7.303	28,1	14,1	PRÓTESIS			
SIERRA_05	1	7.091	6.665	26,5	13,2	PRÓTESIS			
SIERRA_07	1	8.075	7.247	27,1	13,5	PRÓTESIS			
SIERRA_08	1	7.880	6.970	26,3	13,1	PRÓTESIS			
SIERRA_10	1	8.868	<b>7.859</b>	8.061	<b>7.249</b>	28,3	14,2	<b>13,6</b>	PRÓTESIS

## RESULTADOS DE LAS PIEZAS DE MADERA ANTIGUA

VIGA	Subgrupo	E <sub>1</sub>	Media	E <sub>2</sub>	Media	Carga Rotura	Tensión rotura		Aplicación
ANTIGUA_01	1	6.251		6.099		6,8	6,5		PRÓTESIS
ANTIGUA_14	1	6.532		5.202		10,8	9,2		PRÓTESIS
ANTIGUA_05	1	7.578		6.959		9,5	9,7		PRÓTESIS
ANTIGUA_15	1	8.665		6.921		10,5	10,6		PRÓTESIS
ANTIGUA_12	1	4.219	<b>6.649</b>	8.887	<b>6.814</b>	9,4	12,7	<b>9,7</b>	PRÓTESIS
ANTIGUA_09	3	4.188		10.857		20,7	20,4		TESTIGO
ANTIGUA_08	3	6.564		13.296		33,1	36,3		TESTIGO
ANTIGUA_02	3	7.159		11.280		55,0	37,5		TESTIGO
ANTIGUA_04	3	8.749		15.368		59,5	50,4		TESTIGO
ANTIGUA_03	3	4.445	<b>6.221</b>	8.973	<b>11.955</b>	32,0	25,5	<b>34,0</b>	TESTIGO
ANTIGUA_10	2	3.988		4.219		12,9	10,1		REFUERZO
ANTIGUA_13	2	6.167		7.225		36,8	25,9		REFUERZO
ANTIGUA_06	2	6.927		7.113		26,0	23,6		REFUERZO
ANTIGUA_11	2	6.975		7.580		38,6	24,5		REFUERZO
ANTIGUA_07	2	10.370	<b>6.885</b>	10.521	<b>7.332</b>	43,5	39,0	<b>24,6</b>	REFUERZO

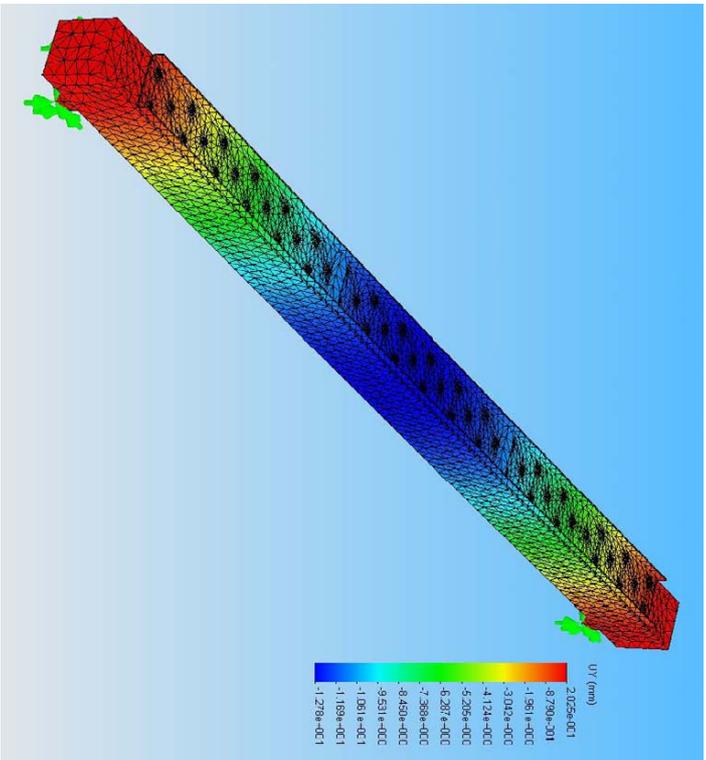
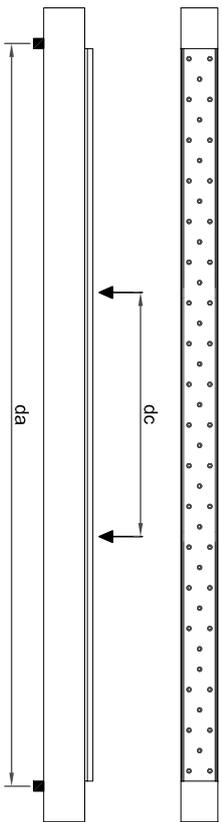
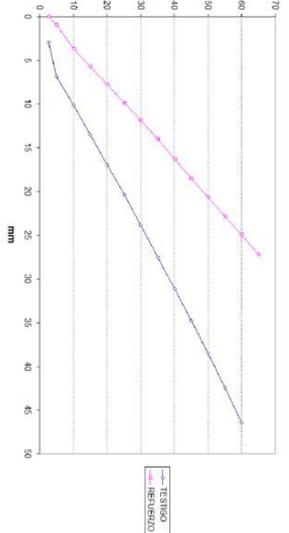
FICHAS DE LAS PIEZAS DE LABORATORIO ENSAYADAS CON REFUERZO O  
PRÓTESIS

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	10211
E(Rad)	785,46
E(Tang)	486,24
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00



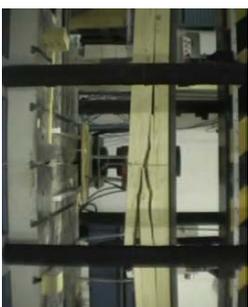
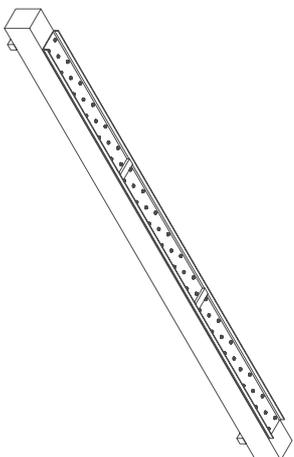
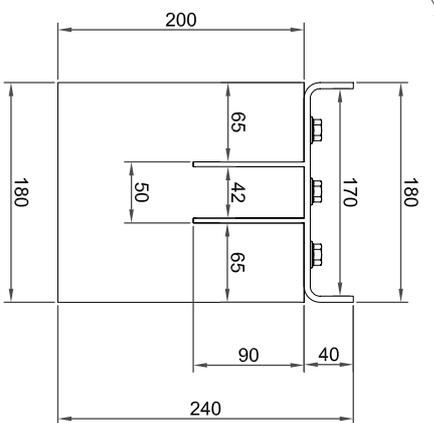
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	93,00
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,68
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,51
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	10211
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	13418
MOR (MPa)	465,50
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C22
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C35

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	3991
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	13,8

ROTURA	
Rotura tercio central	SI
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-

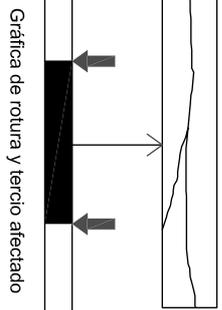


RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: LAM-06

LAMINA Nº1

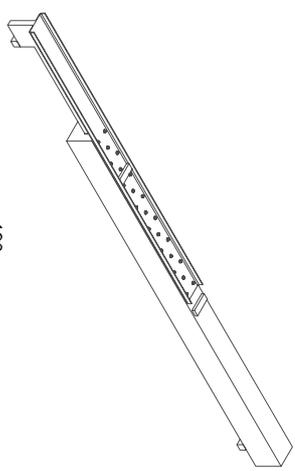
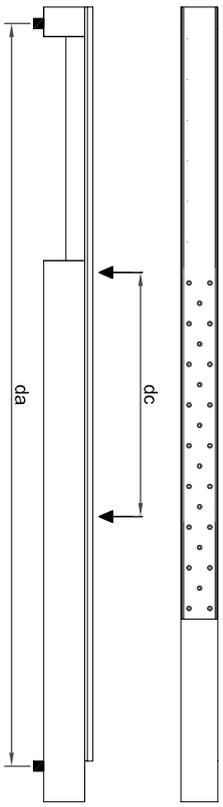
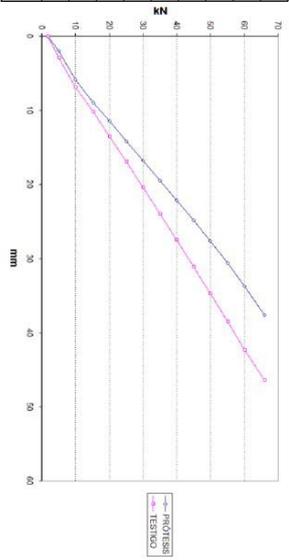
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA



Gráfica de rotura y tercio afectado

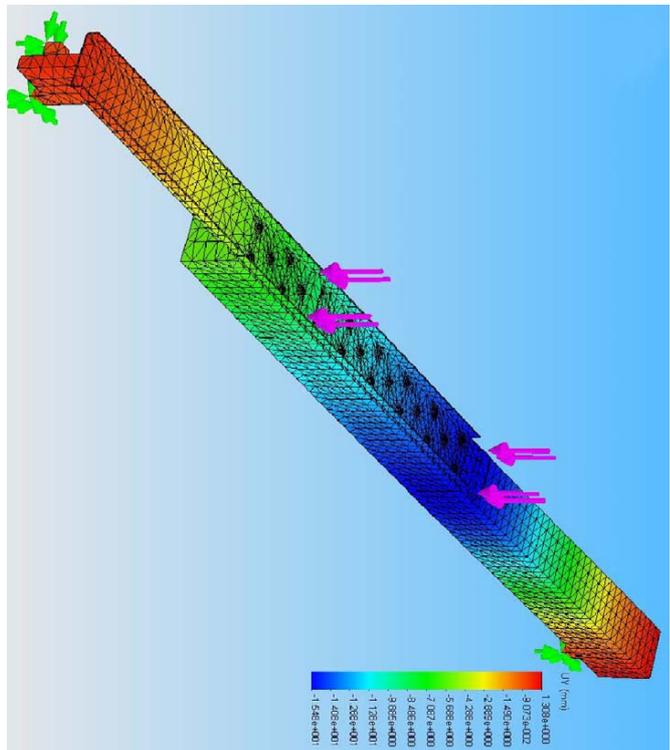
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	11603
E(Rad)	892,54
E(Tang)	552,52
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	27,70
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,59
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,82
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	11603
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	8375
MOR (MPa)	13,80
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C24
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C16

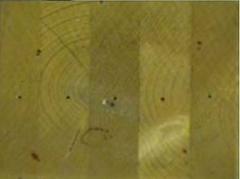
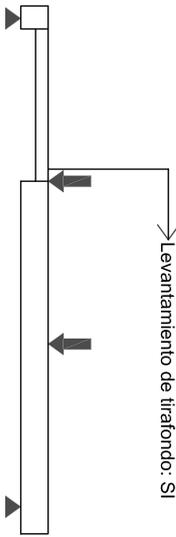


DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	3995
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	13,4

ROTURA	
Rotura tercio central	-
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



Levantamiento de tirafondo: SI



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTÉSIS METÁLICAS

Pieza: LAM-08

LAMINA Nº10

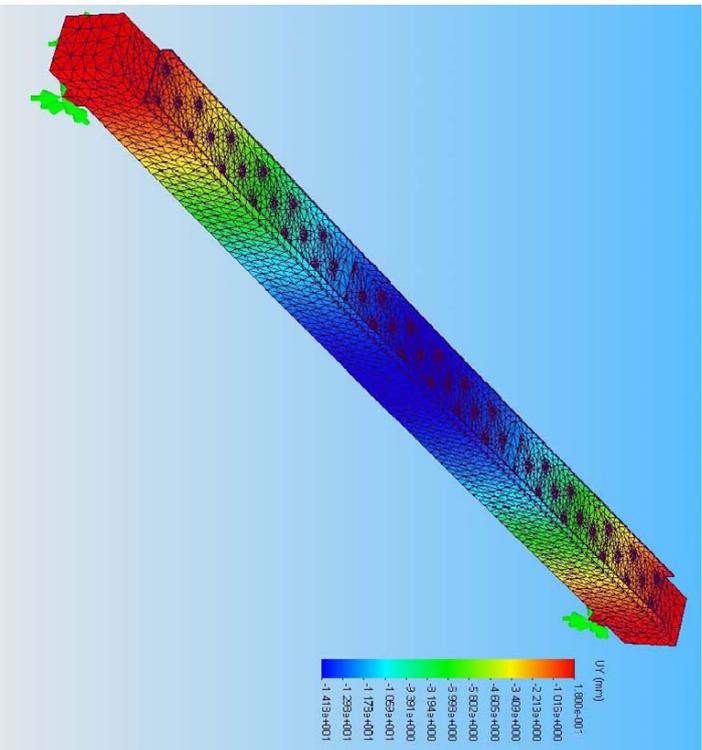
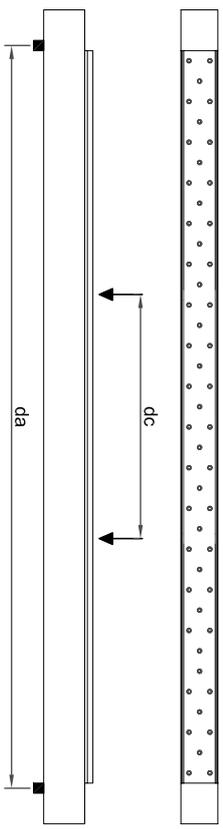
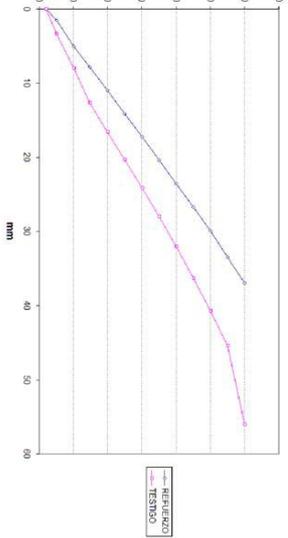
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	7582,00
E(Rad)	583,23
E(Tang)	361,04
Coef. Poisson RT	0,51
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,39
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00



DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	67,20
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,91
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,46
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	7582
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	14971
MOR (MPa)	33,60
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C14
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C40

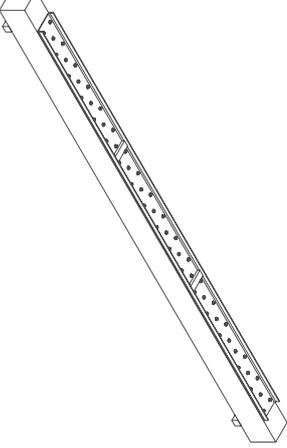
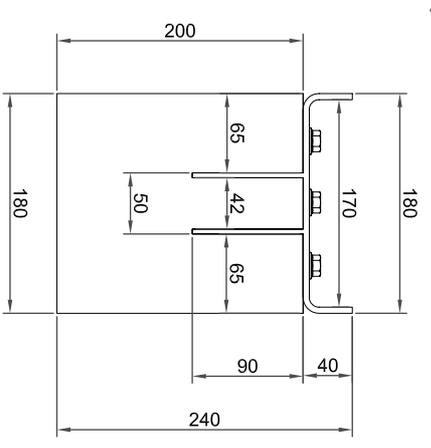
<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	Pino silv.
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4130
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	14,8

ROTURA	
Rotura tercio central	NO
Nudo en canto	SI
Nudo en cara	SI
Desviación de la fibra	SI

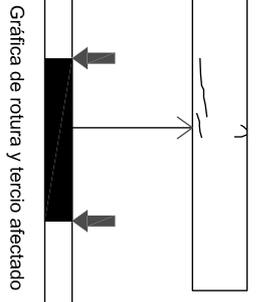
Observaciones  
Rotura fuera del tercio central, no incidencia de nudos a pesar de su magnitud. Redistribución irregular de cargas en un extremo



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES REFORZANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: SIERRA-02 LAMINA Nº11

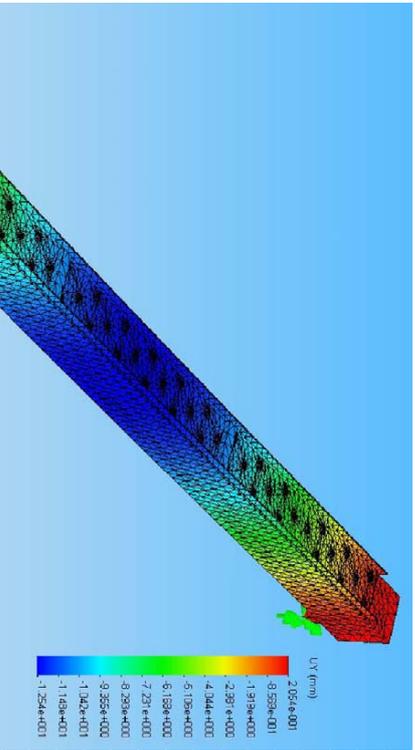
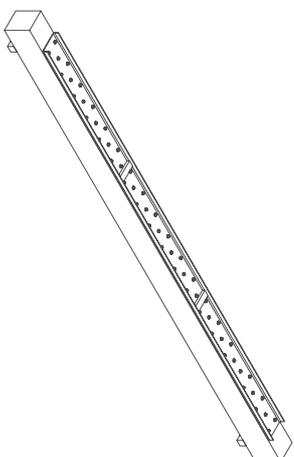
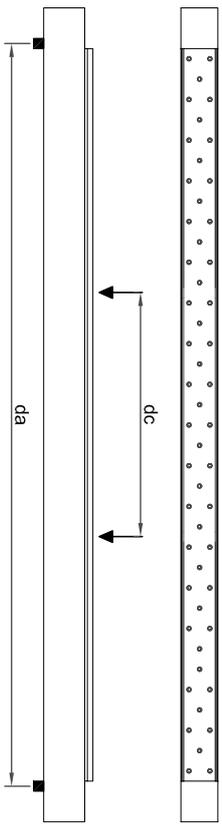
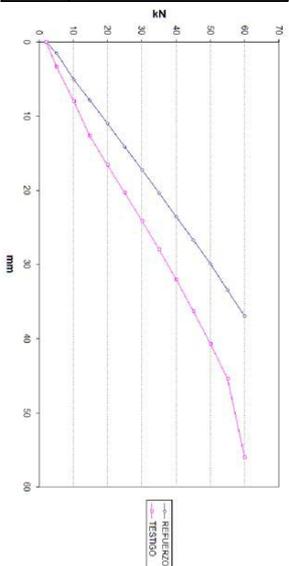
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA



Gráfica de rotura y tercio afectado

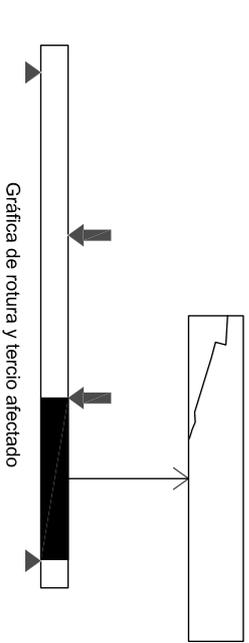
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	10747
E(Rad)	826.69
E(Tang)	511.76
Coef. Poisson RT	0.39
Coef. Poisson LT	0.43
Coef. Poisson LR	0.31
G(LT)	83.60
G(LR)	745.00
G(LR)	862.00

DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	144.90
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0.64
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0.36
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	10747
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	18951
MOR (MPa)	72.4
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C22
Clas. Estructural <sup>2</sup>	+C50



DATOS GENERALES	
Especie	Pino silv.
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4134
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	16.9

ROTURA	
Rotura tercio central	NO
Nudo en canto	SI
Nudo en cara	SI
Desviación de la fibra	SI



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pieza: SIERRA-06 LAMINA Nº12

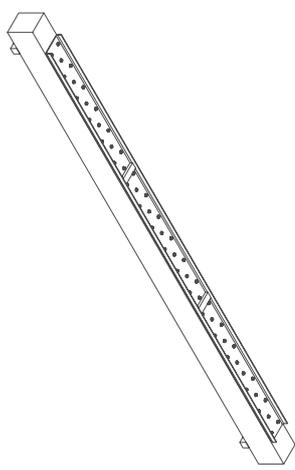
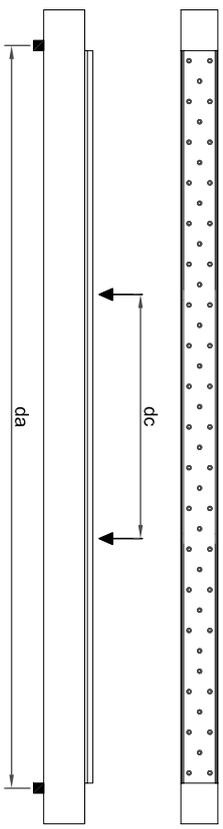
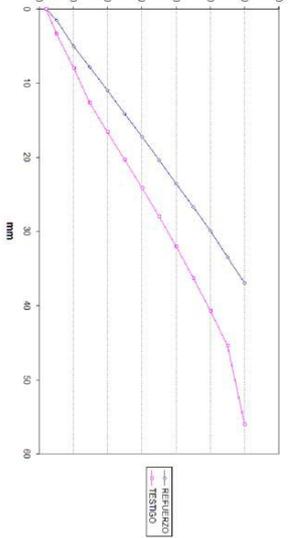
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	7103
E(Rad)	546,39
E(Tang)	338,24
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

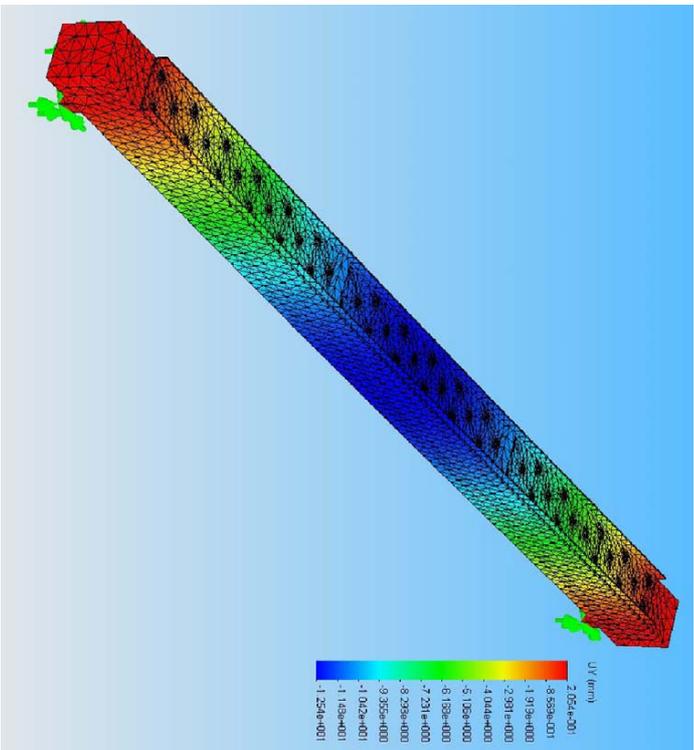
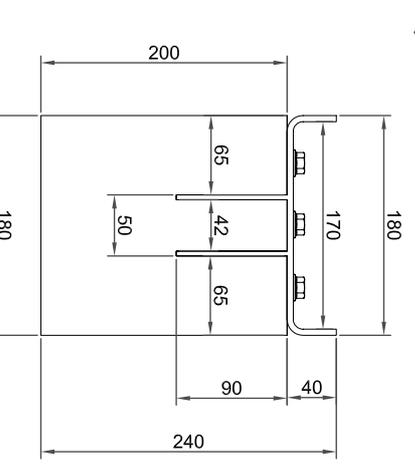


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	87,50
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,97
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,47
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	7103
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	14634
MOR (MPa)	43,70
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C14
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C35

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica

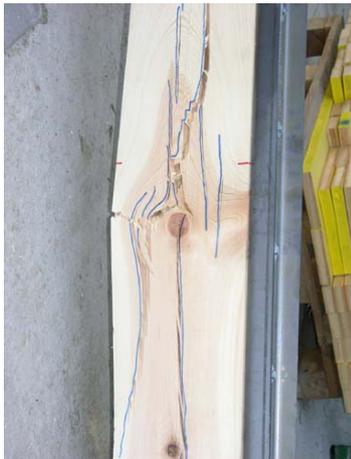


DATOS GENERALES	
Especie	Pino silv.
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4108
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	16,2



Gráfica de rotura y tercio afectado

ROTURA	
Rotura tercio central	SI
Nudo en canto	SI
Nudo en cara	SI
Desviación de la fibra	SI



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pièza: SIERRA-11 LÁMINA Nº13

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA

### CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS

E(Long)	6299
E(Rad)	484,54
E(Tang)	299,95
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

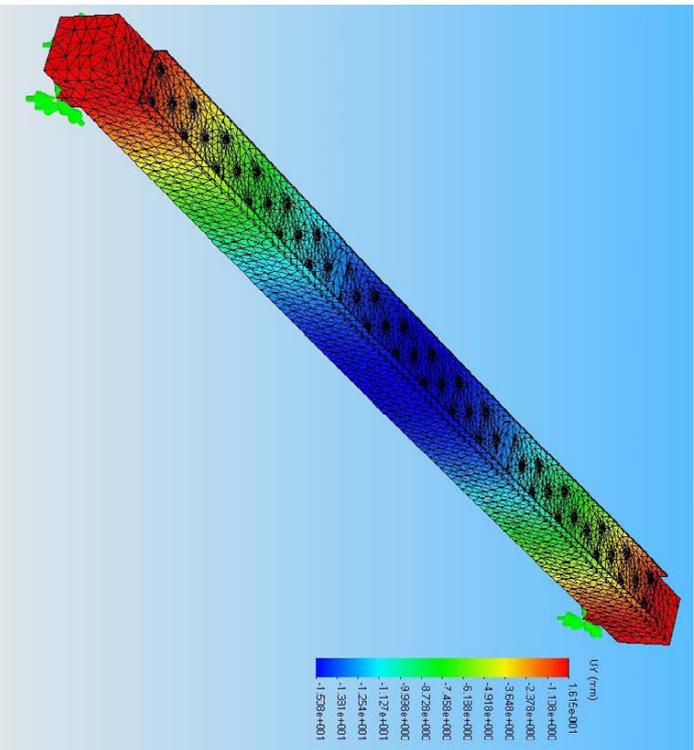
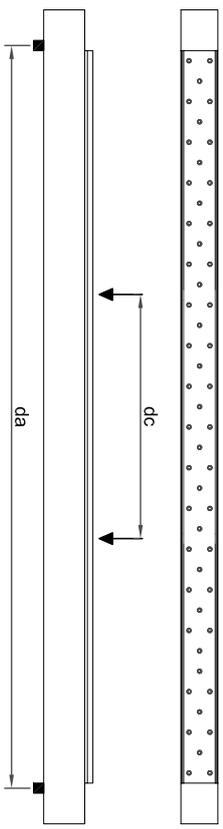
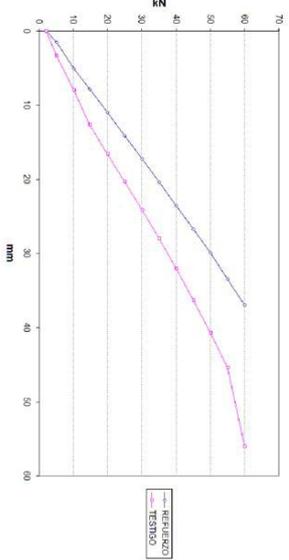
Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)



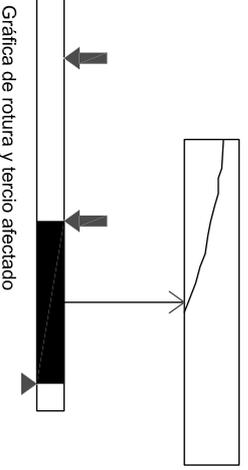
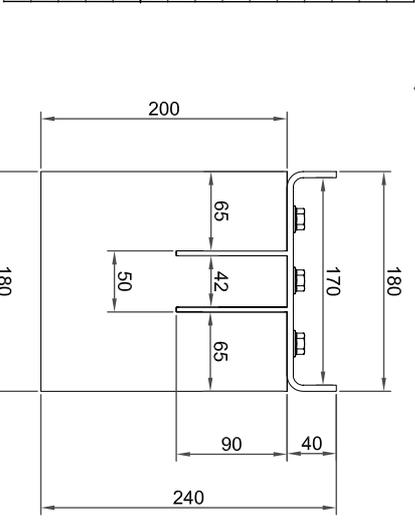
<b>DATOS ENSAYO (EN-408)</b>	
Carga última (kN)	83,80
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	1,09
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,50
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	6299
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	13729
MOR (MPa)	41,9
Clas. Estructural <sup>1</sup>	Rechazo
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C35

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica

<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



<b>DATOS GENERALES</b>	
Especie	Pino silv.
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4178
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	15,3



Gráfica de rotura y tercio afectado



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pièza: SIERRA-12 LAMINA Nº14

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

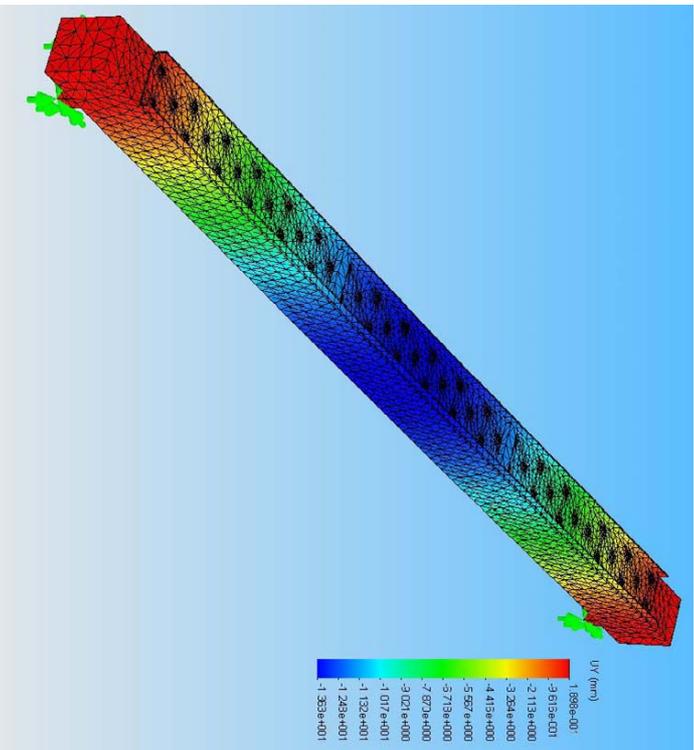
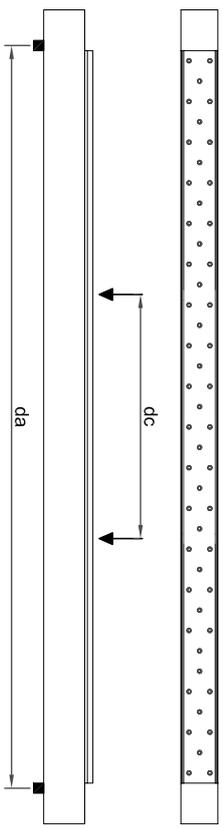
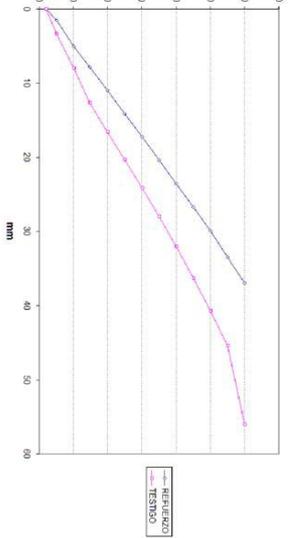


CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	8507
E(Rad)	654,38
E(Tang)	405,09
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	83,60
G(LR)	745,00
G(LR)	862,00

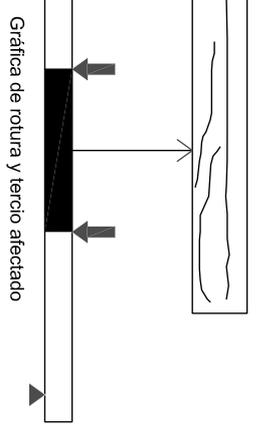
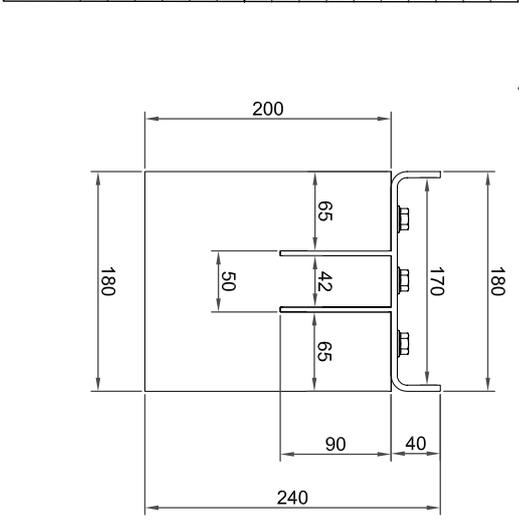


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	106,0
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,81
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,40
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	8507
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	17353
MOR (MPa)	53,0
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C16
Clas. Estructural <sup>2</sup>	+C50

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	Pino silv.
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4145
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	16,2



Gráfica de rotura y tercio afectado



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: SIERRA-13 LAMINA Nº15

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

### CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS

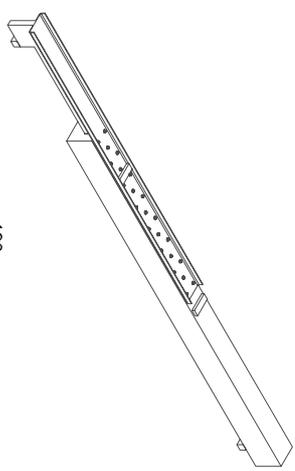
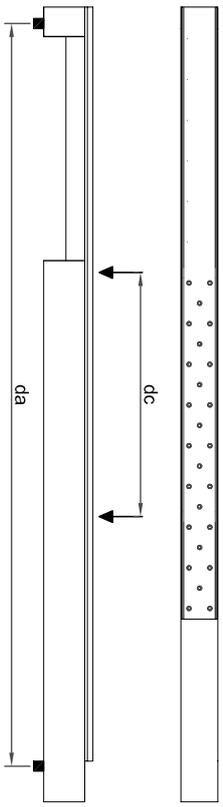
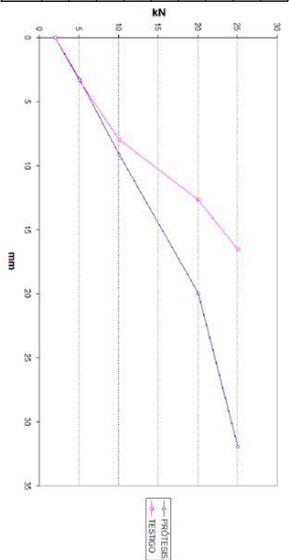
E(Long)	7383
E(Rad)	567,92
E(Tang)	351,57
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00



### DATOS ENSAYO (EN-408)

Carga última (kN)	28,1
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,93
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,94
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	7383
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	7303
MOR (MPa)	14,1
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C14
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C14

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica

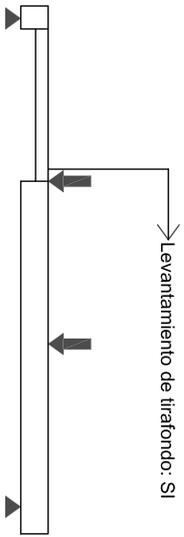
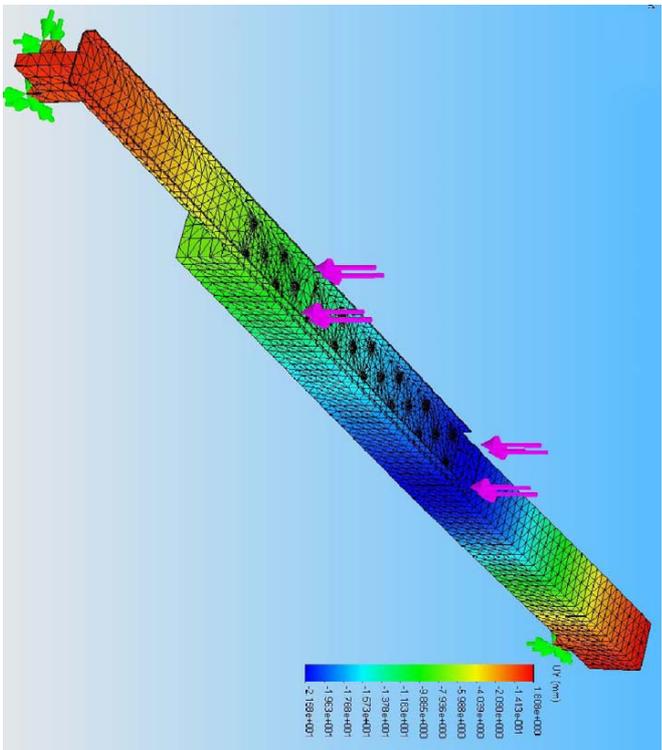
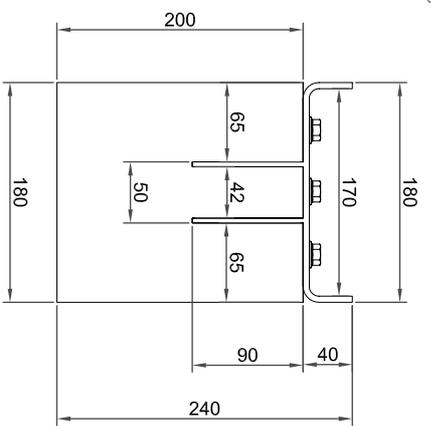


### DATOS GENERALES

Especie	Pino silv.
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4116
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	15,7

### ROTURA

Rotura tercio central	-
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



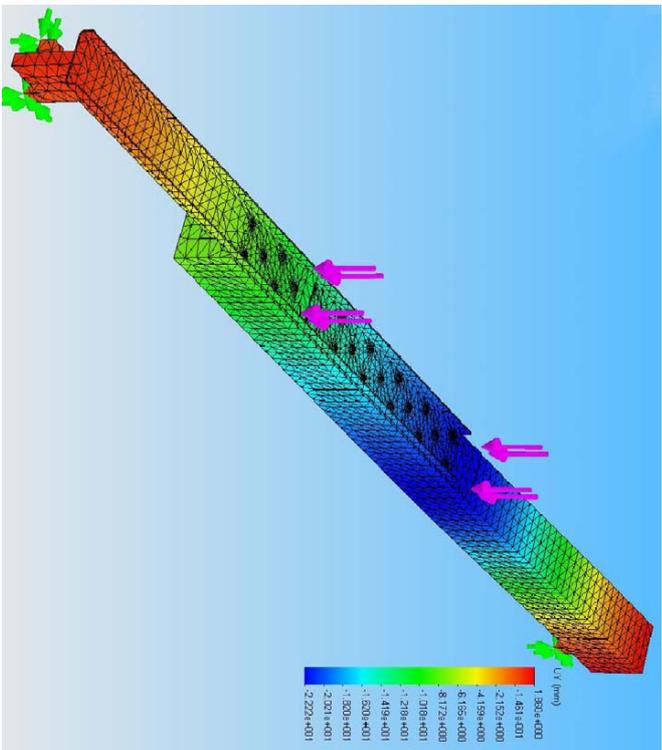
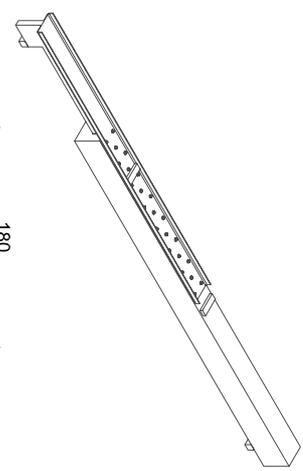
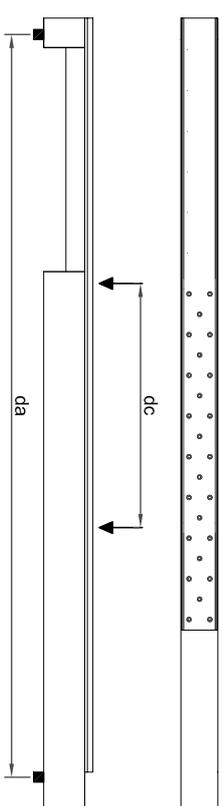
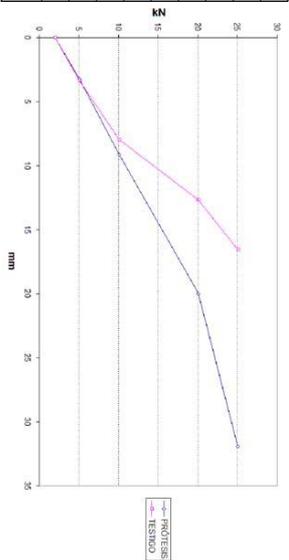
RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pièza: SIERRA-01 LAMINA N°16

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA

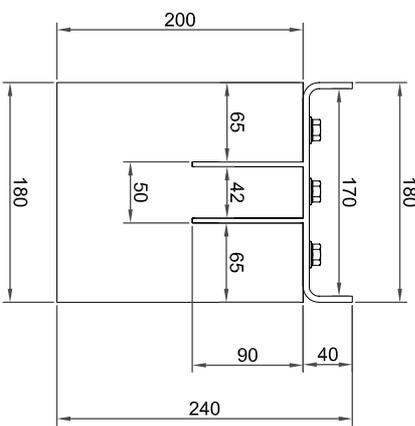
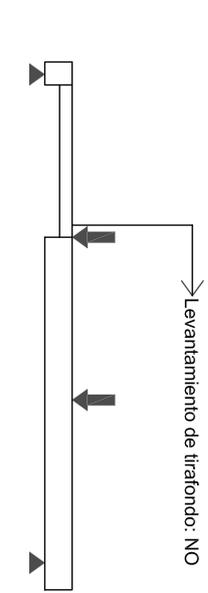
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	7091
E(Rad)	545,46
E(Tang)	337,67
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	83,60
G(LR)	745,00
G(LR)	862,00

Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)



DATOS GENERALES	
Especie	Pino silv.
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4112
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	17,8

ROTURA	
Rotura tercio central	-
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pièza: SIERRA-05 LAMINA N°17

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA



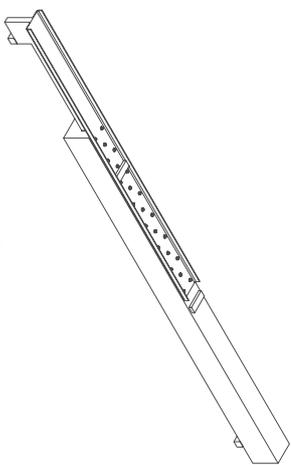
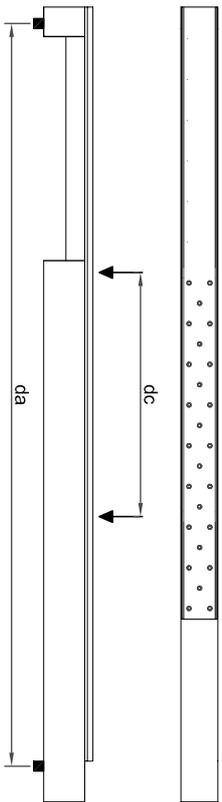
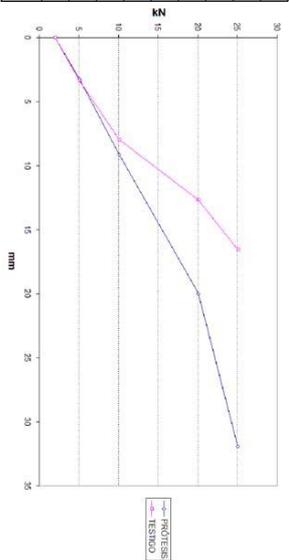
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	8075
E(Rad)	621,15
E(Tang)	384,52
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)

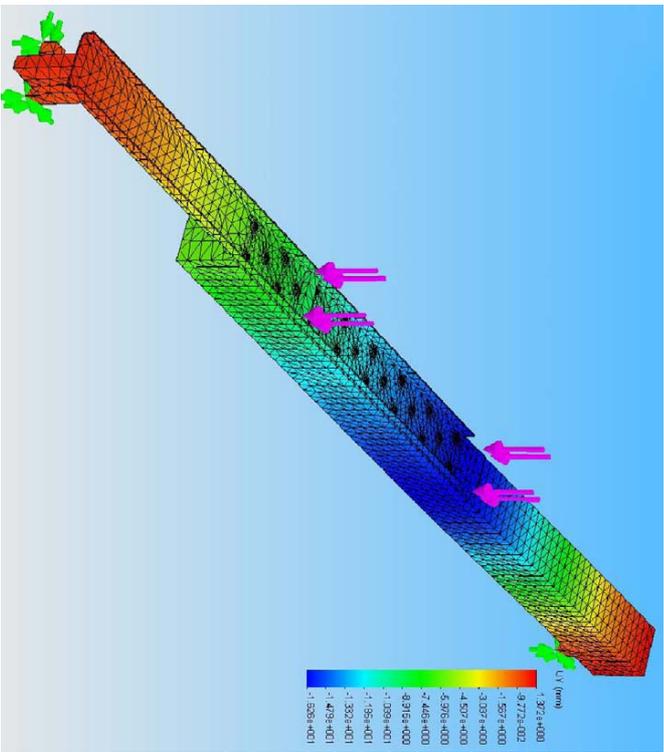
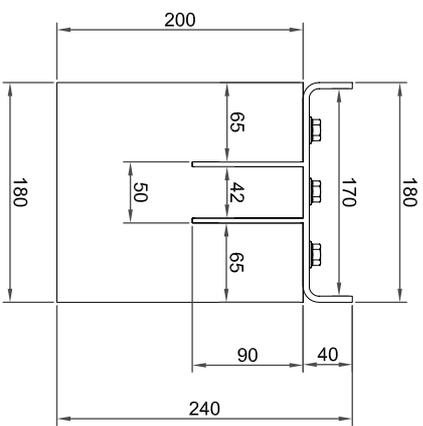


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	27,1
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,86
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,95
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	8075
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	7247
MOR (MPa)	13,5
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C16
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C14

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica

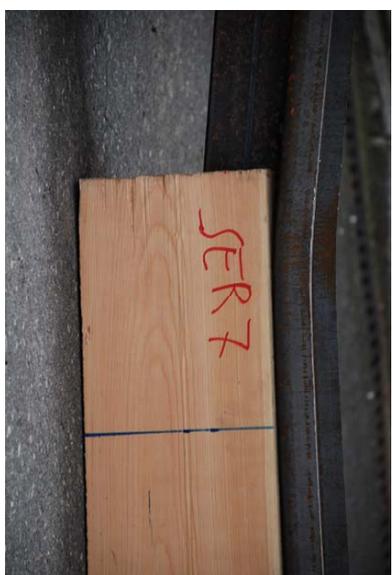
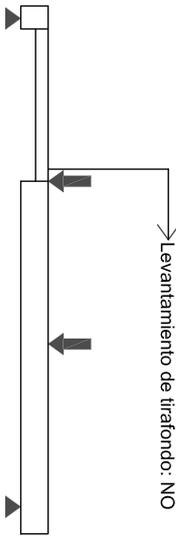


DATOS GENERALES	
Especie	Pino silv.
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4112
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	15,4



ROTURA	
Rotura tercio central	-
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-
Observaciones	-

Levantamiento de tirafondo: NO



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pièza: SIERRA-07 LAMINA N°18

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

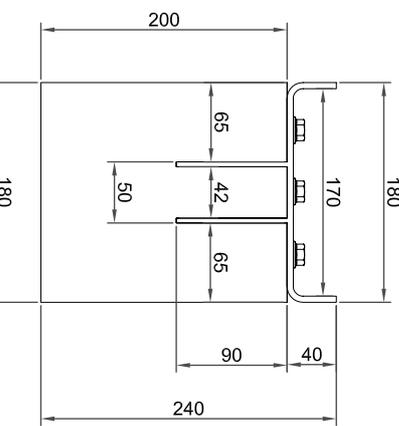
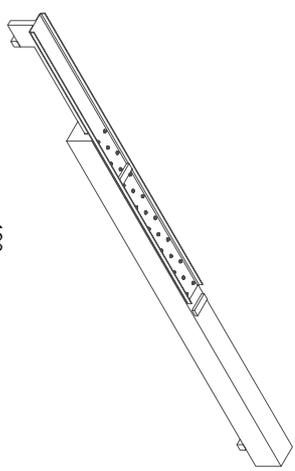
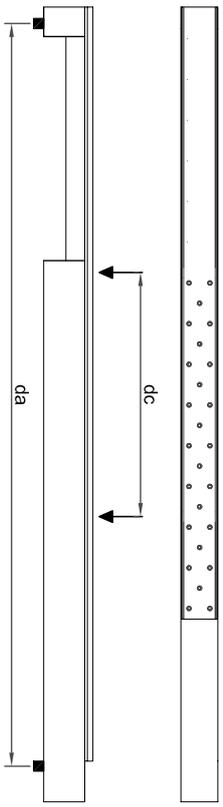
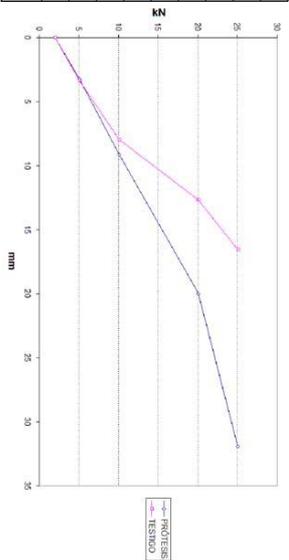
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	7880
E(Rad)	606,15
E(Tang)	375,24
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)



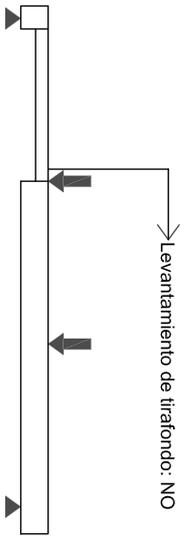
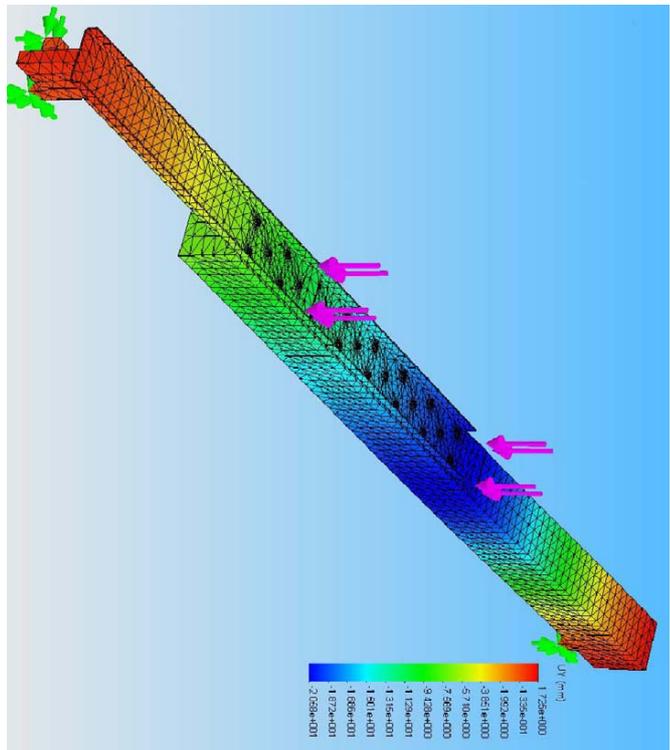
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	26,3
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,86
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,95
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	7880
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	6970
MOR (MPa)	13,1
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C14
Clas. Estructural <sup>2</sup>	Rechazo

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	Pino silv.
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4146
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	18,3

ROTURA	
Rotura tercio central	-
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pièza: SIERRA-08 LÁMINA Nº19

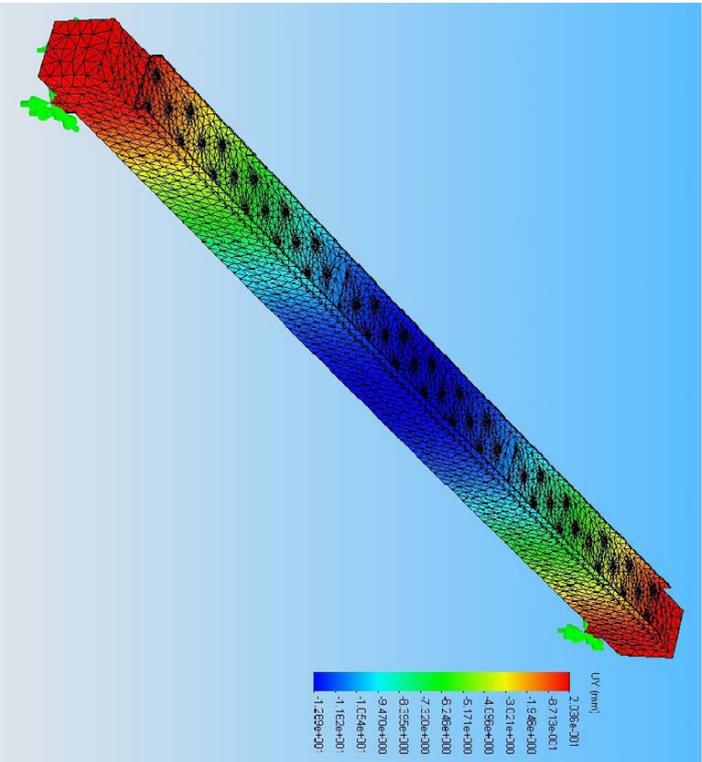
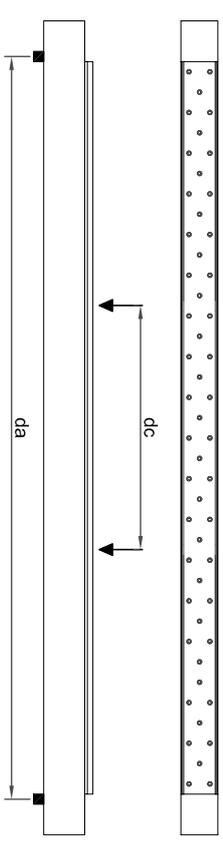
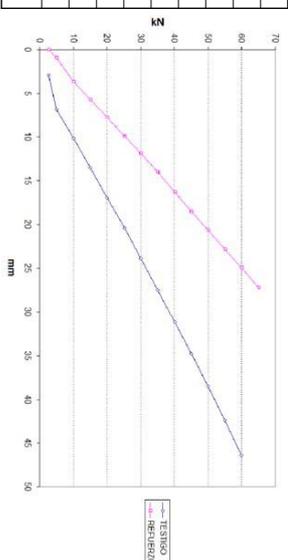
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	10393
E(Rad)	799.46
E(Tang)	494.90
Coef. Poisson RT	0.39
Coef. Poisson LT	0.43
Coef. Poisson LR	0.31
G(RT)	83.60
G(LT)	745.00
G(LR)	862.00

Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)

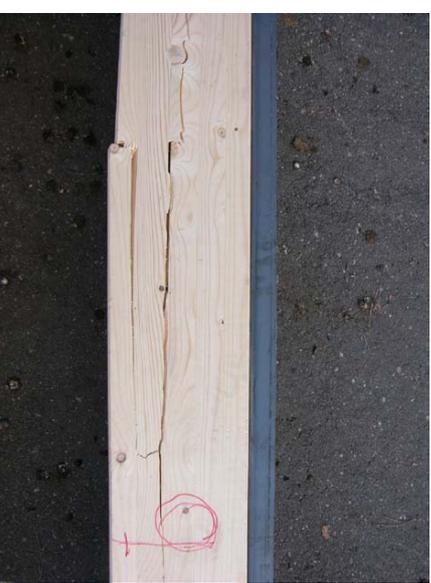
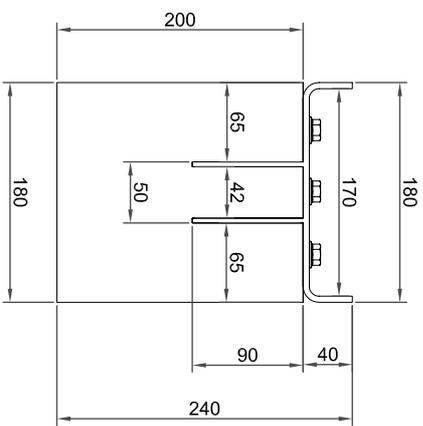
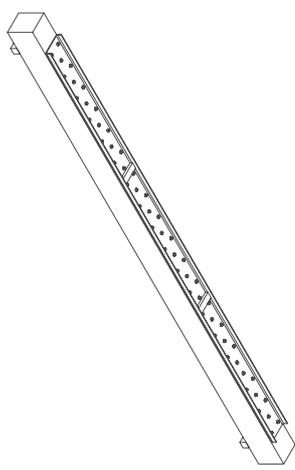
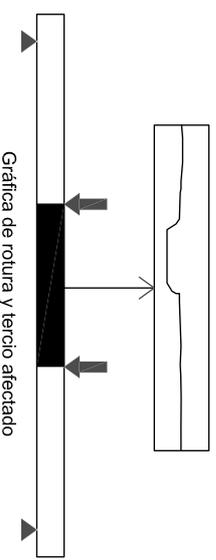
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	87.40
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	10393
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	23210
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	0.66
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	0.29
MOR (MPa)	43.70
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C22
Clas. Estructural <sup>2</sup>	+C50

<sup>1</sup> Sin refuerzo o protesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o protesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	3994
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	11.30

ROTURA	
Rotura tercio central	SI
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pieza: LAM-09 LAMINA Nº2

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

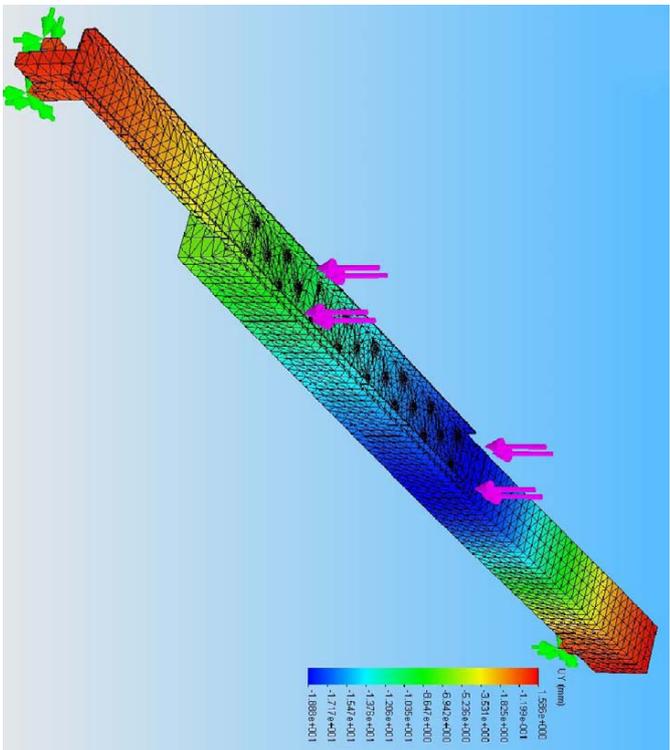
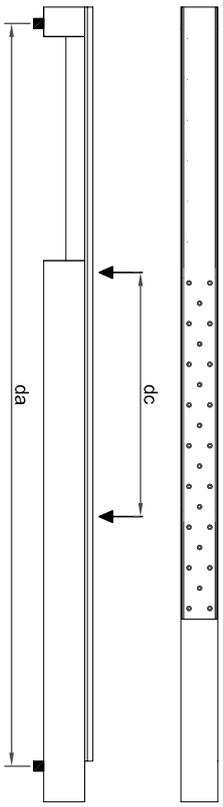
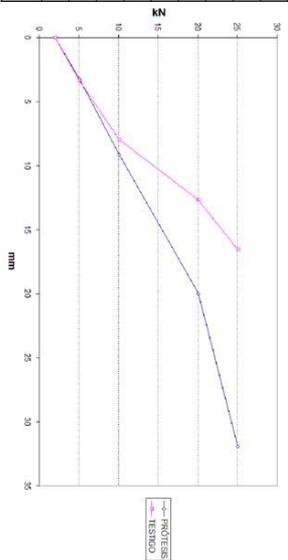
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	8868
E(Rad)	682,15
E(Tang)	422,29
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)

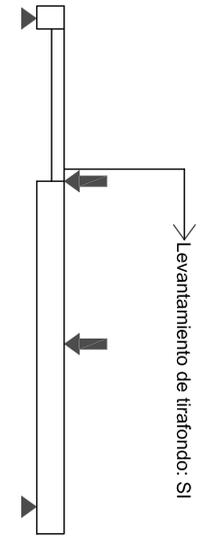
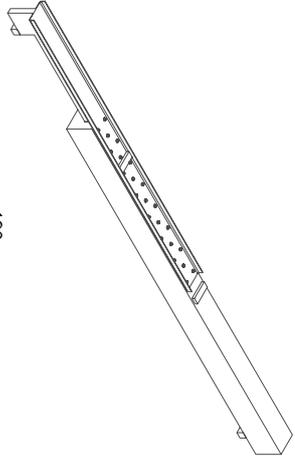
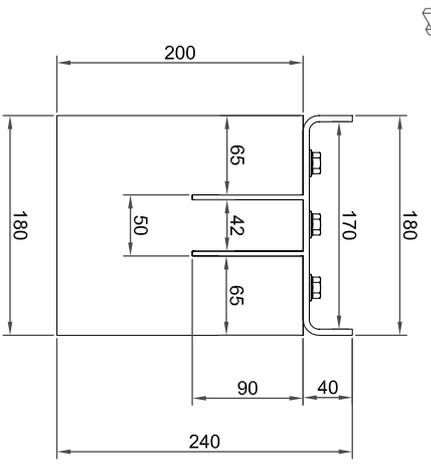


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	28,3
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,78
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,86
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	8868
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	8061
MOR (MPa)	14,2
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C16
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C16

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	Pino silv.
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4136
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	15,2



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pièza: SIERRA-10 LÁMINA Nº20

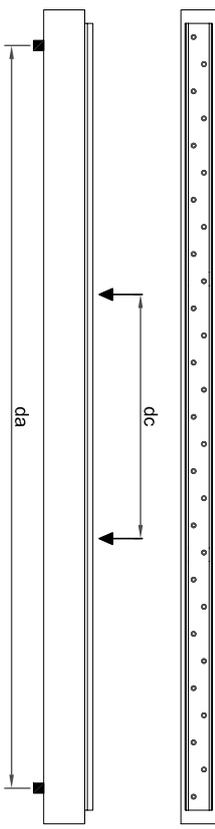
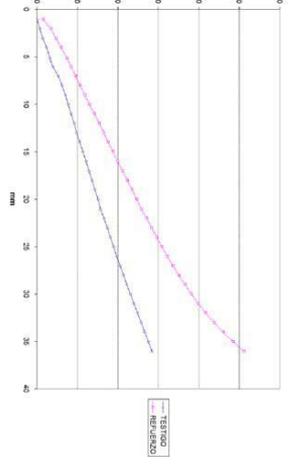
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	7159
E(Rad)	550,69
E(Tang)	340,90
Coef. Poisson RT	0,51
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,39
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

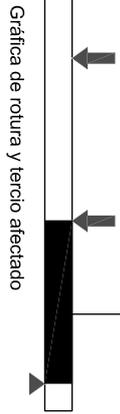
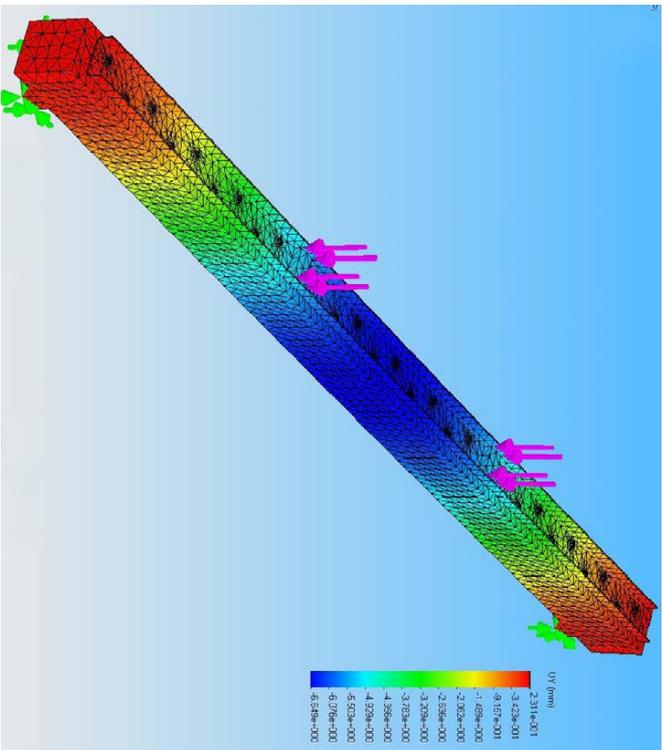
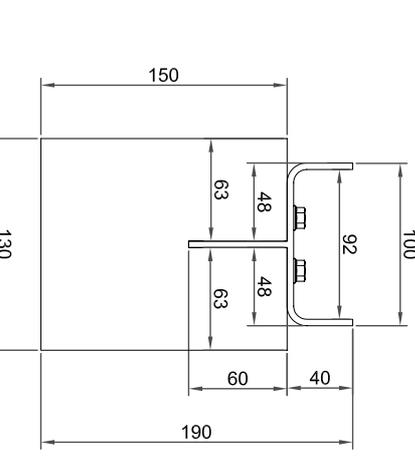


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	55,0
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,91
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,58
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	7159
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	11280
MOR (MPa)	37,50
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C14
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C24

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	3
h (mm)	163
b (mm)	149
L (mm)	3000
da (mm)	2700
dc (mm)	90
Humedad (%)	-



Gráfica de rotura y tercio afectado



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: ANTIQUA-02 LÁMINA Nº21

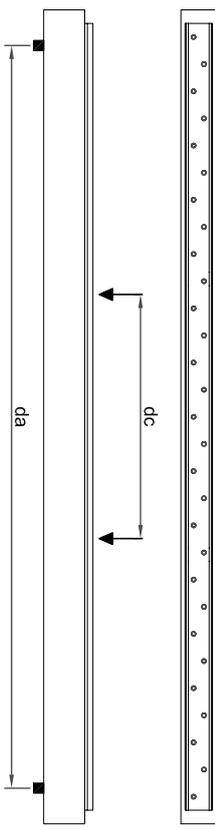
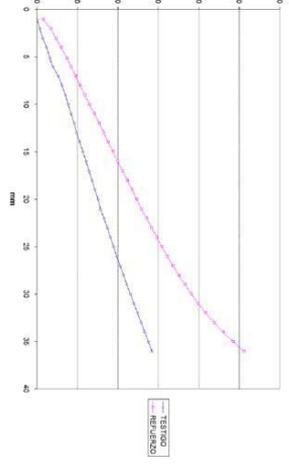
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	4445
E(Rad)	341,92
E(Tang)	211,67
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00



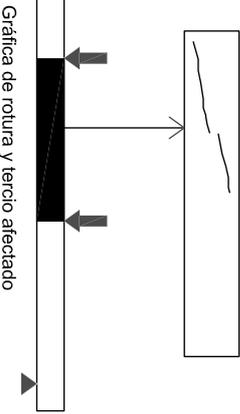
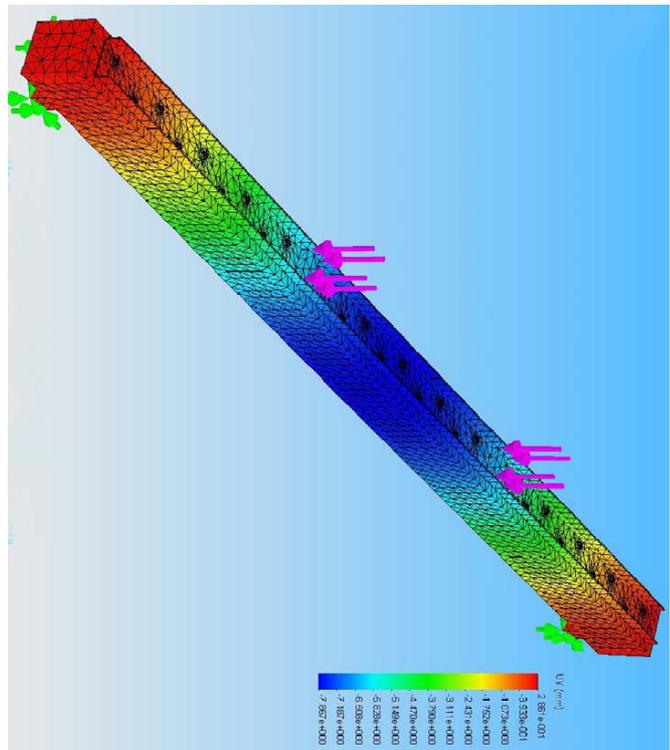
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	32,0
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	1,72
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,85
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	4445
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	8973
MOR (MPa)	25,5
Clas. Estructural <sup>1</sup>	Rechazo
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C16

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica

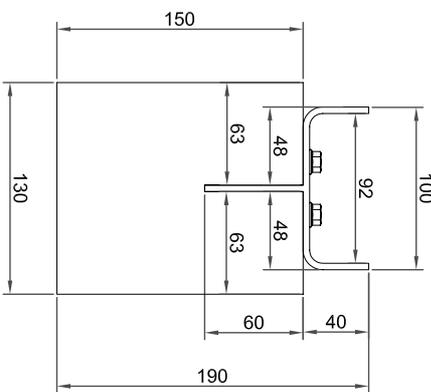
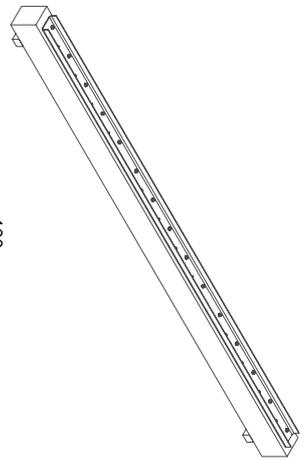


DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	3
h (mm)	162
b (mm)	129
L (mm)	3000
da (mm)	2700
dc (mm)	90
Humedad (%)	-

ROTURA	
Rotura tercio central	SI
Nudo en canto	SI
Nudo en cara	SI
Desviación de la fibra	SI



Gráfica de rotura y tercio afectado



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: ANTIQUA-03 LAMINA Nº22

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

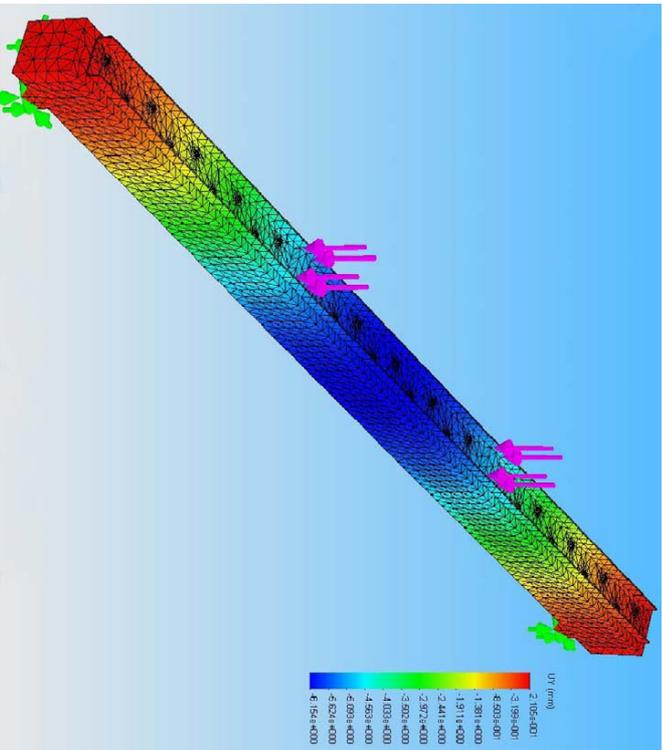
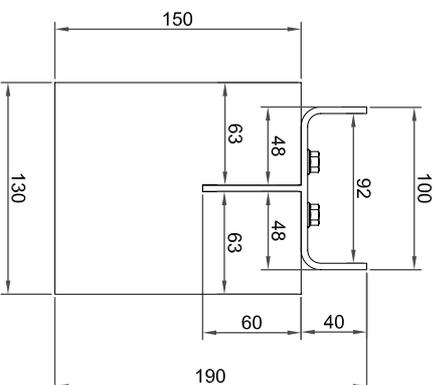
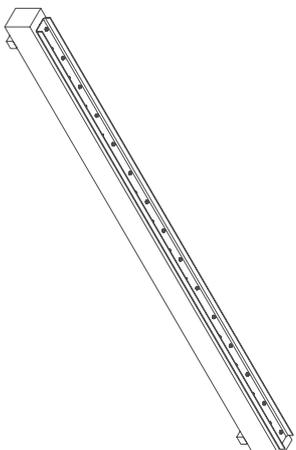
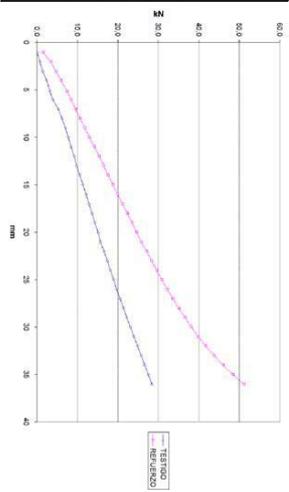
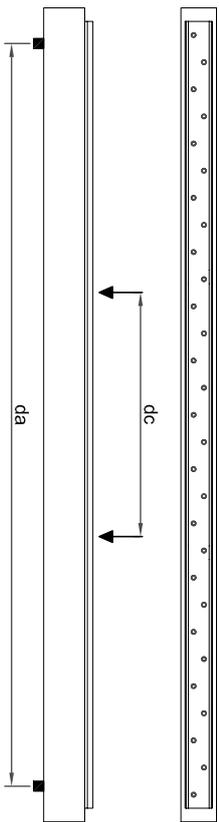
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	8749
E(Rad)	673.00
E(Tang)	416.62
Coef. Poisson RT	0.39
Coef. Poisson LT	0.43
Coef. Poisson LR	0.31
G(RT)	83.60
G(LT)	745.00
G(LR)	862.00

Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)



DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	59.50
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0.93
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0.53
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	8749
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	15368
MOR (MPa)	50.4
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C16
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C45

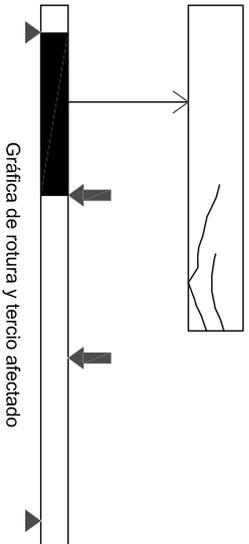
<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	3
h (mm)	161
b (mm)	123
L (mm)	3000
da (mm)	2700
dc (mm)	90
Humedad (%)	-

ROTURA	
Rotura tercio central	NO
Nudo en canto	SI
Nudo en cara	SI
Desviación de la fibra	SI

Observaciones  
Excentricidad de carga en un extremo.



Gráfica de rotura y tercio afectado



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: ANTIGUA-04 LAMINA Nº23

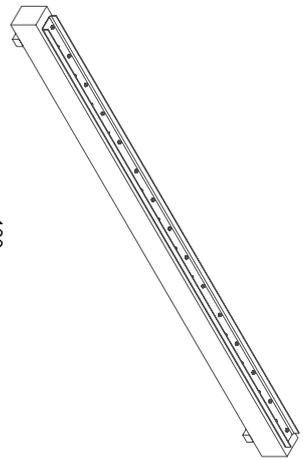
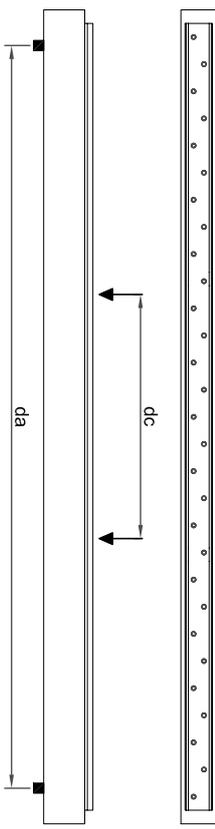
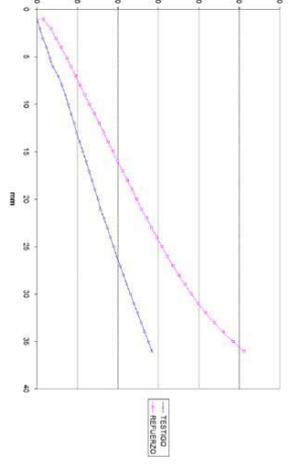
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	6564
E(Rad)	504,92
E(Tang)	312,57
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

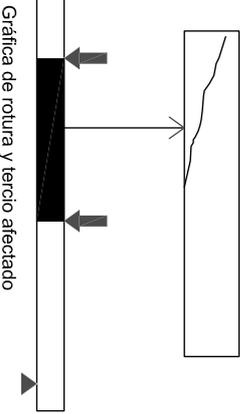
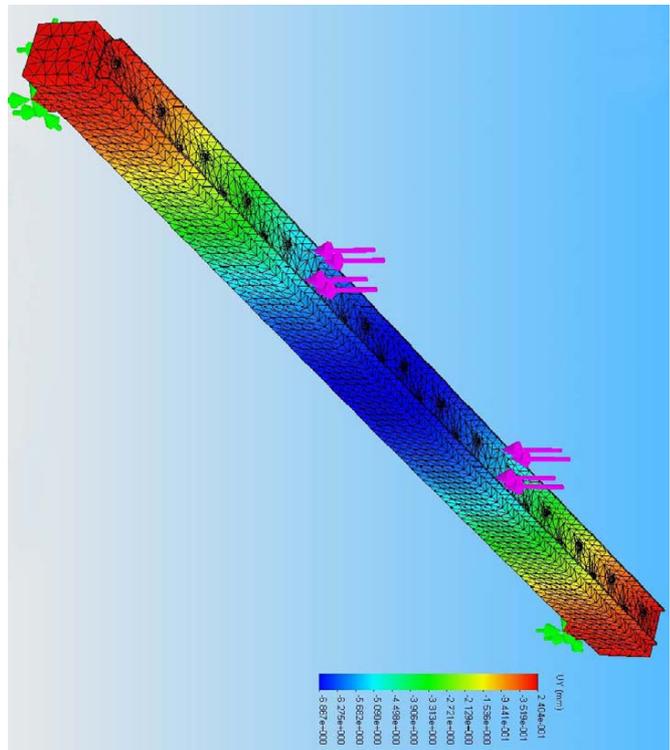
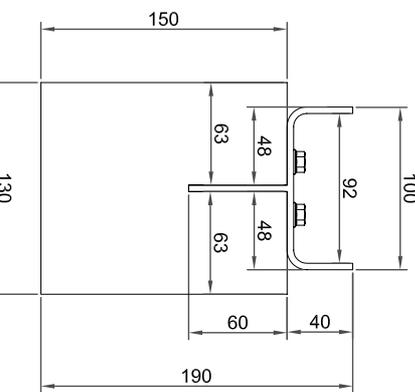


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	33,1
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	1,74
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,86
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	6564
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	13296
MOR (MPa)	36,30
Clas. Estructural <sup>1</sup>	Rechazo
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C35

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	3
h (mm)	149
b (mm)	111
L (mm)	3000
da (mm)	2700
dc (mm)	90
Humedad (%)	-



Gráfica de rotura y tercio afectado



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: ANTIQUA-08 LAMINA Nº24

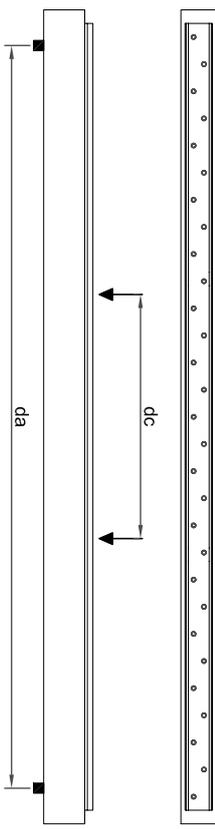
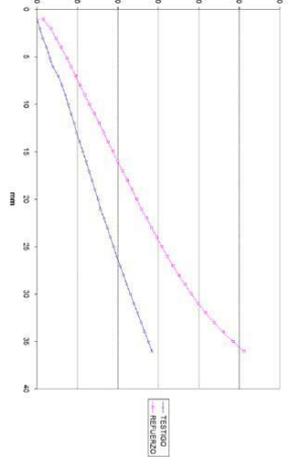
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	4188
E(Rad)	322,15
E(Tang)	199,43
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

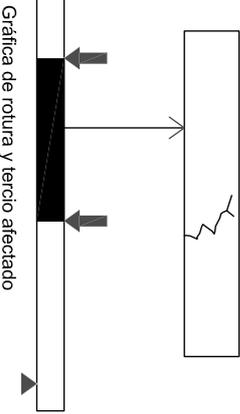
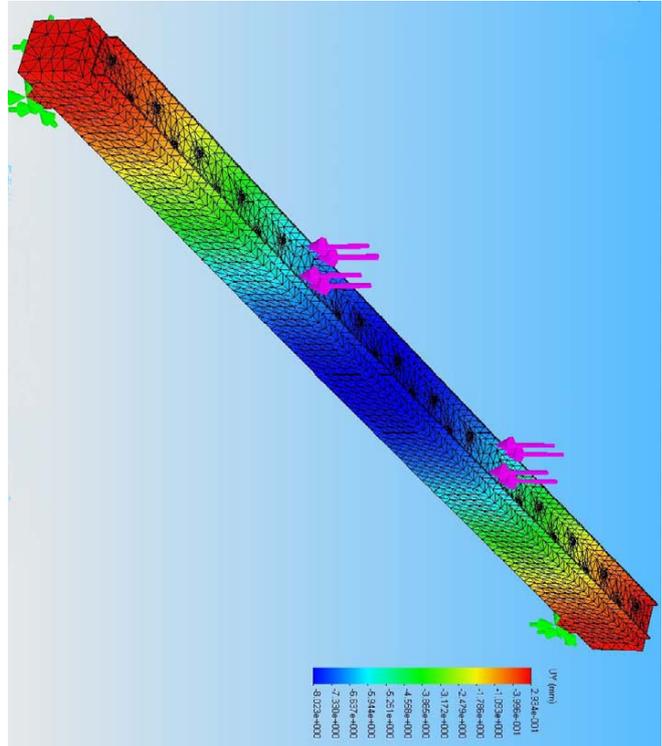
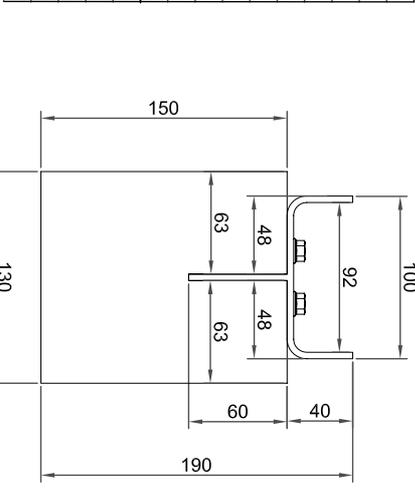


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	20,70
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	2,49
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,96
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	4188
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	10857
MOR (MPa)	20,40
Clas. Estructural <sup>1</sup>	Rechazo
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C22

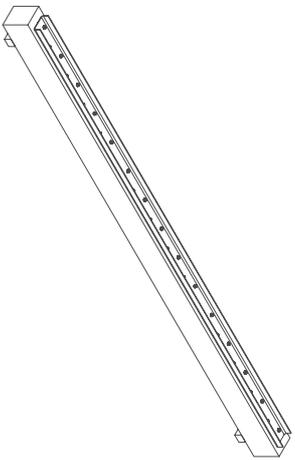
<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	3
h (mm)	146
b (mm)	129
L (mm)	3000
da (mm)	2700
dc (mm)	90
Humedad (%)	-



Gráfica de rotura y tercio afectado



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

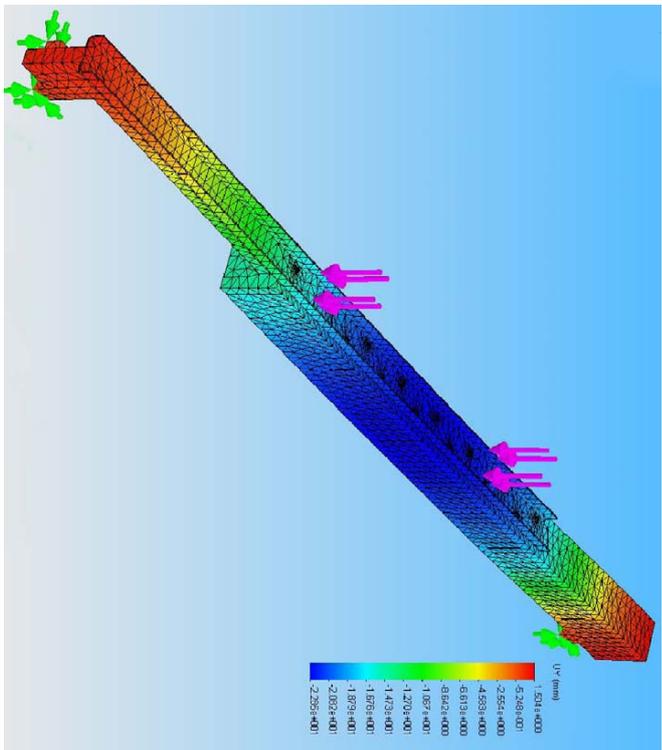
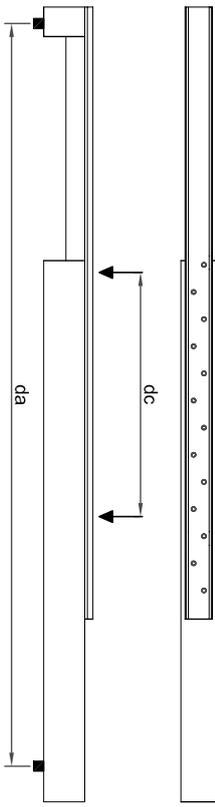
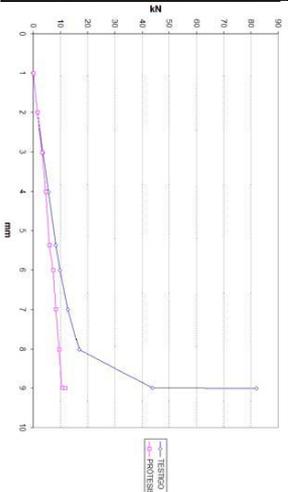
Pieza: ANTIQUA-09 LAMINA Nº25

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	6251
E(Rad)	408,85
E(Tang)	297,67
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	83,60
G(LR)	745,00
G(LR)	862,00

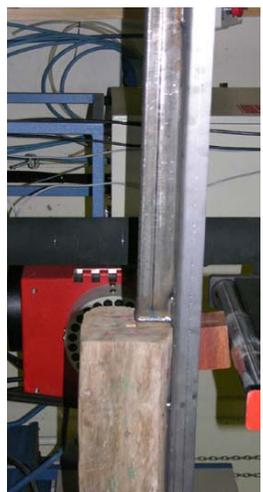
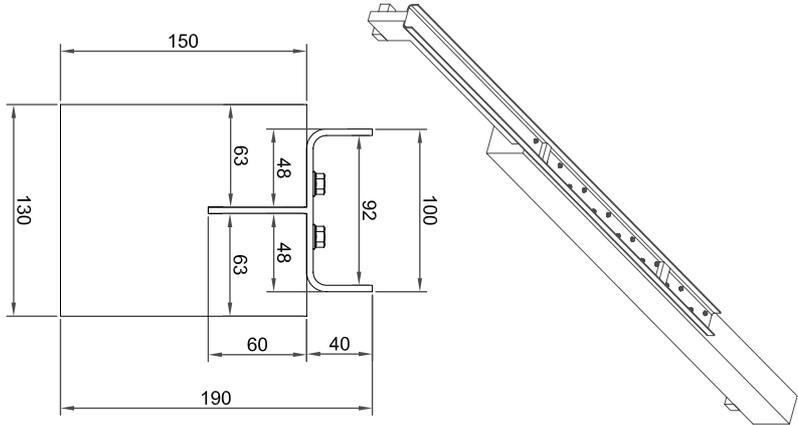


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	6,8
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	1,64
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	1,68
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	6251
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	6099
MOR (MPa)	6,5
Clas. Estructural <sup>1</sup>	Rechazo
Clas. Estructural <sup>2</sup>	Rechazo



DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	1
h (mm)	145
b (mm)	134
L (mm)	3000
da (mm)	2700
dc (mm)	90
Humedad (%)	-

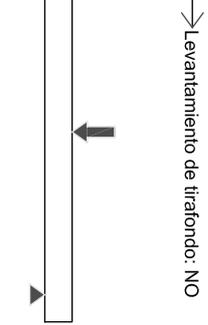
ROTURA	
Rotura tercio central	-
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDOS EN LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: ANTIQUA-01 LAMINA Nº26

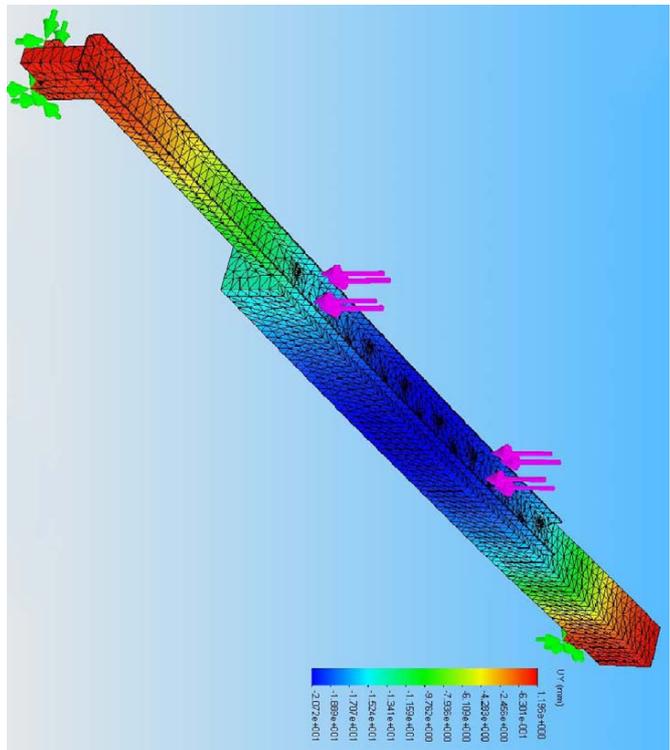
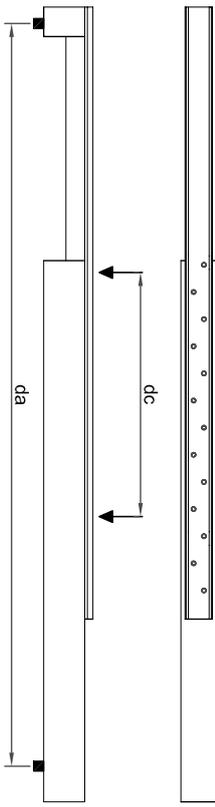
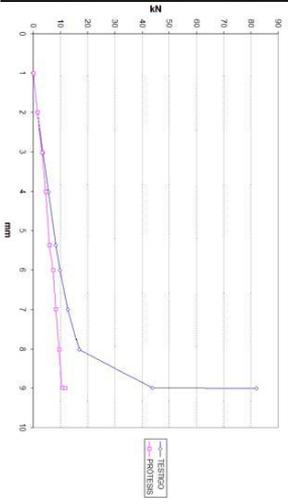
TESIS DOCTORAL  
 AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
 DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA



CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	7578
E(Rad)	582,92
E(Tang)	360,86
Coef. Poisson RT	0,51
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,39
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

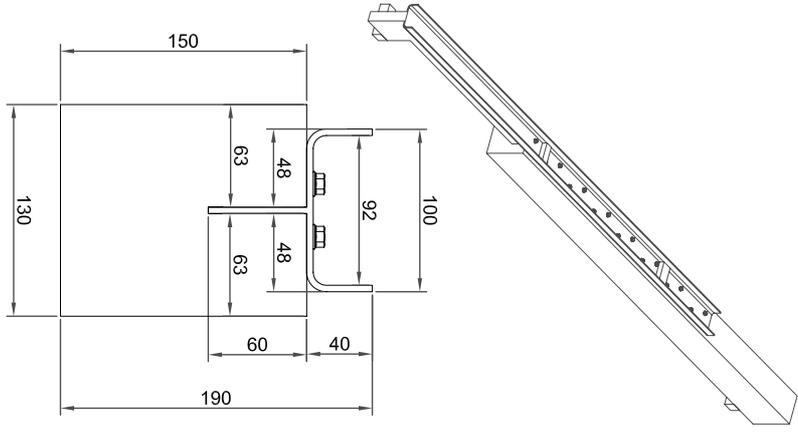


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	9,75
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	1,48
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	1,61
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	7578
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	6959
MOR (MPa)	9,7
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C14
Clas. Estructural <sup>2</sup>	Rechazo



DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	1
h (mm)	142
b (mm)	131
L (mm)	3000
da (mm)	2700
dc (mm)	90
Humedad (%)	-

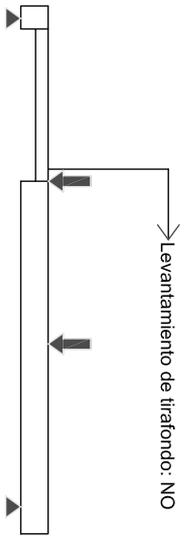
ROTURA	
Rotura tercio central	-
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFORZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pieza: ANTIQUA-05 LÁMINA Nº27

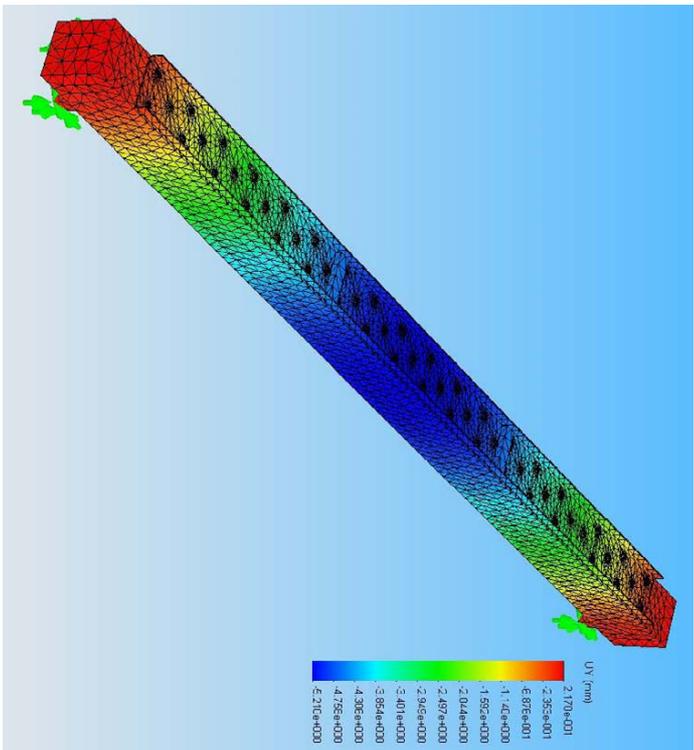
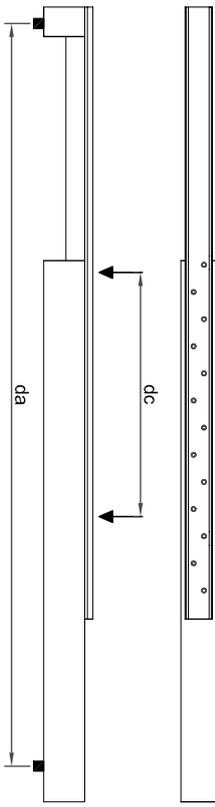
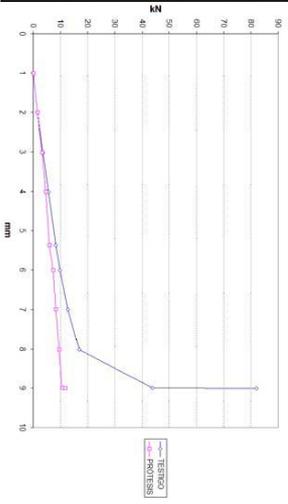
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA



CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	8665
E(Rad)	324,54
E(Tang)	200,91
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

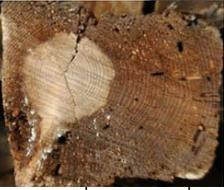
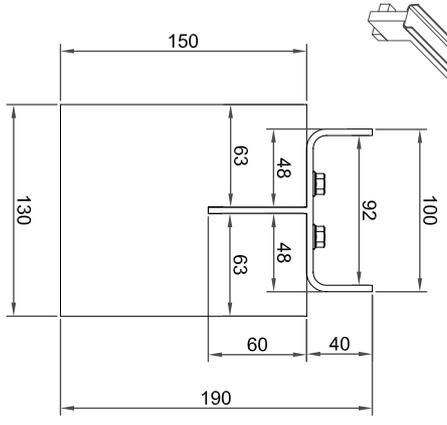


DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	10,5
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	1,23
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	1,83
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	8665
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	6921
MOR (MPa)	10,6
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C16
Clas. Estructural <sup>2</sup>	Rechazo



DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	1
h (mm)	129
b (mm)	120
L (mm)	3000
da (mm)	3600
dc (mm)	2700
Humedad (%)	90

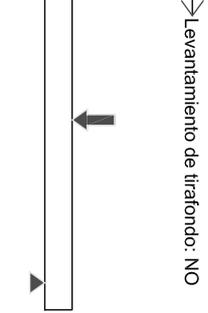
ROTURA	
Rotura tercio central	-
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pieza: ANTIQUA-12 LAMINA Nº28

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

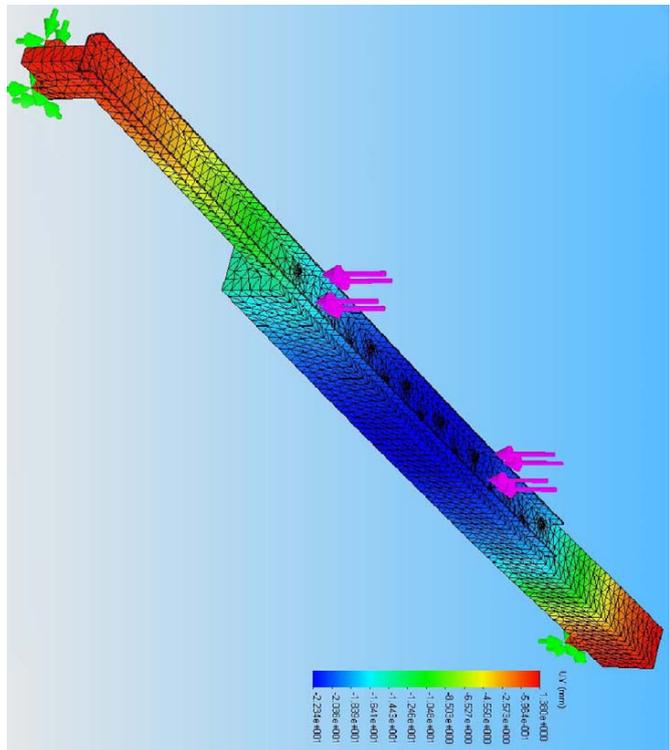
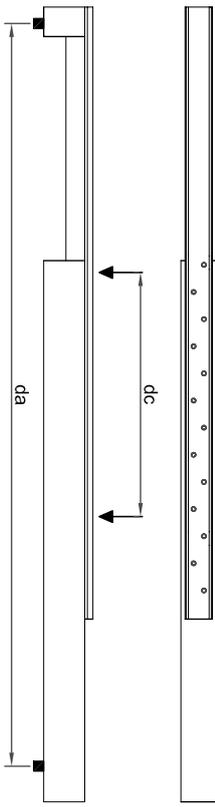
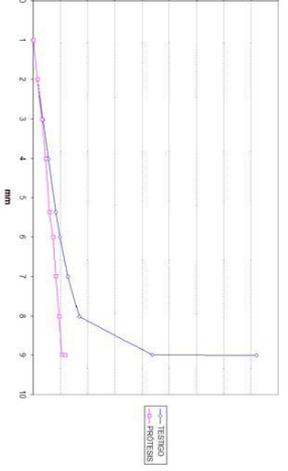


CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	6532
E(Rad)	502,46
E(Tang)	311,08
Coef. Poisson RT	0,51
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,39
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00



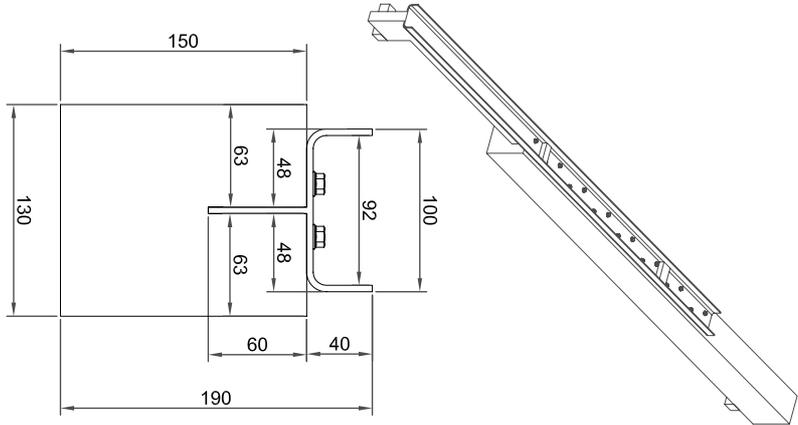
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	10,8
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	1,29
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	1,61
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	6532
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	5202
MOR (MPa)	9,2
Clas. Estructural <sup>1</sup>	Rechazo
Clas. Estructural <sup>2</sup>	Rechazo

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica

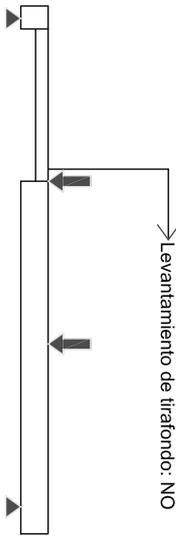


DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	1
h (mm)	157
b (mm)	129
L (mm)	3000
da (mm)	2700
dc (mm)	90
Humedad (%)	-

ROTURA	
Rotura tercio central	-
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



Levantamiento de tirafondo: NO



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: ANTIQUA-14 LÁMINA Nº29

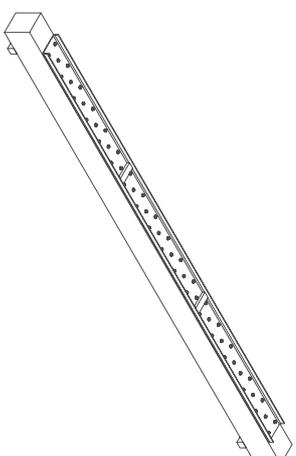
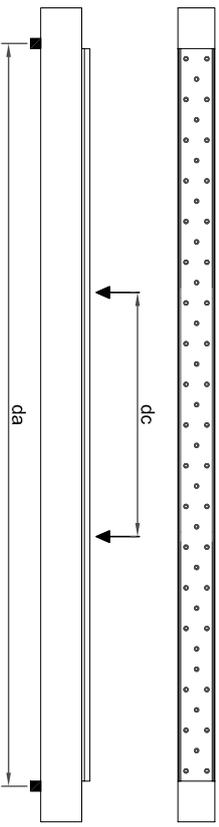
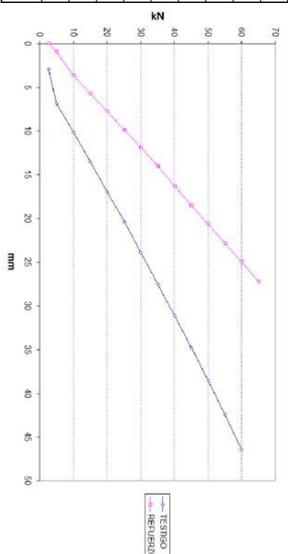
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	12006
E(Rad)	923,54
E(Tang)	571,71
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)

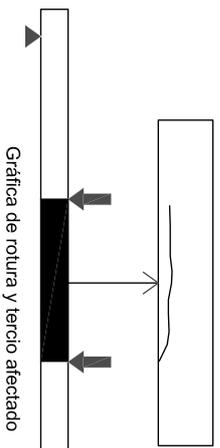
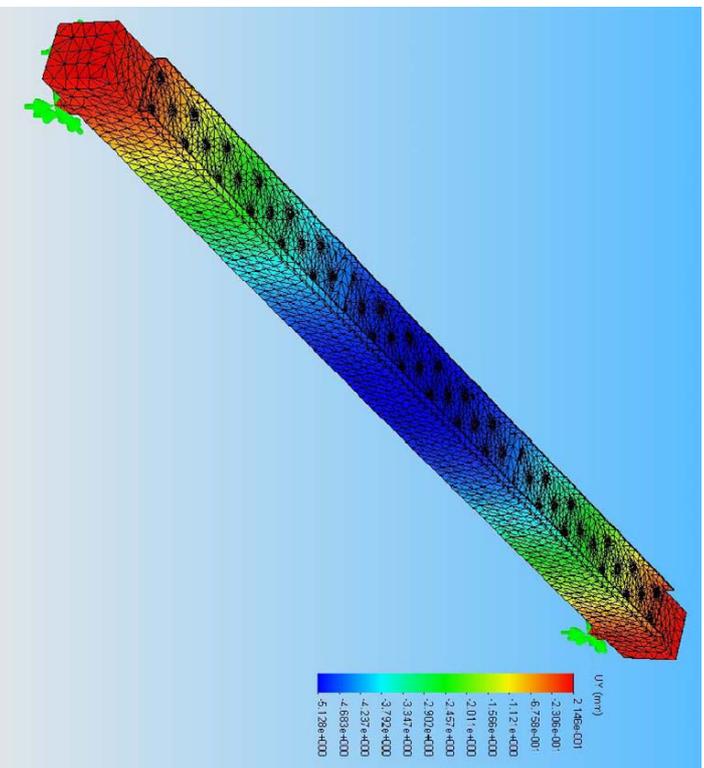
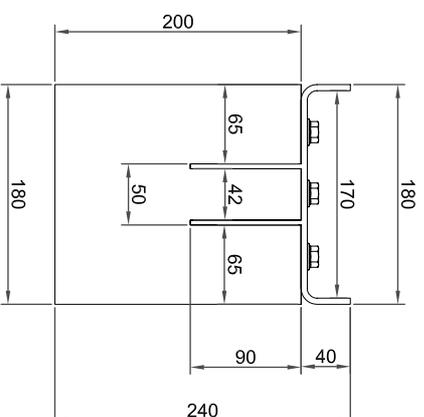
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	128,00
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,57
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,39
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	12006
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	17733
MOR (MPa)	64,0
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C30
Clas. Estructural <sup>2</sup>	+C50

<sup>1</sup> Sin refuerzo o protesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o protesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4160
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	15

ROTURA	
Rotura tercio central	SI
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pieza: LAM-11

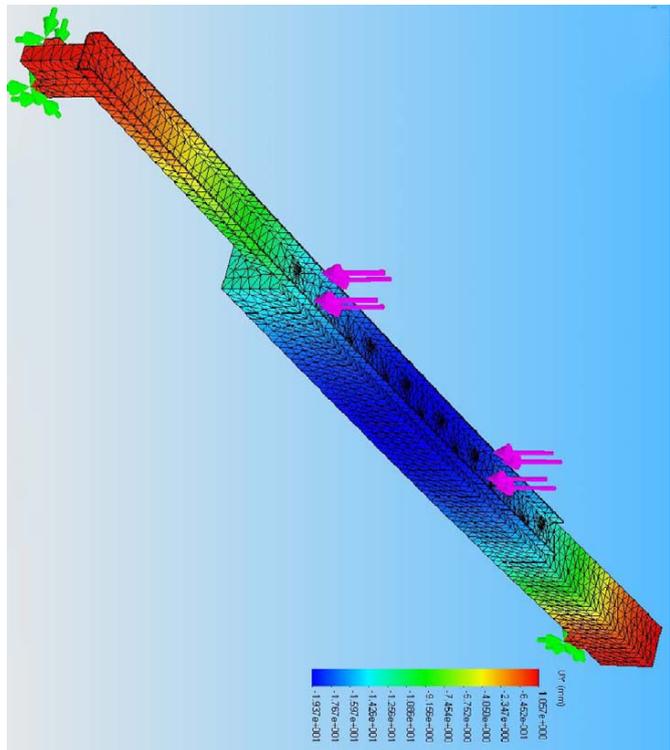
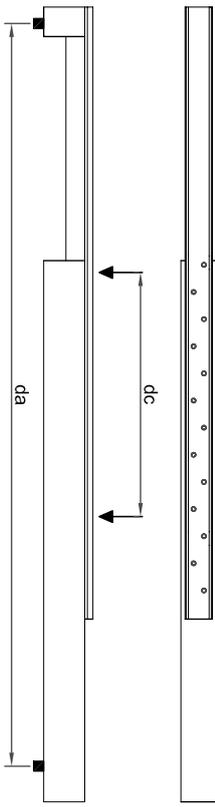
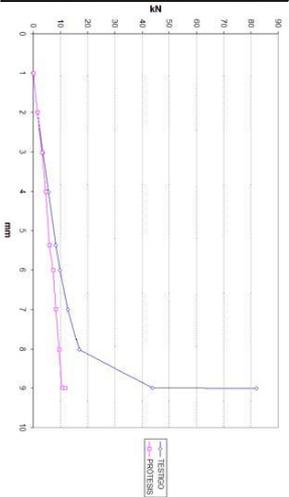
LAMINA Nº3

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

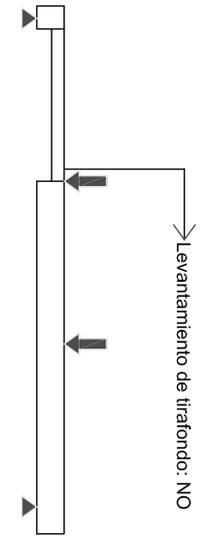
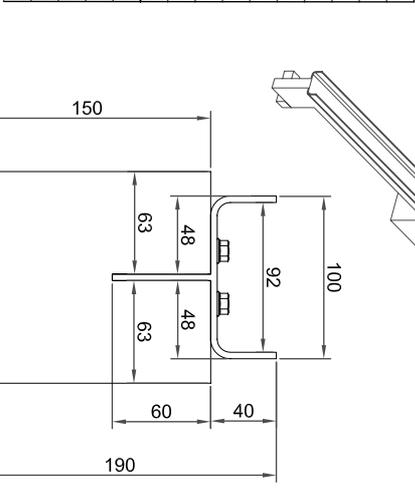
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	8665
E(Rad)	666,54
E(Tang)	412,62
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00



DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	10,5
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	1,23
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	1,54
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	8665
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	6921
MOR (MPa)	10,6
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C16
Clas. Estructural <sup>2</sup>	Rechazo



DATOS GENERALES	
Especie	-
Lote	1
h (mm)	146
b (mm)	126
L (mm)	3000
da (mm)	2700
dc (mm)	90
Humedad (%)	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFORZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pieza: ANTIQUA-15 LÁMINA Nº30

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA

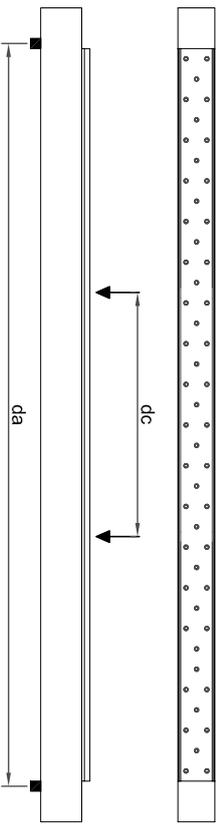
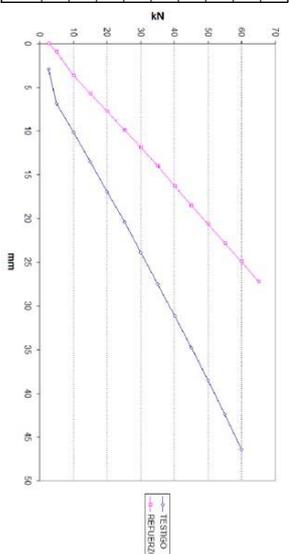


CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	11385
E(Rad)	875,77
E(Tang)	542,14
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)

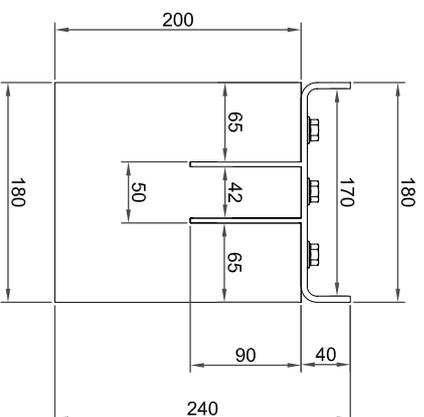
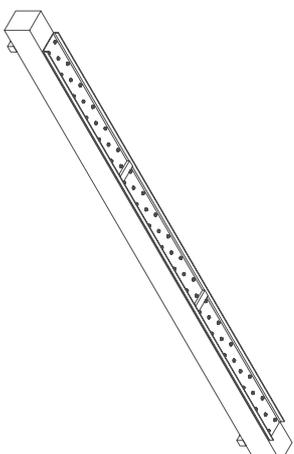
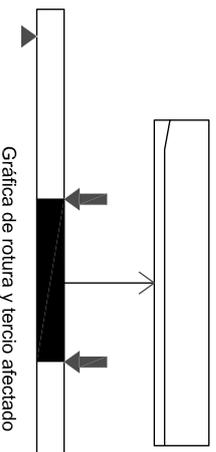
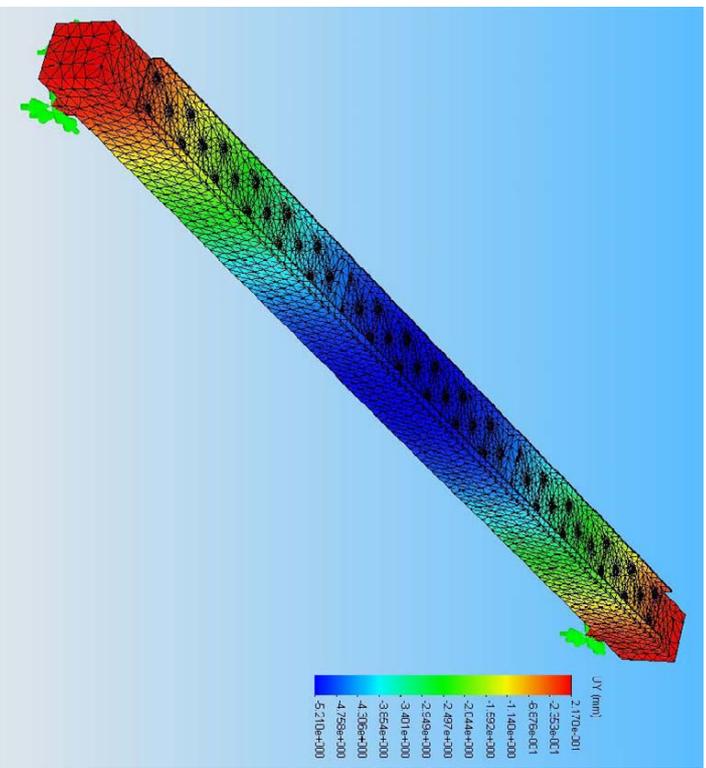
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	117,30
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,61
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,44
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	11385
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	15635
MOR (MPa)	33,60
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C24
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C45

<sup>1</sup> Sin refuerzo o protesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o protesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4166
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	-

ROTURA	
Rotura tercio central	SI
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pieza: LAM-12

LAMINA Nº4

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL OJEA BARRA

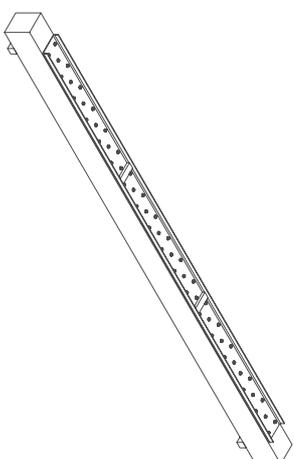
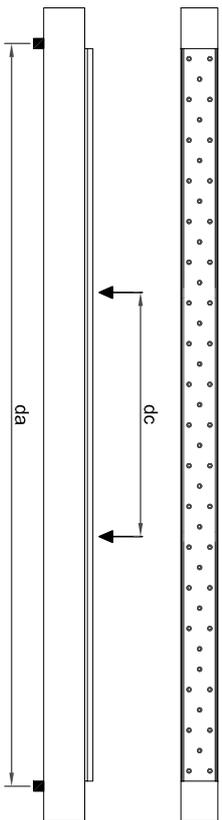
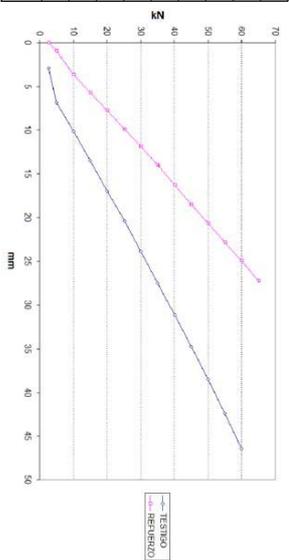
Gráfica de rotura y tercio afectado

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	11617
E(Rad)	893,62
E(Tang)	553,19
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	83,60
G(LR)	745,00
G(LR)	862,00

Tas constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)

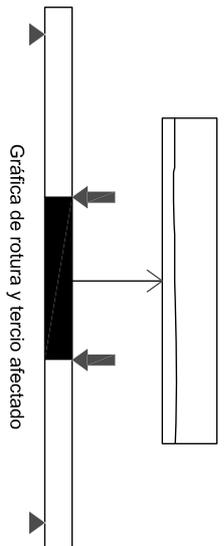
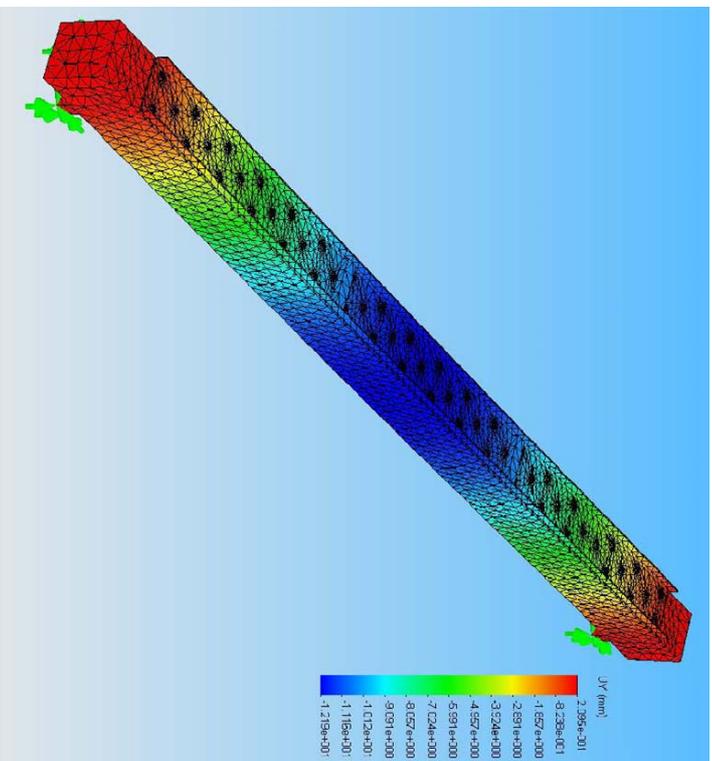
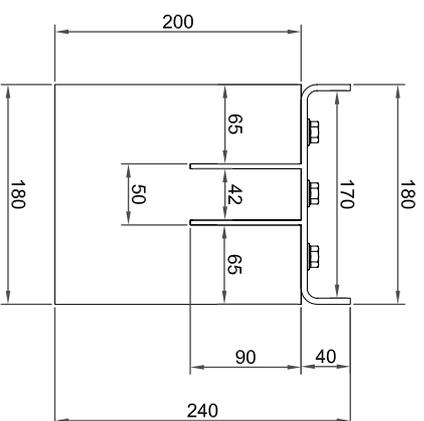
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	100,80
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	116,70
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	14307
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	0,59
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	0,48
MOR (MPa)	50,40
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C24
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C40

<sup>1</sup> Sin refuerzo o prótesis metálica  
<sup>2</sup> Con refuerzo o prótesis metálica



DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	3
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	4504
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	-

ROTURA	
Rotura tercio central	SI
Nudo en canto	-
Nudo en cara	-
Desviación de la fibra	-



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

Pieza: LAM-13

LAMINA Nº5

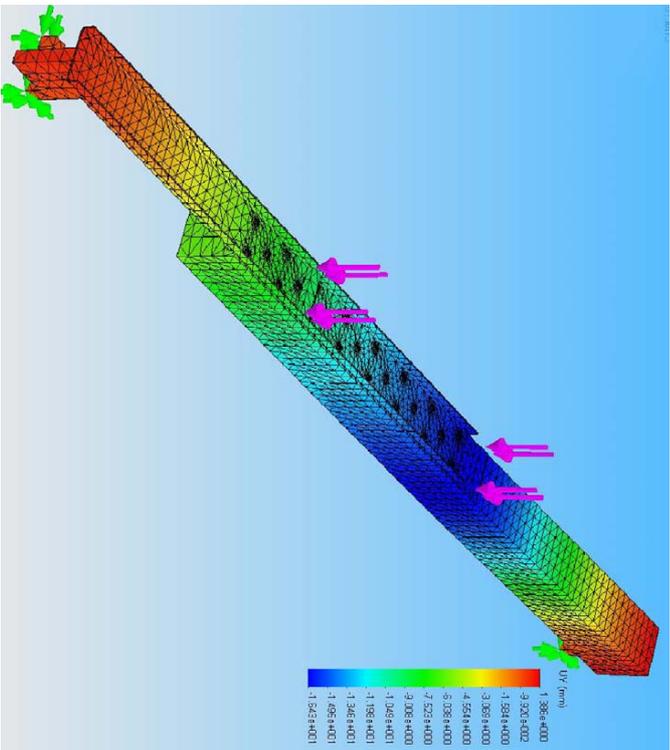
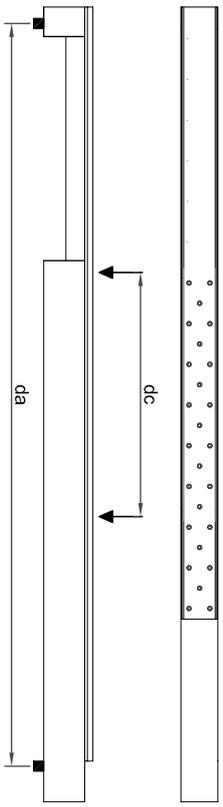
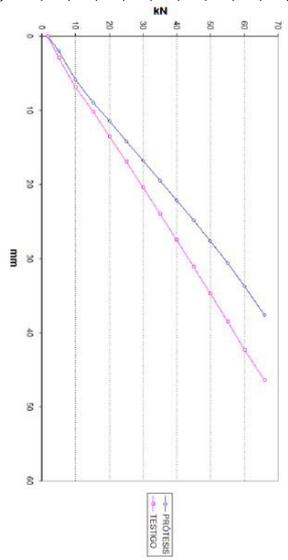
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

Gráfica de rotura y tercio afectado

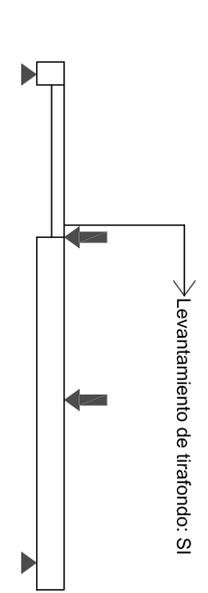
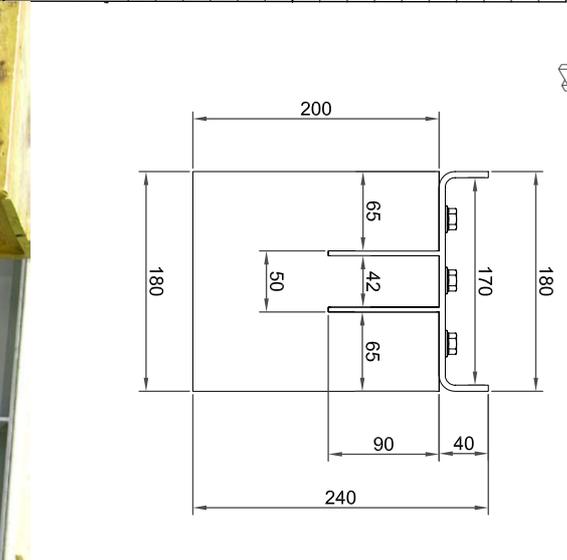
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	10707
E(Rad)	823,62
E(Tang)	509,86
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00



DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	27,50
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,64
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,87
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	10707
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	7943
MOR (MPa)	13,70
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C22
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C14



DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	3997
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	14,10



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pieza: LAM-01

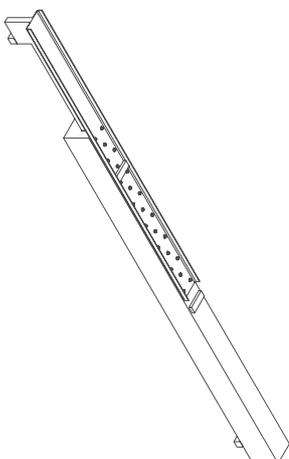
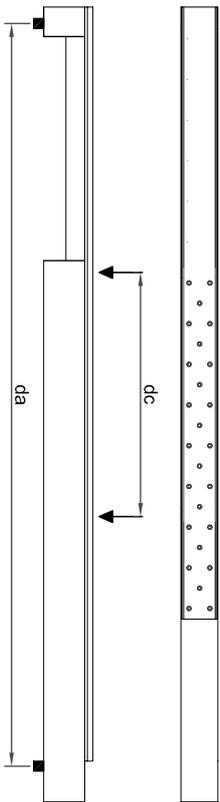
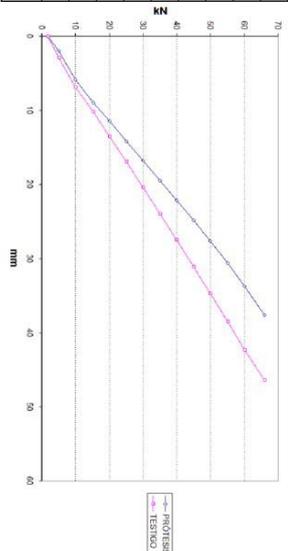
LAMINA N°6

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA

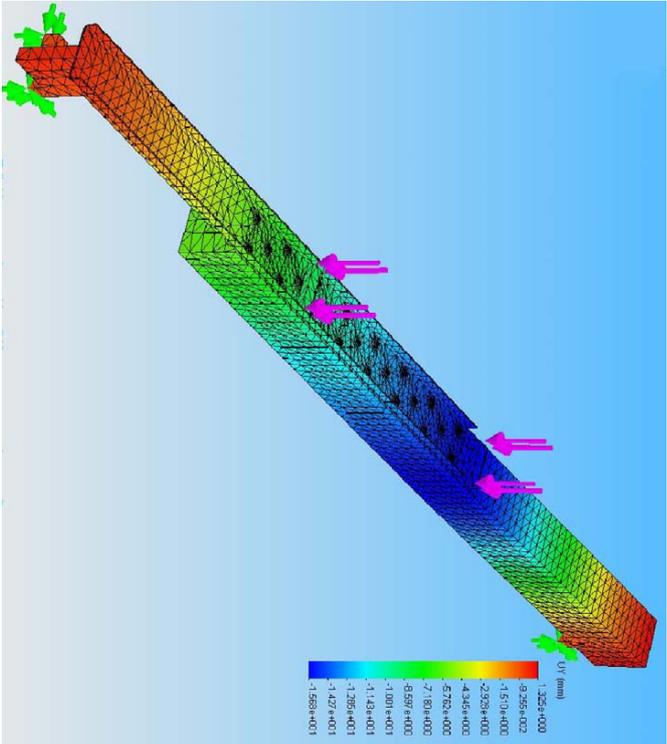
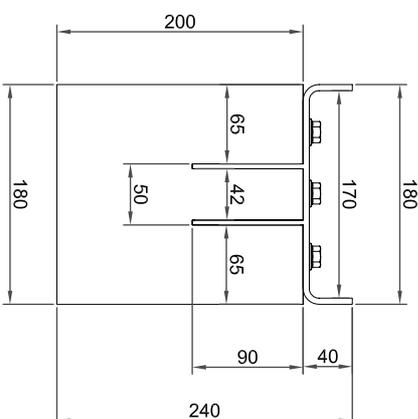
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	11401
E(Rad)	877
E(Tang)	542,91
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00



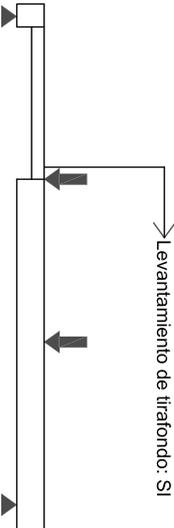
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	27,60
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,61
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,84
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	11401
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	8253
MOR (MPa)	13,80
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C24
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C16



DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	3990
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	16,6



Levantamiento de tirafondo: SI



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTÉSIS METÁLICAS

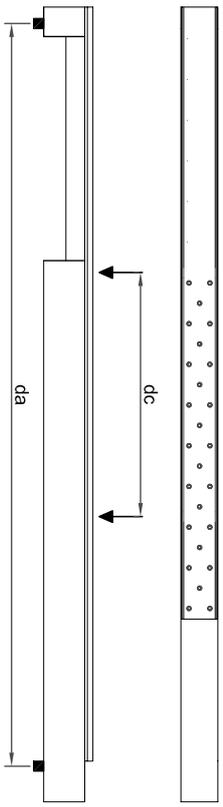
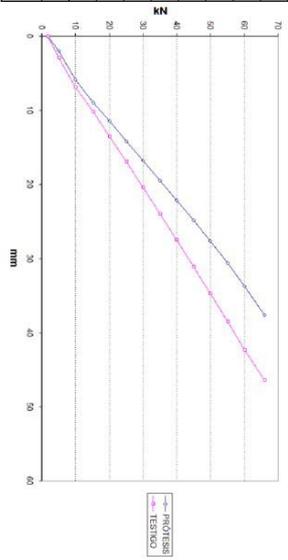
Pieza: LAM-03

LAMINA Nº7

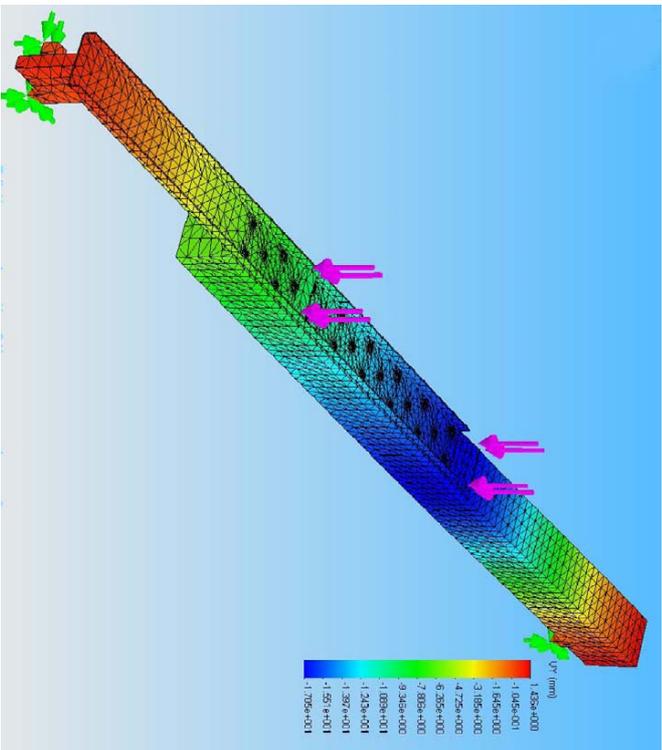
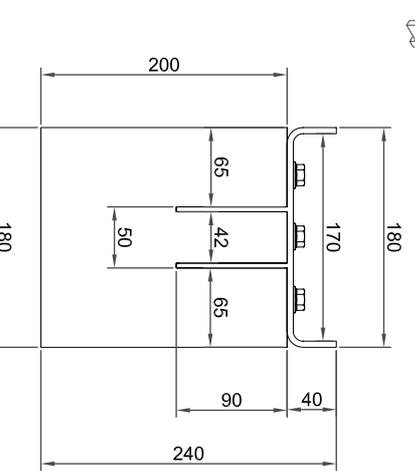
TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	10188
E(Rad)	783,69
E(Tang)	485,14
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00

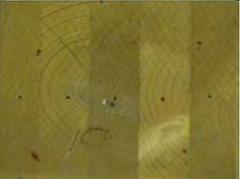
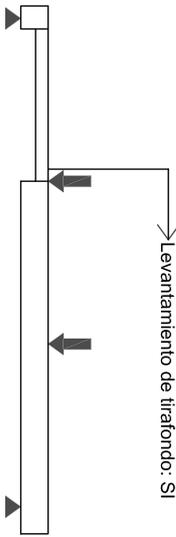
Las constantes de elasticidad están expresadas en MPa (N/mm<sup>2</sup>)



DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	3993
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	14,7



Levantamiento de tirafondo: SI



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PRÓTESIS METÁLICAS

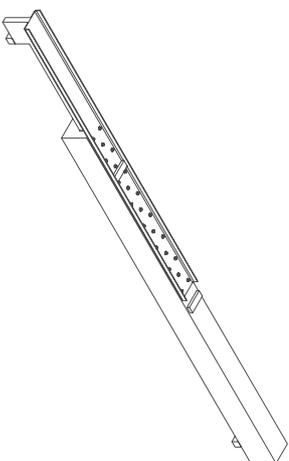
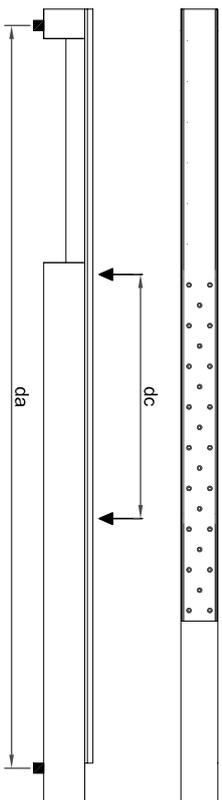
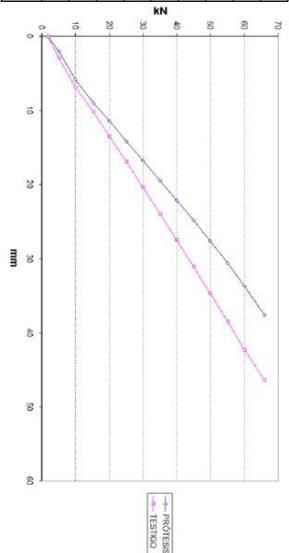
Pieza: LAM-04 LAMINA N°8

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

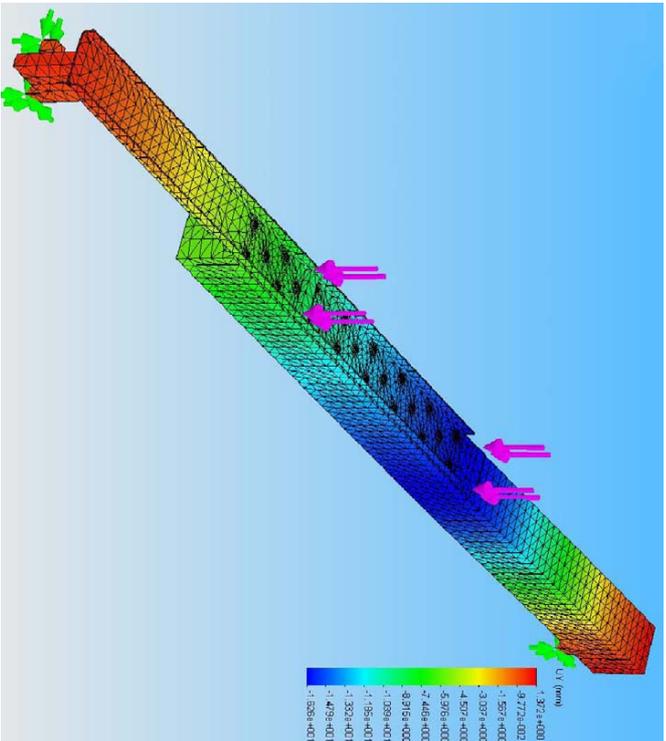
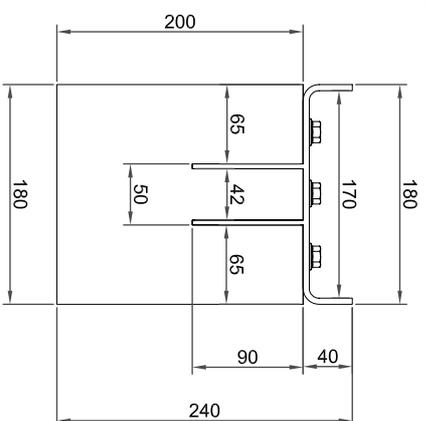
CONSTANTES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS	
E(Long)	10857
E(Rad)	835,15
E(Tang)	517
Coef. Poisson RT	0,39
Coef. Poisson LT	0,43
Coef. Poisson LR	0,31
G(RT)	83,60
G(LT)	745,00
G(LR)	862,00



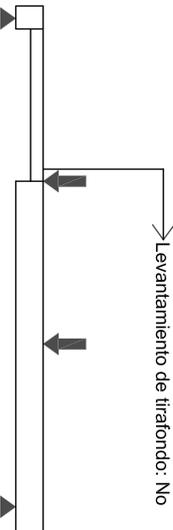
DATOS ENSAYO (EN-408)	
Carga última (kN)	29,1
Pend. EMGCTO <sup>1</sup>	0,64
Pend. EMGCTO <sup>2</sup>	0,82
EMGCTO <sup>1</sup> (MPa)	10857
EMGCTO <sup>2</sup> (MPa)	8378
MOR (MPa)	14,16
Clas. Estructural <sup>1</sup>	C22
Clas. Estructural <sup>2</sup>	C16



DATOS GENERALES	
Especie	Picea Abies
Lote	1
h (mm)	200
b (mm)	180
L (mm)	3995
da (mm)	3600
dc (mm)	1800
Humedad (%)	10,8



Levantamiento de tirafondo. No



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y PROTESIS METÁLICAS

Pieza: LAM-07

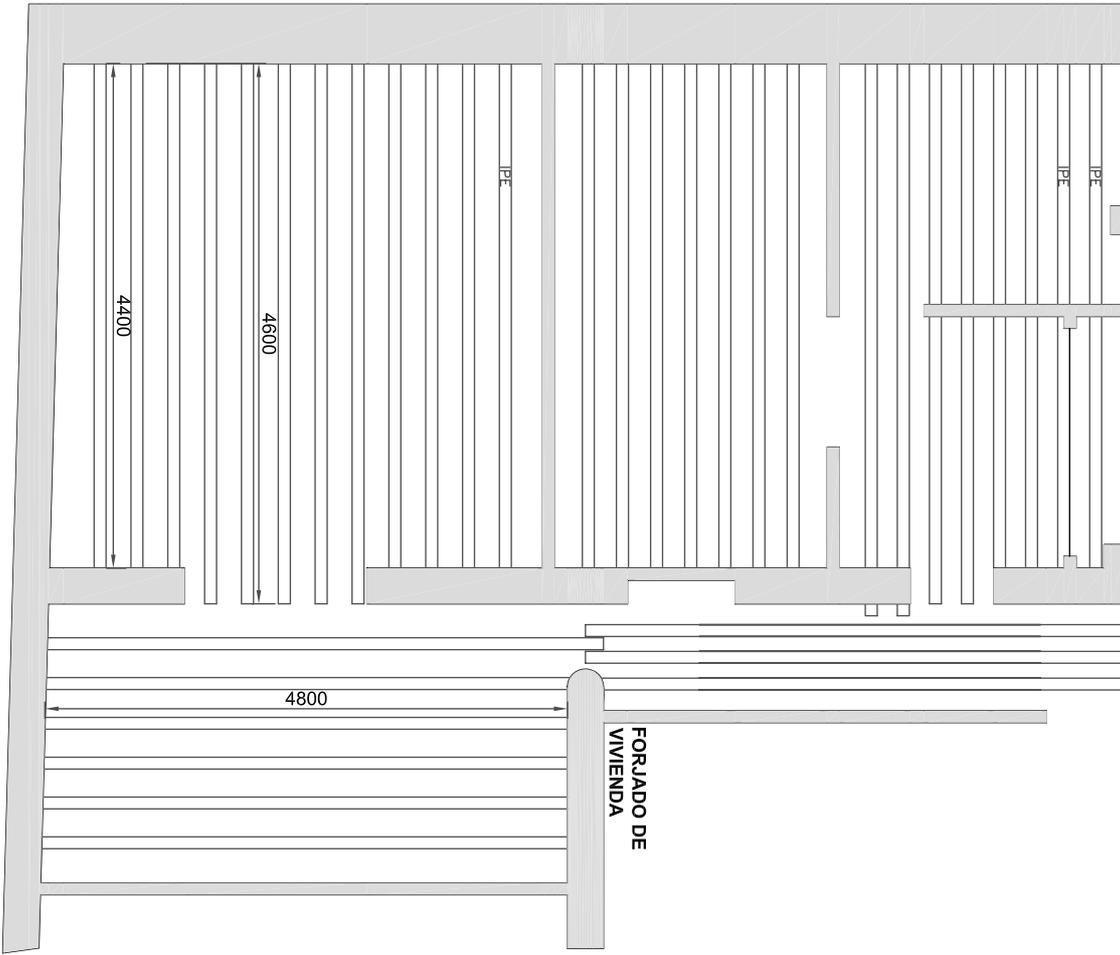
LAMINA N°9

TESIS DOCTORAL  
AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO  
DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL DIEZ BARRA

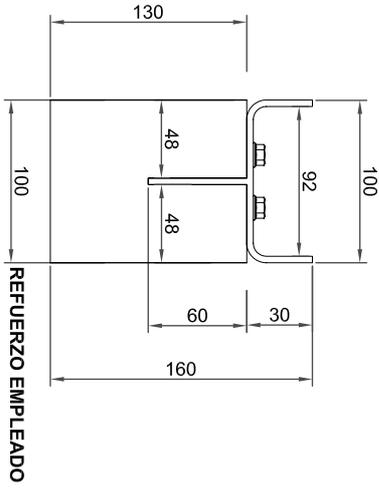
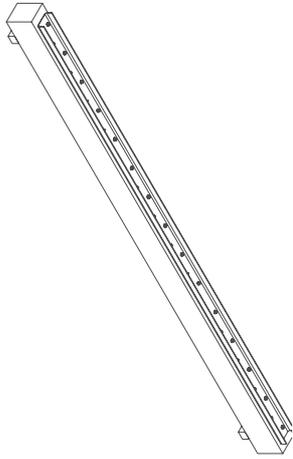
**FICHAS DE ENSAYOS DE CAMPO**



CORTE CON MOTOSIERRA



FORJADO DE VIVIENDA



REFUERZO EMPLEADO



CORTE CON DISCO

MEDICIÓN CON LASER



RECUPERACIÓN DE LA CAPACIDAD MECÁNICA EN  
PIEZAS DE MADERA SOLICITADAS A FLEXIÓN EN  
ESTRUCTURAS TRADICIONALES OPERANDO POR  
LA CARA SUPERIOR MEDIANTE REFUERZOS Y  
PRÓTESIS METÁLICAS

ENSAYOS DE CAMPO LÁMINA Nº31

TESIS DOCTORAL

AUTOR: CARLOS GONZÁLEZ BRAVO

DIRECTORES: LUIS MALDONADO RAMOS Y RAFAEL CHEZ BARRA