



# INFORME PROYECTOS— 2024

EVALUACIÓN, MONITORIZACIÓN Y REHABILITACIÓN INTELIGENTE  
DE FORJADOS HISTÓRICOS CON VIGUETAS DE MADERA

“EMRIMAD”

Informe: “Final de Resultados”

Número de proyecto: 22400010

Expediente: IMAMCA/2024/2

Duración: 01/01/2024 – 31/12/2024

Coordinado en AIDIMME por: Miguel Ángel Abián Pérez



GENERALITAT  
VALENCIANA

IVACE+i

INSTITUTO VALENCIANO  
DE COMPETITIVIDAD  
E INNOVACIÓN

**AIDIMME**  
INSTITUTO TECNOLÓGICO



## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS DEL PROYECTO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>DESARROLLO DEL PROYECTO. ACTIVIDADES REALIZADAS</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS OBTENIDOS</b> .....	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>RESUMEN Y CONCLUSIONES</b> .....	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>ANEXOS Y BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>45</b>



## 1 Introducción. Objetivos del proyecto

El proyecto EMRIMAD pertenece a la línea estratégica de I+D de AIDIMME **BIOMATERIALES**, en concreto a la sublínea de trabajo **BIOO** (Análisis y caracterización de estructuras de madera). Dentro de la Estrategia de especialización inteligente S3 de la Comunitat Valenciana 2021-2027, se encuadra en 1.1. Eco-innovación como palanca de competitividad.

La investigación del proyecto se dirige principalmente al **sector de la construcción y de la rehabilitación**, así como a profesionales de ese ámbito (arquitectos, arquitectos técnicos, ingenieros estructurales, prescriptores, etc.).

El **objeto principal** del proyecto consiste en desarrollar una metodología para la evaluación y rehabilitación inteligente, rápida y económica de los forjados históricos de viguetas de madera. La metodología tiene como fines:

- Proporcionar nuevos usos a inmuebles históricos, cumpliendo la normativa actual y los requisitos adicionales derivados del nuevo uso del inmueble (oficinas, museos, instalaciones artísticas, etc.).
- Promover la economía circular (en concreto, mediante el mantenimiento y la reutilización de materiales de construcción).
- Preservar el abundante patrimonio valenciano,
- Disminuir los impactos ambientales, económicos, sociales y culturales asociados a la construcción/rehabilitación de edificios.

La conservación del patrimonio construido es una tarea de suma importancia y constituye un enorme reto, pues requiere adaptar edificios existentes a los requisitos de la normativa actual (Código Técnico de la Edificación), cuando muchas veces se construyeron antes de que existiera la normativa. En numerosos edificios históricos, así como en inmuebles de particulares, puede encontrarse un sistema constructivo de forjados de viguetas de madera y revoltones de ladrillo,

La mayor parte de los edificios existentes, incluso aunque no tengan carácter patrimonial o histórico, se construyeron mucho antes de que existiera el CTE y no suele conservarse documentación sobre sus métodos constructivos. Por ejemplo, más del 55% de los edificios residenciales son anteriores a 1980.



**Imagen 1. Vista parcial de un forjado de viguetas de madera y revoltón de ladrillo en un inmueble barroco del patrimonio histórico valenciano (siglo XVIII).**

Los **objetivos específicos** del proyecto son los siguientes:

- 1) Caracterizar la respuesta mecánica de las viguetas de madera de edificios históricos.
- 2) Realizar un análisis probabilístico de las propiedades de la madera. Este tipo de análisis permite evaluar el efecto de la variabilidad de las propiedades de la madera sobre el comportamiento mecánico de ésta y de los forjados en conjunto.
- 3) Desarrollar un enfoque centrado en las prestaciones para la evaluación y refuerzo sostenible de los forjados de viguetas de madera frente a incendios.
- 4) Desarrollar una metodología para la monitorización inteligente de forjados históricos de madera, incluyendo cargas mecánicas y ataques bióticos, a fin de evaluar su seguridad en tiempo real y prevenir posibles degradaciones.



Imagen 2. Cubierta de madera de un edificio histórico valenciano tras un fuerte incendio.

Los **resultados** que esperan alcanzarse en el proyecto se exponen a continuación:

- Análisis probabilístico de las propiedades mecánicas de la madera en edificios históricos.
- Caracterización del comportamiento de los forjados de viguetas de madera.
- Monitorización inteligente de forjados históricos de madera.
- Una metodología para la evaluación y rehabilitación inteligente, rápida y económica de los forjados históricos de viguetas de madera.
- Evaluación y refuerzo sostenible de los forjados de viguetas de madera en caso de incendio.
- Aumento del conocimiento en estructuras de madera, así como en el comportamiento de la madera antigua frente a incendios, cargas mecánicas y ataques bióticos.

## 2 Desarrollo del proyecto. Actividades realizadas

### 2.1. Acopio, saneado y acondicionamiento de viguetas de madera antigua

En la anualidad inicial del proyecto (2024) se buscaron en la Comunidad Valenciana viguetas usadas en forjados, procedentes tanto de edificios en rehabilitación como de demoliciones. Para ello se contactó con empresas de rehabilitación y con arquitectos, se visitaron obras en curso y se transportaron las viguetas.

Esta actividad, que continuará en las siguientes anualidades del proyecto, permitió obtener unas 60 viguetas útiles para el proyecto, de madera de pino silvestre, pino laricio, mobila y abeto.



**Imagen 3. Ejemplo de viguetas obtenidas para el proyecto procedentes de un edificio de El Cabañal en proceso de rehabilitación, antes de su recogida por AIDIMME.**



**Imagen 4. Degradación en una de las viguetas acopiadas, debida a carcoma y hongos de pudrición. Esta degradación fue saneada antes de acondicionar la vigueta.**



**Imagen 5. Degradación en una de las viguetas acopiadas, debida a carcoma y hongos de pudrición. Esta degradación fue saneada antes de acondicionar la vigueta.**



**Imagen 6. Ejemplo de viguetas obtenidas para el proyecto procedentes de edificios de Godella, Rocafort y Xàtiva en proceso de rehabilitación, saneadas todas ellas antes de su acondicionamiento.**



**Imagen 7. Ejemplo de viguetas obtenidas para el proyecto procedentes de edificios de Paterna en proceso de rehabilitación, saneadas todas ellas antes de su acondicionamiento.**

Adicionalmente, se seleccionaron y adquirieron 85 viguetas de madera antigua procedente de demoliciones (todas de pino silvestre y de mobila). Para la selección se examinaron previamente en total 230 viguetas, una por una, y se determinaron sus dimensiones (longitud y sección media, pues en muchas de ella su sección variaba), su especie y sus principales defectos (degradaciones, nudos podridos, grietas grandes, gemas, etc.).

El objetivo de esas determinaciones radicaba en asegurarse de que las viguetas seleccionadas eran representativas de las existentes en los inmuebles de la Comunidad Valenciana y de que presentasen los defectos que comúnmente existen en las viguetas de forjados.



**Imagen 8. Ejemplo de lotes de viguetas que fueron examinados para seleccionar viguetas útiles para el proyecto (1).**



**Imagen 9. Ejemplo de lotes de viguetas que fueron examinados para seleccionar viguetas útiles para el proyecto (2). Puede observarse que la sección no siempre es del todo rectangular.**



Imagen 10. Toma de medidas durante la selección de viguetas para su adquisición en el proyecto (1).



Imagen 11. Toma de medidas durante la selección de viguetas para su adquisición en el proyecto (2).



Imagen 12. Toma de medidas durante la selección de viguetas para su adquisición en el proyecto (3).



Imagen 13. Toma de medidas durante la selección de viguetas para su adquisición en el proyecto (4).



Imagen 14. Toma de medidas durante la selección de viguetas para su adquisición en el proyecto (5).



Imagen 15. Transporte de las viguetas adquiridas desde su origen.

Todas las viguetas acopiadas, tanto las obtenidas por AIDIMME procedentes de obras en curso como las adquiridas tras un proceso de selección previa, se sanearon si presentaban degradaciones importantes (normalmente, en los extremos), se extrajeron los clavos y herrajes si tenían, y posteriormente parte de ellas se acondicionaron en cámaras climáticas durante varios meses hasta alcanzar un contenido en humedad del 10-12%. No pudieron acondicionarse todas a la vez por la diversidad de las fechas en que se obtuvieron y por la disponibilidad de las cámaras climáticas, que tienen un espacio limitado para muestras grandes. Parte de las viguetas siguen acondicionándose o se acondicionarán en 2025, pues a finales de diciembre de 2024 aún tenían humedades bastantes superiores al 12%.

En muchos casos, la humedad inicial de las viguetas era elevada (>25%, con algunos casos extremos de 35-38%); pues se encontraban en zonas húmedas como El Cabañal o a la intemperie, lo que sumado a sus secciones grandes y a las densidades elevadas de la madera (hasta 945 kg/m<sup>3</sup>) explica los elevados tiempos que se necesitan para el acondicionamiento. **El acondicionamiento de la madera resulta imprescindible, pues sus propiedades mecánicas varían significativamente con la humedad que tiene; y ensayar viguetas con humedades distintas haría que los datos obtenidos no fuesen comparables.**



**Imagen 16. Degradación en el extremo de una de las viguetas acopiadas. Esta degradación, causada por hongos de pudrición, se saneó antes de acondicionar la vigueta.**



**Imagen 17. Degradación en la parte lateral de una de las viguetas acopiadas. Esta degradación, causada por carcoma gruesa, es superficial (afecta a 1-2 cm de espesor) y no fue necesario sanear la vigueta.**



Imagen 18. Eliminación de clavos en una vigueta durante el proceso de saneamiento.

## 2.2. Ensayos no destructivos de las viguetas

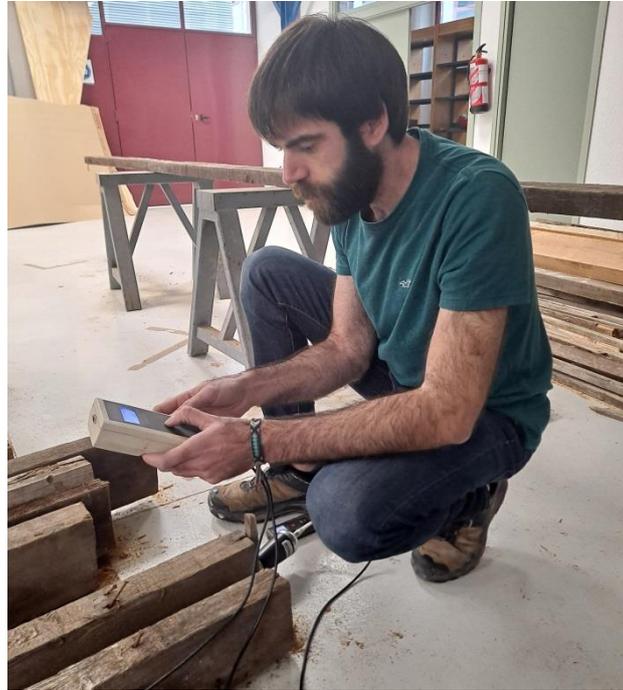
Con el propósito de desarrollar la metodología para la evaluación y rehabilitación inteligente de los forjados históricos de viguetas de madera, a medida que fueron obteniéndose viguetas se evaluaron, una vez acondicionadas, mediante técnicas no destructivas de ensayo (inspección visual, emisión-recepción de ultrasonidos, excitación por impulso).



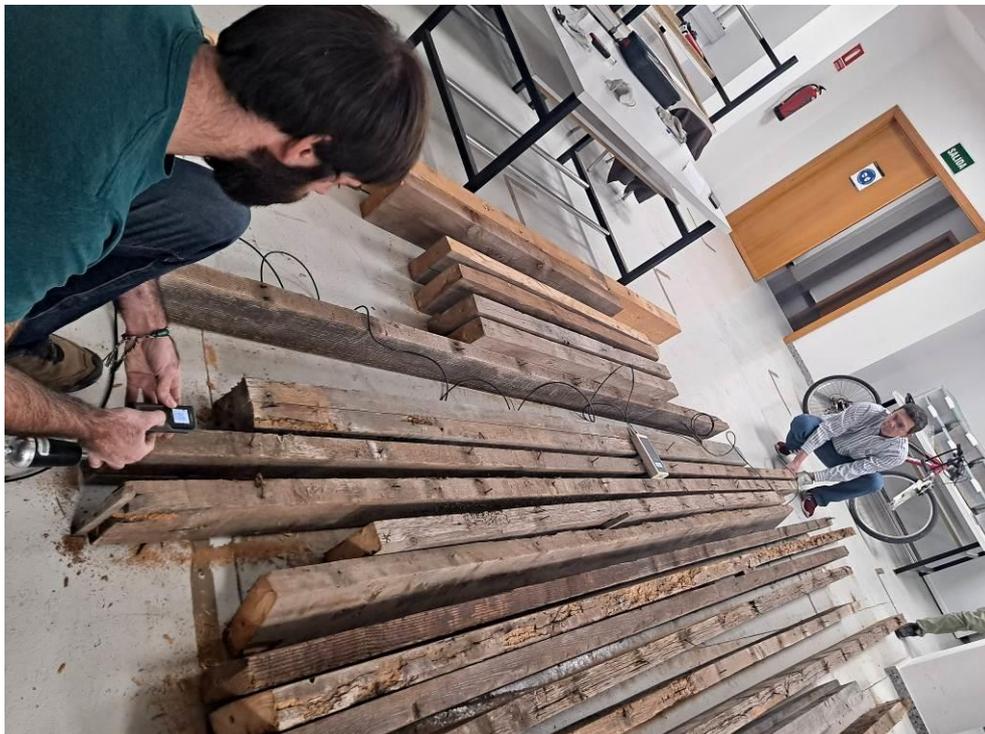
Imagen 19. Taladrado previo de las viguetas para la posterior realización del ensayo de emisión-recepción de ultrasonidos.



Imagen 20. Uno de los transductores usados en el ensayo de emisión-recepción de ultrasonidos.



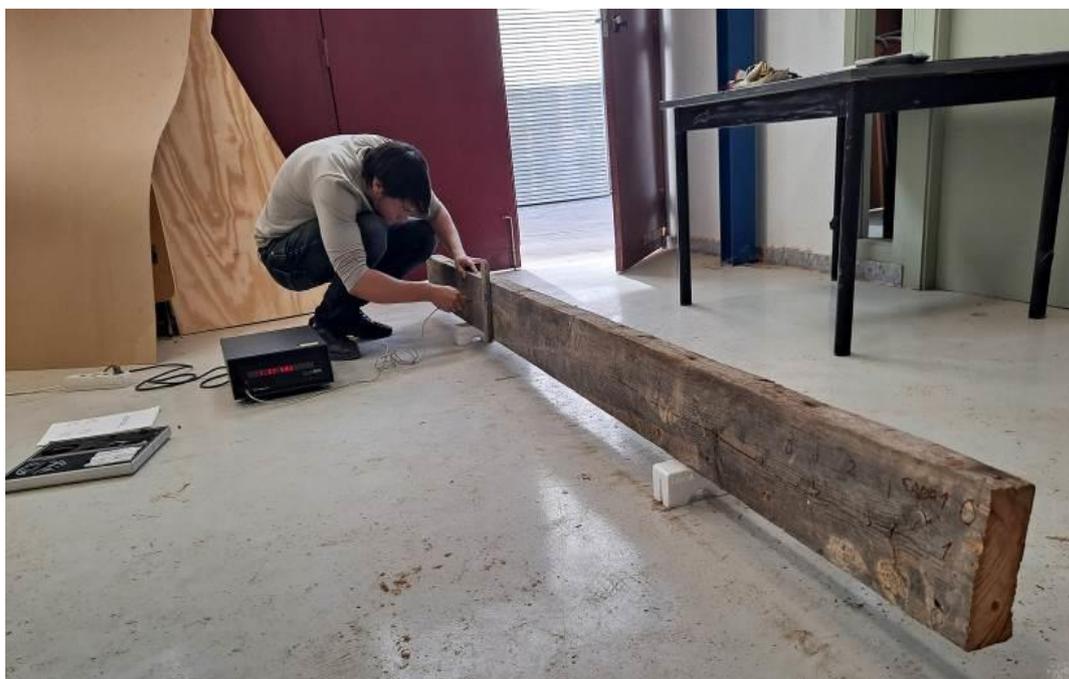
**Imagen 21. Realización de un ensayo de emisión-recepción de ultrasonidos en una de las viguetas acopiadas para el proyecto.**



**Imagen 22. Realización de ensayos de emisión-recepción de ultrasonidos en un lote de viguetas acopiadas para el proyecto.**



**Imagen 23. Realización de un ensayo de excitación por impulso en una de las viguetas acopiadas para el proyecto.**



**Imagen 24. Realización de un ensayo de excitación por impulso en una de las viguetas acopiadas para el proyecto. En la fotografía pueden apreciarse los dos soportes blancos de la vigueta, necesarios para que esta oscile libremente con el impulso.**

En el caso de la inspección visual, se miden y se posicionan en las cuatro caras de cada vigueta los nudos más relevantes, así como grietas, degradaciones (tipo y grado de severidad) y otras características de interés para su resistencia mecánica y conservación.



Imagen 25. Medida y posicionamiento de los nudos en la cara de una vigueta acopiada en Alcoi.



Imagen 26. Ejemplo de nudos medidos, numerados y posicionados (vista parcial de una vigueta acopiada).

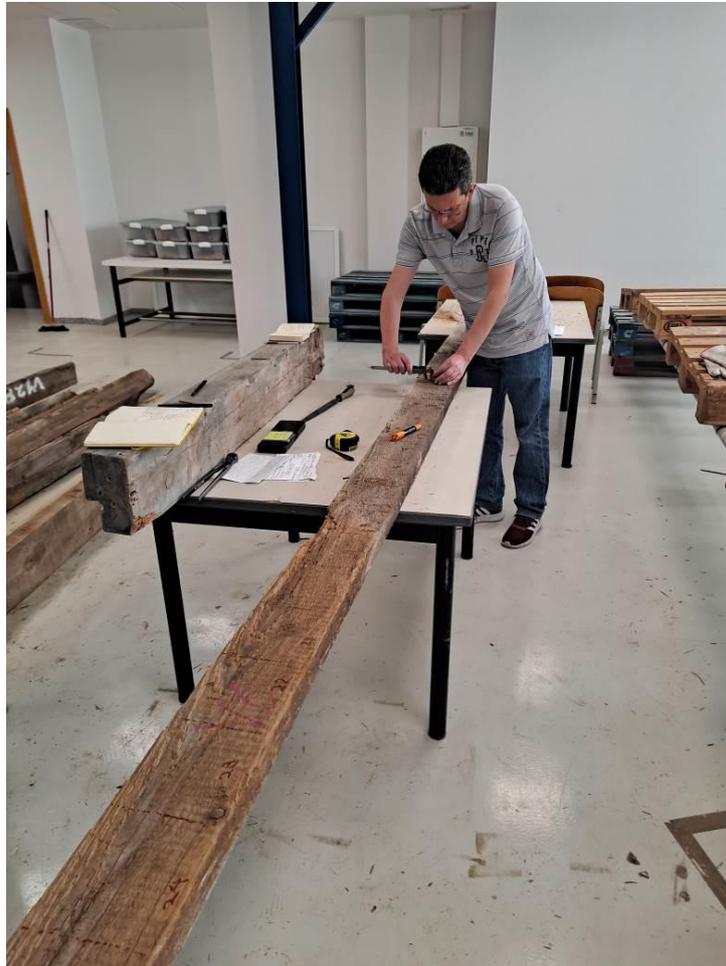


Imagen 27. Medida y posicionamiento de los nudos en la cara de una vigueta acopiada en Xàtiva.

### 2.3. Desarrollo y prueba del sistema de monitorización para la caracterización de las viguetas

Para caracterizar las viguetas completas, se diseñó y desarrolló un sistema de ensayo a flexión que realiza ciclos de carga y descarga a velocidad programable e incluye un actuador hidráulico. Mediante este sistema, partiendo de los cambios de longitud (por unidad de longitud) debidos a las cargas aplicadas, pueden calcularse las curvaturas de las distintas secciones de la vigueta y, después, pueden obtenerse muy precisamente las deflexiones de la vigueta cuando se encuentra sometida a carga. Además, puede determinarse la resistencia a flexión (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE).

Para implementar el sistema de ensayo, fue necesario desarrollar un nuevo y avanzado sistema de monitorización que adquiere datos de tres fuentes diferentes:

- 1) Transductores de desplazamiento lineal variable.
- 2) Unos nuevos sensores de fibra óptica de elevada precisión. Unos integran la medida a lo largo de una extensión larga (10-20 cm, por ejemplo); otros, a lo largo de una extensión corta (1-2 cm, por ejemplo). De esta manera se obtienen medidas que no son meramente en un punto, como sucede en los sensores tradicionales.
- 3) Células de carga muy precisas.



**Imagen 28. Sistema de ensayo a flexión, que realiza ciclos de carga y descarga a velocidad programable, integrado con el nuevo sistema avanzado de monitorización.**



**Imagen 29. Montaje del sistema de ensayo a flexión con el nuevo sistema avanzado de monitorización.**



**Imagen 30. Vista frontal de sistema de ensayo a flexión con el nuevo sistema avanzado de monitorización. Detrás puede verse un lote de viguetas de madera antigua acopiadas para el proyecto, que se ensayaron una vez verificado y calibrado el sistema.**



Imagen 31. Apoyo lateral de un extremo del sistema, en el cual puede verse la célula de carga que se utiliza para medir las reacciones durante los ensayos de flexión.

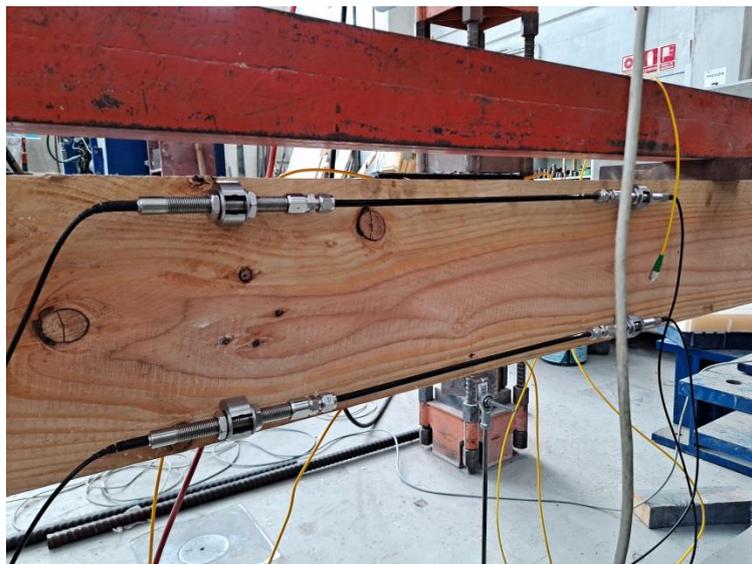


Imagen 32. Detalle de los transductores de desplazamiento lineal variable (dos sensores en posición longitudinal).

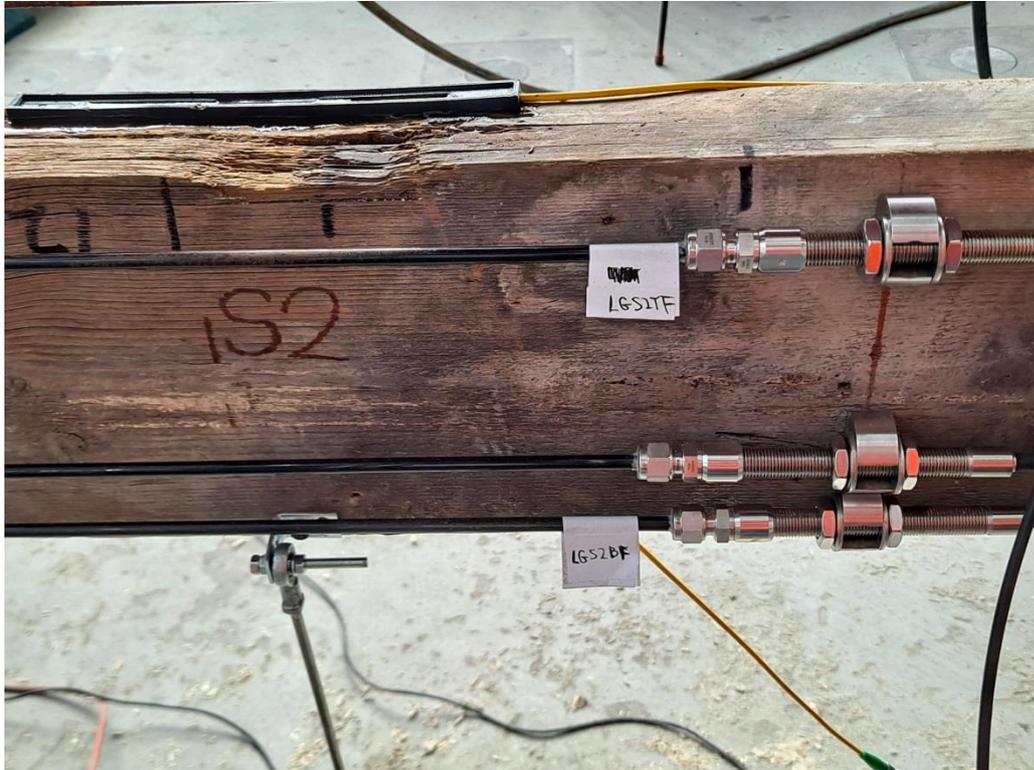


Imagen 33. Detalle de los todos los tipos de sensores utilizados para la monitorización (arriba, en el canto de la vigueta, uno de fibra óptica).



Imagen 34. Detalle de los transductores de desplazamiento lineal variable (tres sensores en posición longitudinal).

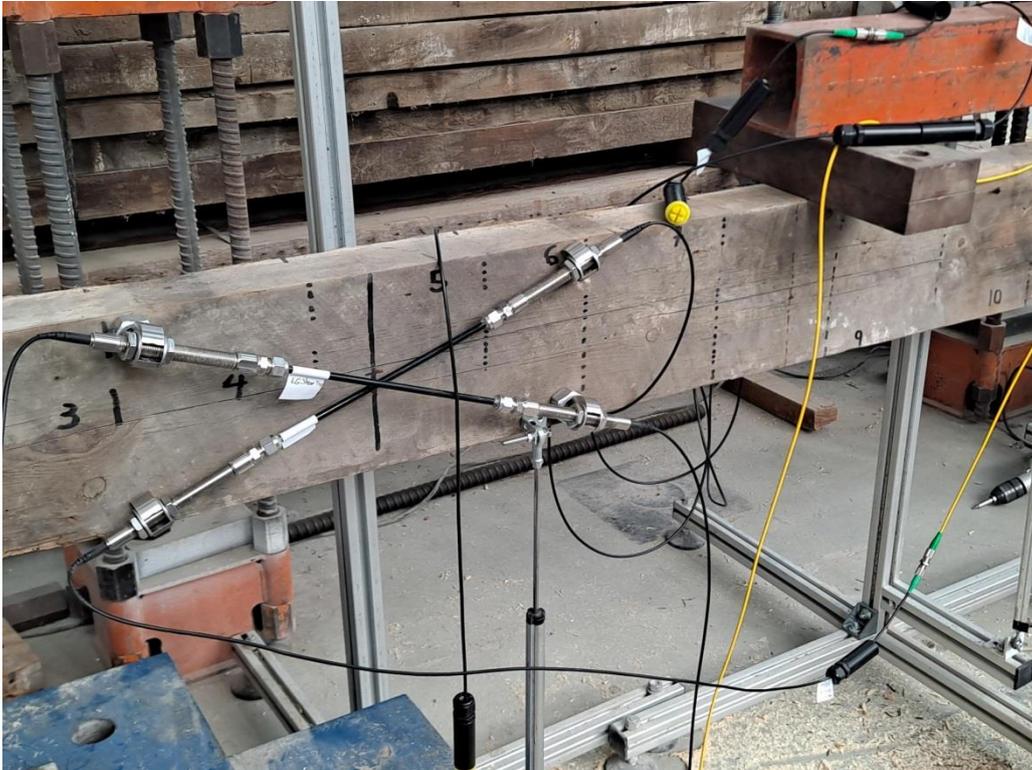


Imagen 35. Detalle de los transductores de desplazamiento lineal variable (dos sensores en posición cruzada).

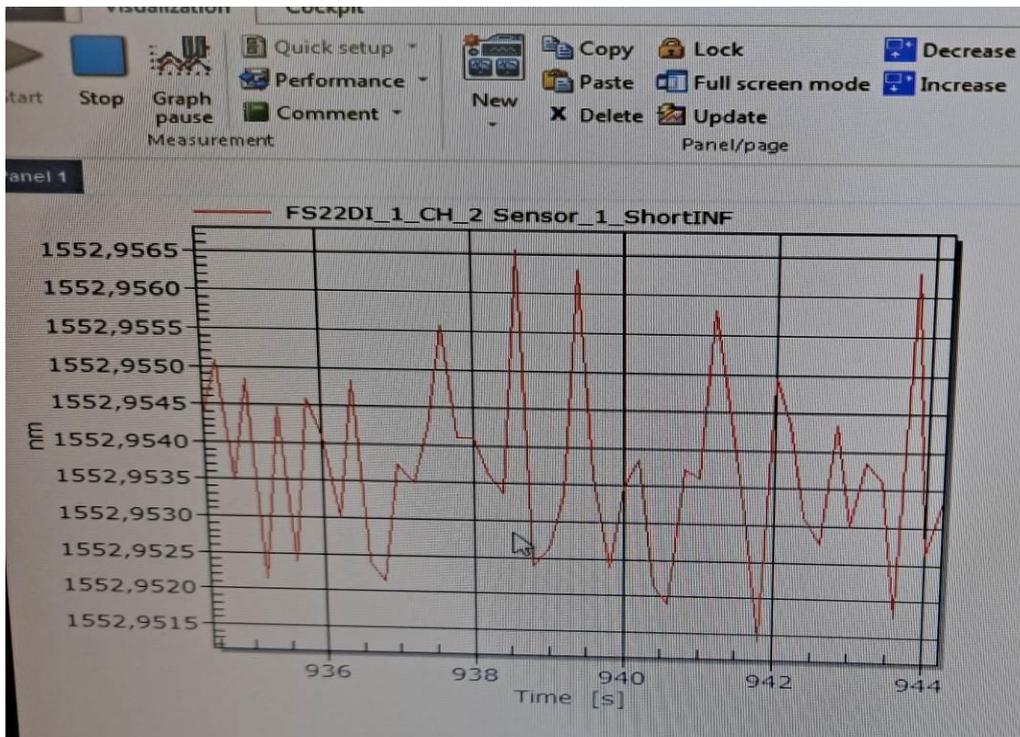


Imagen 36. Deformaciones en tiempo real obtenidas por un sensor de fibra óptica durante un ciclo de carga y descarga sobre una vigueta.



Imagen 37. Verificación de las deformaciones obtenidas mediante los sensores con la obtenida mediante un pie de rey digital calibrado.



Imagen 38. Cables de los sensores conectados a un concentrador, que a su vez va conectado a un ordenador.

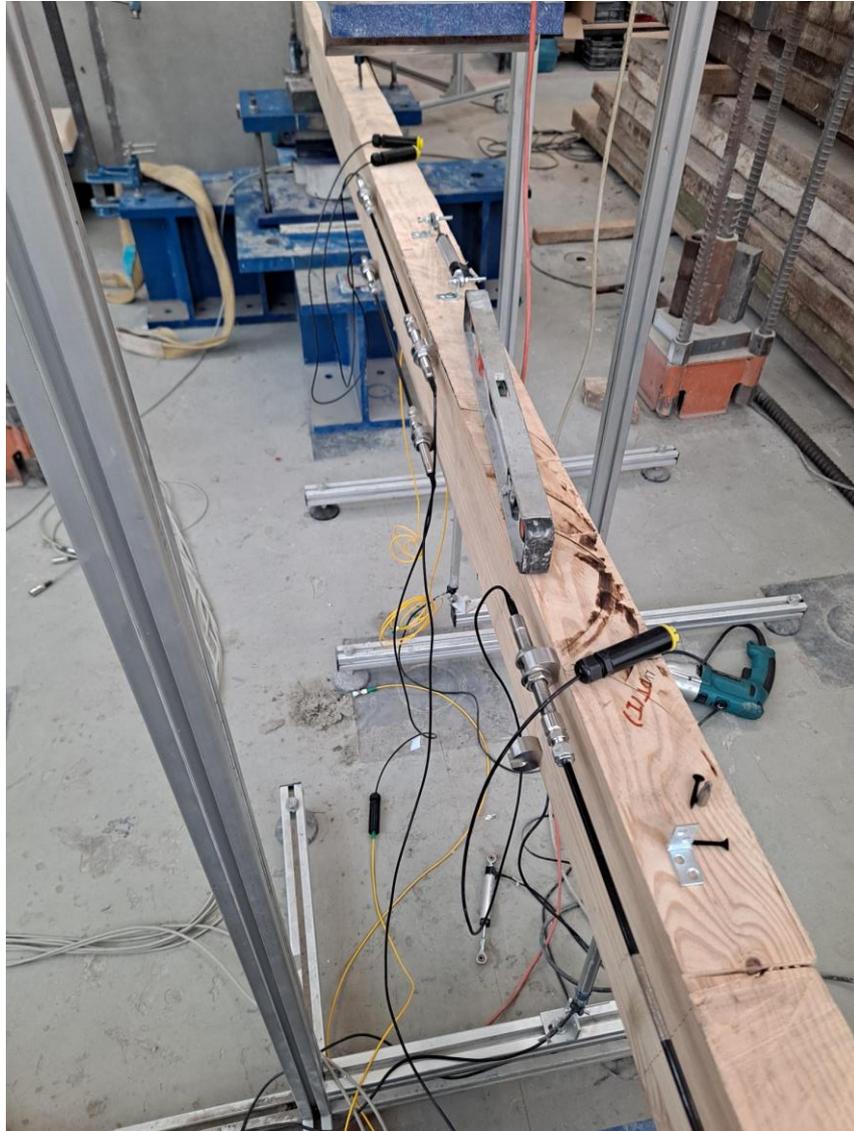


Imagen 39. Vista superior de una viga en una de las pruebas del sistema de ensayo a flexión.

En todos las pruebas del sistema de ensayo a flexión con el nuevo sistema avanzado de monitorización se emplearon escalones de carga, salvo a excepción de algunas pruebas que se hicieron con la carga aplicada de forma continuada.

El motivo del empleo de dichos escalones de carga era obtener información para comprobar primero y luego mejorar:

- a) el ajuste entre los datos obtenidos del actuador hidráulico y los obtenidos mediante los sensores instalados, especialmente los de fibra óptica;
- b) la información necesaria para determinar curvaturas de la sección con diferentes niveles de carga.

### 3 Resultados obtenidos

#### 3.1. Análisis probabilístico de las propiedades mecánicas de la madera en edificios históricos.

Una vez se han determinado las propiedades mecánicas de un elemento estructural de madera, su seguridad estructural se comprueba mediante una aproximación semi-probabilística donde la incertidumbre se introduce con unos coeficientes de seguridad, en los que hay implícita una probabilidad predefinida de fallo ([1], [2] y [3]).

Esta aproximación, ampliamente usada por su sencillez, tiene graves limitaciones:

- No existe un criterio universal para la elección de los coeficientes de seguridad, más allá de normas habituales de buena práctica o la experiencia adquirida mediante años (y el conocimiento derivado de desastres y accidentes).
- Por ese mismo motivo, los coeficientes de seguridad que aparecen en directrices y normativas pretenden tener, equivocadamente, un carácter universal que deslocaliza totalmente el problema, tanto en el espacio como en el tiempo.
- En consecuencia, el valor adoptado para dichos coeficientes causará, en algunos casos, el fallo del sistema (aunque generalmente se toman valores suficientemente altos para que esto no ocurra); y en la mayoría de las ocasiones, un derroche innecesario de recursos (por sobredimensionamiento de los elementos, por número excesivo de refuerzos, etc.).

Este proyecto propone, de forma novedosa, el uso de métodos probabilísticos específicos para estructuras de madera histórica, que serán de gran valor para evaluar y preservar de forma rápida y económica las estructuras de madera existentes, con una elevada fiabilidad y seguridad incluso en caso de incendio o de cambio de uso del inmueble.

La siguiente tabla, a modo de ejemplo, muestra los resultados obtenidos del ensayo de emisión-recepción de ultrasonidos para 76 de las viguetas obtenidas en la anualidad 2024 (especies: pino silvestre, pino laricio y mobila). Por los largos tiempos necesarios para acondicionar las viguetas en cámaras climáticas y que tengan un contenido en humedad estable, homogéneo y próximo a 10-12% (véase la página 12), no todas las viguetas acopiadas en 2024 (145) pudieron en esa anualidad acondicionarse y luego ensayarse en esa anualidad. Se continuará con los ensayos en 2025.

Muestra	Distancia entre sensores (cm)	Velocidad onda ultrasónica (m/s)	Tiempo (ms)	Pico	Especie
VJA 1	299	4025	742	412	PINO SILVESTRE
VJA 2	274	5279	519	1650	PINO SILVESTRE
VJA 3	314	4351	721	326	PINO SILVESTRE
VJA 4	304	4111	739	759	PINO SILVESTRE
VL1-1	473	4828	979	802	PINO LARICIO
VL1-2	452	4270	1058	649	PINO LARICIO
VL1-3	477	4015	1187	500	PINO LARICIO
VL1-4	491	4083	1202	348	PINO LARICIO
VL1-5	478	4414	1082	221	PINO LARICIO
VL1-6	453	3780	1198	540	PINO LARICIO
VL1-7	468	3834	1220	1007	PINO LARICIO
VL1-8	358	4344	824	1127	PINO LARICIO
VL1-9	476	4578	1039	804	PINO LARICIO
VL1-10	486	4552	1069	647	PINO LARICIO
VL1-11	457	5019	910	1294	PINO LARICIO
VL1-12	453	4415	1026	266	PINO LARICIO
VL1-13	387	4392	881	408	PINO LARICIO
VL1-14	481	4027	1194	784	PINO SILVESTRE
VL1-15	489	4422	1105	1247	PINO SILVESTRE
VL1-16	477	5102	934	1016	PINO SILVESTRE
VL1-17	443	4496	985	675	PINO SILVESTRE
VL1-18	323	4339	744	1131	PINO LARICIO
VL1-19	471	5025	937	431	PINO LARICIO
VL1-20	489	4025	1214	332	PINO LARICIO
VL1-21	476	4752	1001	378	PINO LARICIO
VL1-22	481	3839	1253	508	PINO LARICIO
VL1-23	481	4787	1004	428	PINO LARICIO
VL1-24	482	5430	887	400	PINO SILVESTRE
VL1-25	476	4892	973	244	PINO SILVESTRE
VL2-1	392	5192	755	382	MOBILA
VL2-2	376	5643	666	359	MOBILA
VL2-3	371	5534	670	342	MOBILA
VL2-4	361	4603	784	299	MOBILA
VL2-5	386	4725	816	250	MOBILA
VL2-6	454	4951	916	466	MOBILA
VL2-7	354	5494	644	268	MOBILA
VL2-8	388	4962	781	390	MOBILA
VL2-9	393	5155	762	167	MOBILA
VL2-10	428	5005	855	184	MOBILA

VL2-11	444	5649	785	261	MOBILA
VL2-12	394	4867	811	350	MOBILA
VL2-13	427	5525	772	502	MOBILA
VL2-14	408	5401	754	115	MOBILA
VL2-15	425	5534	768	201	MOBILA
VL2-16	421	5413	777	270	MOBILA
VL2-17	420	5383	780	471	MOBILA
VL2-18	447	5144	868	306	MOBILA
VL2-19	395	5437	726	188	MOBILA
VL2-20	442	5487	805	210	MOBILA
VL2-21	451	5021	898	439	MOBILA
VL2-22	452	5139	879	393	MOBILA
VL2-23	454	5105	889	361	MOBILA
VL2-24	455	4993	911	420	MOBILA
VL3-1	151	4474	338	282	PINO LARICIO
VL3-2	346	4737	730	421	PINO SILVESTRE
VL3-3	316	5145	614	327	PINO SILVESTRE
VL3-4	407	5333	763	279	PINO SILVESTRE
VL3-5	430	4552	945	368	PINO SILVESTRE
VL3-6	434	4785	907	265	PINO SILVESTRE
VL3-7	395	5759	686	361	PINO LARICIO
VL3-8	351	5413	648	287	PINO SILVESTRE
VL3-9	473	4168	1135	390	PINO SILVESTRE
VL3-10	428	5904	725	238	PINO LARICIO
VL3-11	324	5578	581	407	PINO LARICIO
VL3-12	493	5760	856	305	PINO LARICIO
VL3-13	460	5196	885	676	PINO LARICIO
VL3-14	317	5375	590	531	PINO LARICIO
VL3-15	319	5827	547	463	PINO LARICIO
VL3-16	325	5195	626	399	PINO LARICIO
VL3-17	335	5625	596	485	PINO LARICIO
VL3-18	334	5907	565	401	PINO SILVESTRE
VL3-19	141	4925	286	466	PINO SILVESTRE
VL3-20	142	4989	285	387	PINO SILVESTRE
VL3-21	145	5244	277	471	PINO SILVESTRE
VL3-22	143	4831	296	644	PINO SILVESTRE
VL3-23	146	4878	299	512	PINO SILVESTRE

**Tabla 1. Resultados del ensayo de emisión-recepción de ultrasonidos para 76 viguetas de madera antigua previamente saneadas y acondicionadas.**

Las distribuciones de probabilidad que se ajustaron a la densidad de las 76 muestras ensayadas se muestran en la siguiente tabla.

Distribución de probabilidad	Pino silvestre EMRIMAD			Mobila EMRIMAD			Pino laricio EMRIMAD		
	CIA	CIAC	CIB	CIA	CIAC	CIB	CIA	CIAC	CIB
Normal	202,89	202,89	202,89	202,89	202,89	202,89	202,89	202,89	202,89
Weibull	198,13	199,25	201,97	227,08	225,92	226,51	439,81	440,13	441,22
Laplace	196,33	199,21	198,05	218,82	220,81	223,47	431,96	430,11	431,25
Logística	202,12	202,87	203,15	227,11	228,27	227,53	438,28	440,05	439,71
Loglogística	200,15	221,43	220,32	219,45	221,25	220,43	435,11	437,02	436,89
Gamma	199,07	201,21	200,36	216,31	217,03	216,62	426,58	427,15	426,75

Tabla 2. Valores de CIA, CIAC y CIB para cada candidata de distribución de probabilidad ajustada a los resultados de densidad de las 76 viguetas de madera antigua previamente saneadas y acondicionadas. Se marcan en verde los valores mínimos de los criterios de información.

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}}{\beta \left(1 + e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}\right)^2} \quad F(x) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-\alpha}{\beta}}} \quad -\infty < X < \infty$$

Imagen 40. Función de densidad de probabilidad y función de distribución de probabilidad de la distribución logística. Fuente: Universidad Autónoma de Madrid.

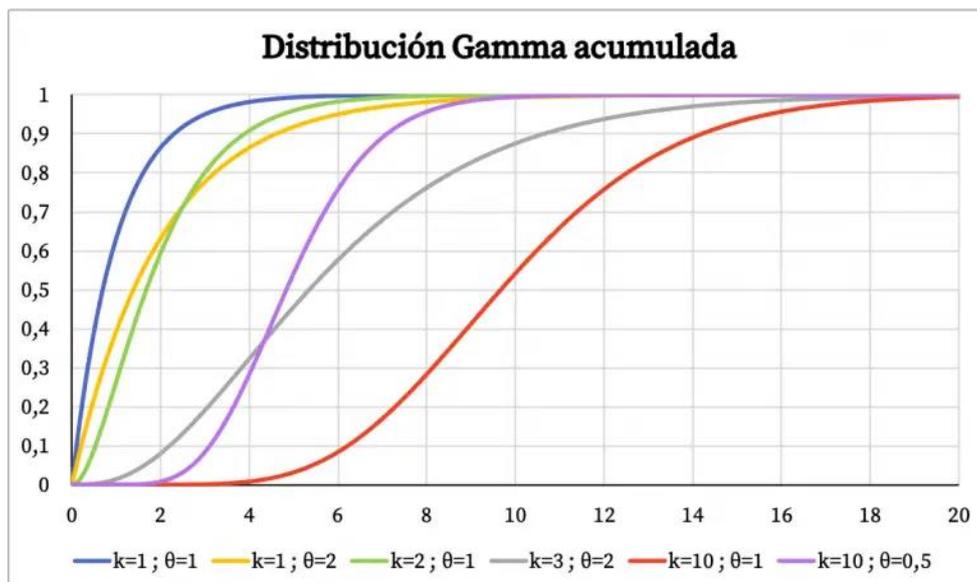


Imagen 41. Representación gráfica de la función de probabilidad de la distribución gamma, con varios valores para sus dos parámetros (k y θ). Fuente: [www.probabilidadyestadistica.net](http://www.probabilidadyestadistica.net)

Las distribuciones de probabilidad que se ajustaron a los datos de MOE (módulo de elasticidad) y MOR (resistencia a flexión), calculados a partir de los resultados de los ensayos de emisión-recepción de ultrasonidos en las 76 viguetas, se muestran en las dos tablas siguientes.

Distribución de probabilidad	Pino silvestre EMRIMAD			Mobila EMRIMAD			Pino laricio EMRIMAD		
	CIA	CIAC	CIB	CIA	CIAC	CIB	CIA	CIAC	CIB
Normal	121,67	121,92	124,21	133,76	134,91	135,04	256,55	256,38	258,13
Weibull	124,22	124,45	125,97	134,07	134,36	135,97	254,83	256,72	257,65
Laplace	118,31	119,71	121,04	139,89	139,98	148,83	265,16	264,25	267,98
Logística	120,48	121,13	122,67	137,18	136,85	136,55	258,82	257,24	268,71
Loglogística	118,35	119,31	122,08	135,55	137,31	136,91	257,31	257,99	261,69
Gamma	119,44	120,91	121,87	134,32	135,07	134,81	253,94	254,92	257,35
Lognormal	118,86	119,26	120,99	134,68	135,11	134,93	254,42	255,93	258,77
Menor valor esperado	124,11	126,02	129,08	136,01	136,88	137,65	258,11	259,03	261,81
Mayor valor esperado	117,62	118,31	119,32	132,99	134,14	134,03	255,54	255,87	257,93

**Tabla 3. Valores de CIA, CIAC y CIB para cada candidata de distribución de probabilidad ajustada a los resultados de MOR obtenidos mediante ensayo de ultrasonidos en las 76 viguetas de madera antigua previamente saneadas y acondicionadas. Se marcan en verde los valores mínimos de los criterios de información.**

Función de distribución de probabilidad	Pino silvestre EMRIMAD			Mobila EMRIMAD			Pino laricio EMRIMAD		
	CIA	CIAC	CIB	CIA	CIAC	CIB	CIA	CIAC	CIB
Normal	321,43	322,76	322,72	319,34	320,76	323,47	654,41	654,81	657,22
Weibull	323,89	324,86	325,44	320,41	322,41	323,44	655,11	655,67	658,23
Laplace	318,45	317,94	318,87	324,92	327,22	326,09	663,41	664,09	665,79
Logística	321,21	318,38	329,99	321,75	324,67	325,82	657,25	657,03	659,45
Loglogística	319,03	320,84	319,92	323,15	323,61	323,99	656,28	656,34	658,90
Gamma	320,12	321,41	322,35	321,03	321,19	322,85	653,56	655,03	655,91
Lognormal	319,42	320,02	321,26	321,62	321,35	322,41	652,27	654,41	655,82
Menor valor esperado	325,11	326,23	327,79	322,02	322,86	324,13	658,22	658,33	661,46
Mayor valor esperado	316,04	316,51	316,85	318,83	320,23	321,15	654,08	657,02	657,74

**Tabla 4. Valores de CIA, CIAC y CIB para cada candidata de distribución de probabilidad ajustada a los resultados de MOE obtenidos mediante ensayo de ultrasonidos en las 76 viguetas de madera antigua previamente saneadas y acondicionadas. Se marcan en verde los valores mínimos de los criterios de información.**

En las tablas, CIA denota el criterio de información de Akaike, que es una medida de la calidad de un modelo estadístico para un conjunto de datos experimentales. CIA proporciona un método sencillo y objetivo que permite seleccionar el modelo más adecuado para caracterizar los datos experimentales. Un valor de CIA aislado no es interpretable por sí solo, y se necesita un conjunto de valores de CIA, como en las dos tablas anteriores, para realizar comparaciones utilizando los mismos datos experimentales.

CIAC (CIA corregido) denota el criterio de Hurvich y Tsai, que es una corrección para el CIA cuando el tamaño de la muestra es pequeño.

CIB denota el criterio de información bayesiano o criterio de Schwartz; es similar al CIA, salvo que penaliza más fuertemente que el CIA aquellos modelos estadísticos que tienen un exceso de parámetros. Es decir, el CIB permite equilibrar el ajuste y la complejidad del modelo, de forma que se evite el sobreajuste de este y al mismo tiempo se capturen los patrones que subyacen en los datos. Como el CIB penaliza los modelos con más parámetros, permite elegir modelos más simples que expliquen adecuadamente los datos sin añadir complejidad innecesaria.

Las siguientes gráficas comparan, para pino silvestre, laricio y mobila (todo antiguo), las funciones de densidad de probabilidad ajustadas a los datos de densidad, de MOE y de MOR obtenidos por ensayos de ultrasonidos de las 74 viguetas de madera antigua previamente saneadas y acondicionadas con la función de densidad de probabilidad propuesta en cada caso por el **Joint Committee on Structural Safety (JCSS) Probabilistic Model Code (PMC)** [1]. Este código, ampliamente aceptado, sirve como código técnico para realizar cálculos estructurales fiables ([2] y [3]). En el marco del JCSS, el diseño y evaluación de una estructura se reduce esencialmente a la toma de decisiones ante la incertidumbre. La teoría de la probabilidad se considera esencial en este contexto ([4] y [5]). Para un diseño estructural dado, puede calcularse la probabilidad de fallo con respecto a todos los estados límite e incertidumbres relevantes y verificar si el diseño es óptimo y aceptable, o no.

El JCSS PMC propone las distribuciones normal y lognormal para la densidad y para las propiedades mecánicas de la madera, respectivamente.

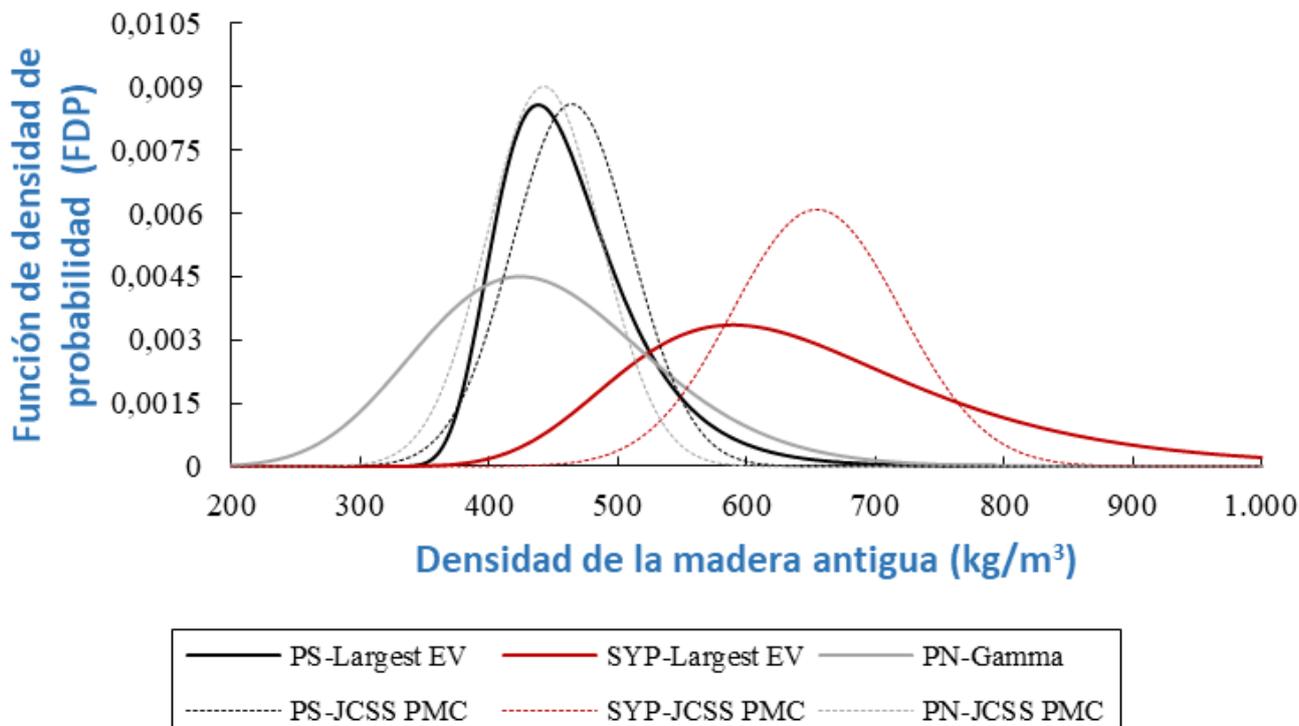


Imagen 42. Funciones de densidad de probabilidad (FDP) ajustadas a los datos de densidad de las 76 viguetas de madera antigua ensayadas, y comparación con las FDP establecidas por el JCSS PMC para esa propiedad (3 curvas con puntos discontinuos).

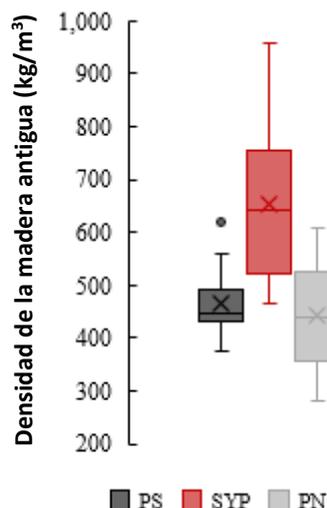


Imagen 43. Diagrama de caja para la densidad de las 76 viguetas de madera antigua ensayadas. PS corresponde a pino silvestre, SYP a mobla y PN a pino laricio.

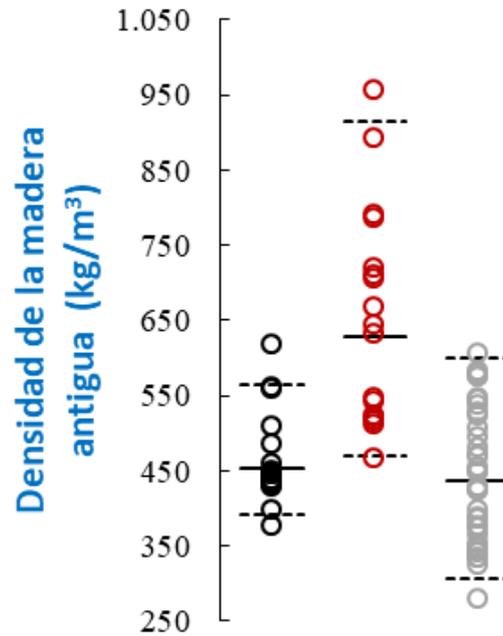


Imagen 44. Datos de densidad para los cuartiles 0,05, 0,5 y 0,95 de las funciones de distribución propuestas en el proyecto (las que mejor ajustan estadísticamente a los datos experimentales). De izquierda a derecha: pino silvestre, mobila y pino laricio.

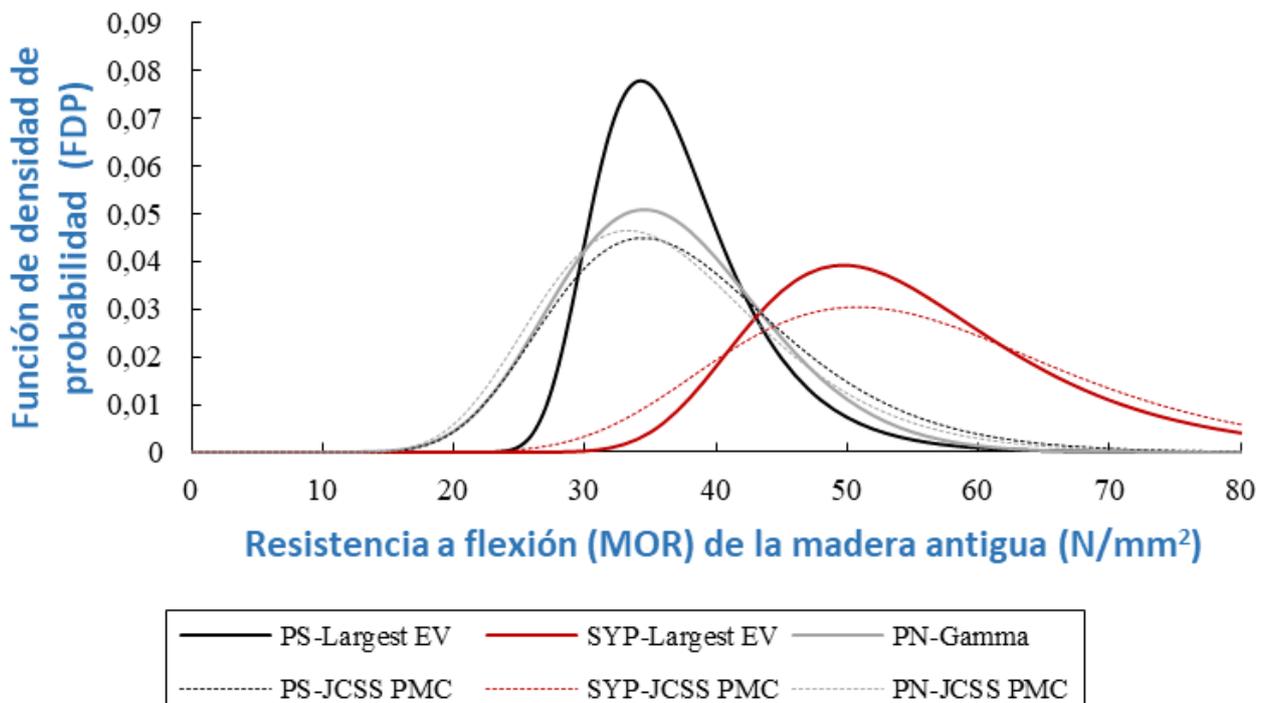


Imagen 45. Funciones de densidad de probabilidad (FDP) ajustadas a los datos de MOR de las 76 viguetas de madera antigua ensayadas, y comparación con las FDP establecidas por el JCSS PMC para esa propiedad (3 curvas con puntos discontinuos).

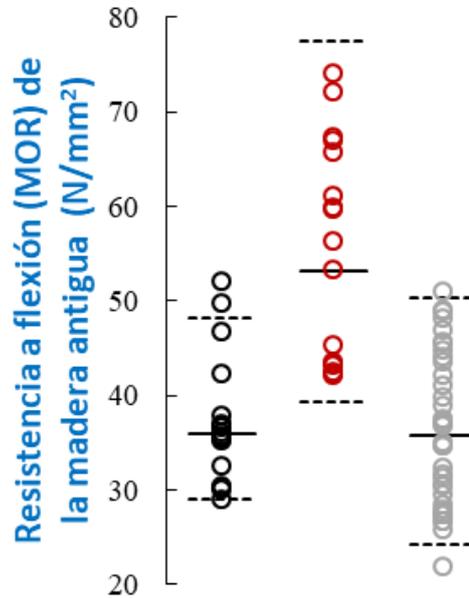


Imagen 46. Datos de MOR para los cuartiles 0,05, 0,5 y 0,95 de las funciones de distribución propuestas en el proyecto (las que mejor ajustan estadísticamente a los datos experimentales). De izquierda a derecha: pino silvestre, mobila y pino laricio.

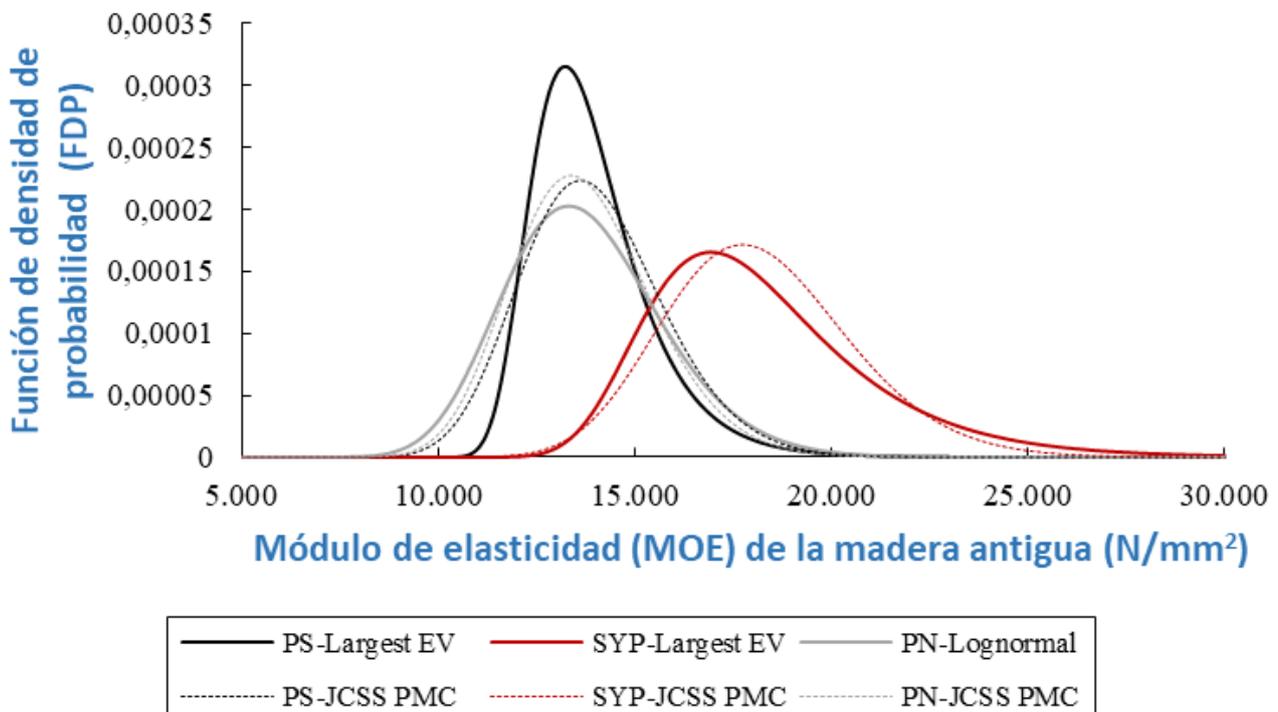


Imagen 47. Funciones de densidad de probabilidad (FDP) ajustadas a los datos de MOE de las 76 viguetas de madera antigua ensayadas, y comparación con las FDP establecidas por el JCSS PMC para esa propiedad (3 curvas con puntos discontinuos).

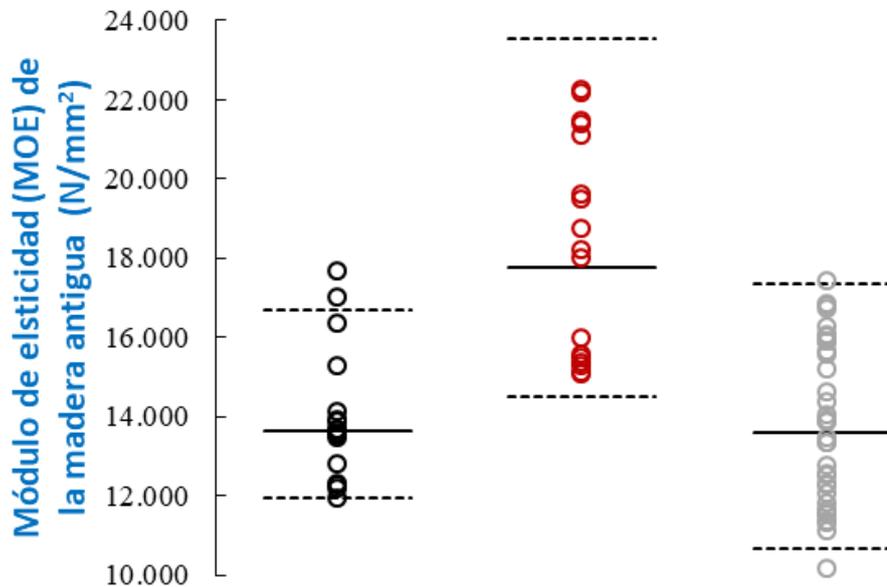


Imagen 48. Datos de MOE para los cuartiles 0,05, 0,5 y 0,95 de las funciones de distribución propuestas en el proyecto (las que mejor ajustan estadísticamente a los datos experimentales). De izquierda a derecha: pino silvestre, mobila y pino laricio.

Analizando las gráficas anteriores y las tablas 2, 3 y 4, puede concluirse lo siguiente:

- La densidad del pino silvestre antiguo y de la mobila antigua se ajusta mejor a una distribución de mayor valor esperado que a una distribución normal, que es la propuesta por el JCSS PMC para la densidad.
  - La densidad del pino laricio antiguo se ajusta mejor a una distribución gamma que a una distribución normal, que es la propuesta por el JCSS PMC para la densidad.
  - La resistencia a flexión (MOR) del pino silvestre antiguo y de la mobila antigua se ajusta mejor a una distribución de mayor valor esperado que a una distribución lognormal, que es la propuesta por el JCSS PMC para el MOR.
  - La resistencia a flexión (MOR) del pino laricio antiguo se ajusta mejor a una distribución gamma que a una distribución lognormal, que es la propuesta por el JCSS PMC para el MOR.
  - El módulo de elasticidad (MOE) del pino silvestre antiguo y de la mobila antigua se ajusta mejor a una distribución de mayor valor esperado que a una distribución lognormal, que es la propuesta por el JCSS PMC para el MOR.
  - El módulo de elasticidad (MOE) del pino laricio antiguo se ajusta a una distribución lognormal, que es la propuesta por el JCSS PMC para el MOE.
- Por lo tanto, en este caso hay coincidencia entre los resultados obtenidos y el JCSS PMC.**

De los resultados obtenidos se deduce que, para madera antigua, es importante adoptar distribuciones de probabilidad que consideren la especie de la madera y si esta es antigua o actual.

Por otra parte, las distribuciones recomendadas por el JCSS PMC difieren significativamente de aquellas que en este proyecto se ha encontrado provisionalmente, a falta de más ensayos, que ajustan mejor a los datos experimentales. De las tres propiedades analizadas en tres especies de madera antigua, solo para el módulo de elasticidad del pino laricio coincide la distribución propuesta por el JCSS PMC con la que mejor se ajusta a los datos experimentales.

### 3.2. Sistema de ensayo a flexión con sistema avanzado de monitorización

El sistema de ensayo a flexión, que incluye un sistema avanzado de monitorización (véase la parte 2.3 de esta memoria), se puso en marcha y se probó.

A modo de ejemplo, las dos siguientes gráficas muestran las medidas en voltios de un sensor/transductor de desplazamiento lineal variable (lado izquierdo y lado derecho) en un ensayo de flexión en una vigueta de mobila.

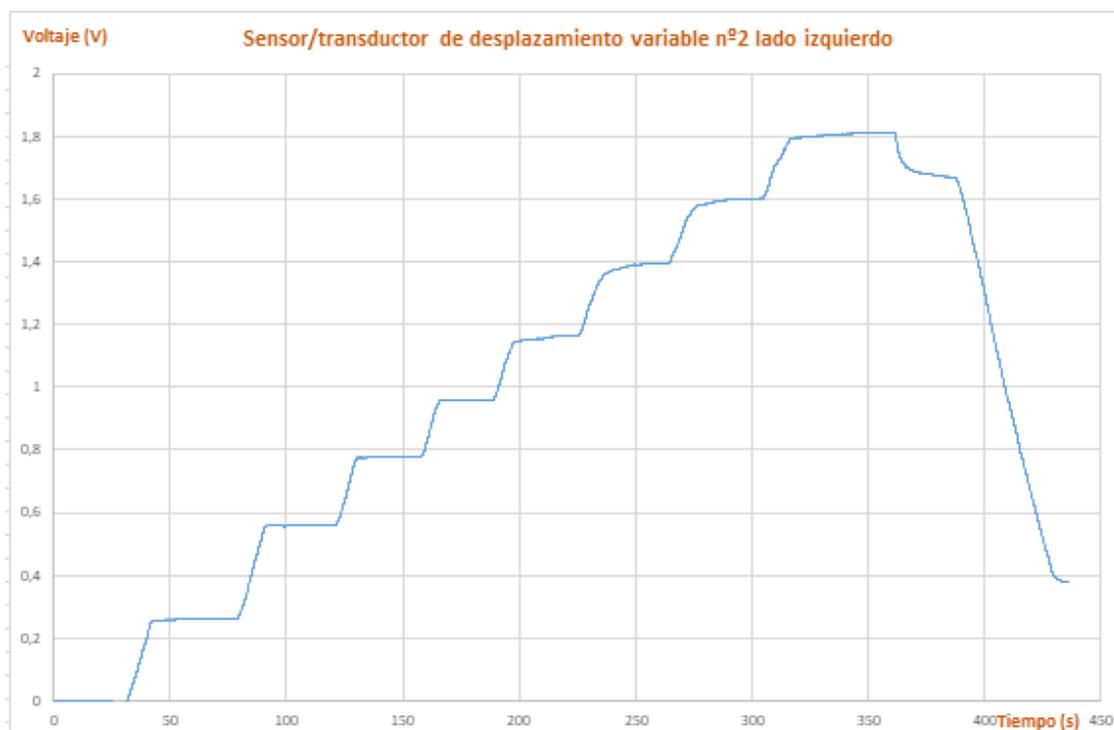


Imagen 49. Señal eléctrica (en V) de un sensor transductor de desplazamiento lineal variable (lado izquierdo) en función del tiempo (en s).

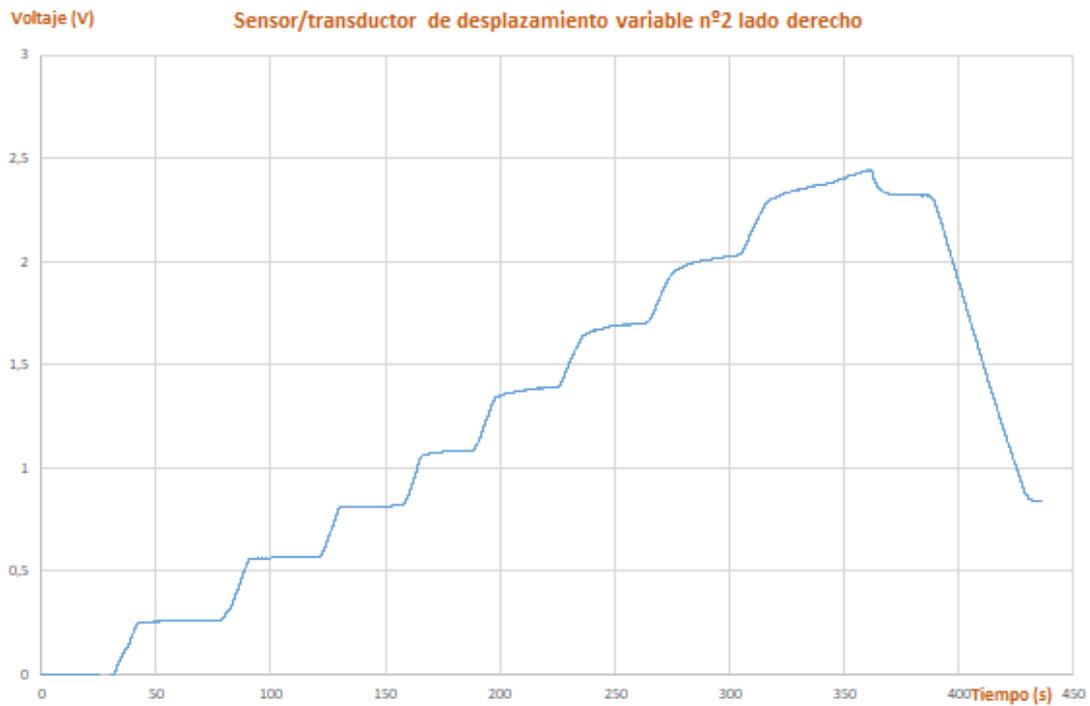


Imagen 50. Señal eléctrica (en V) de un sensor transductor de desplazamiento lineal variable (lado derecho) en función del tiempo (en s).

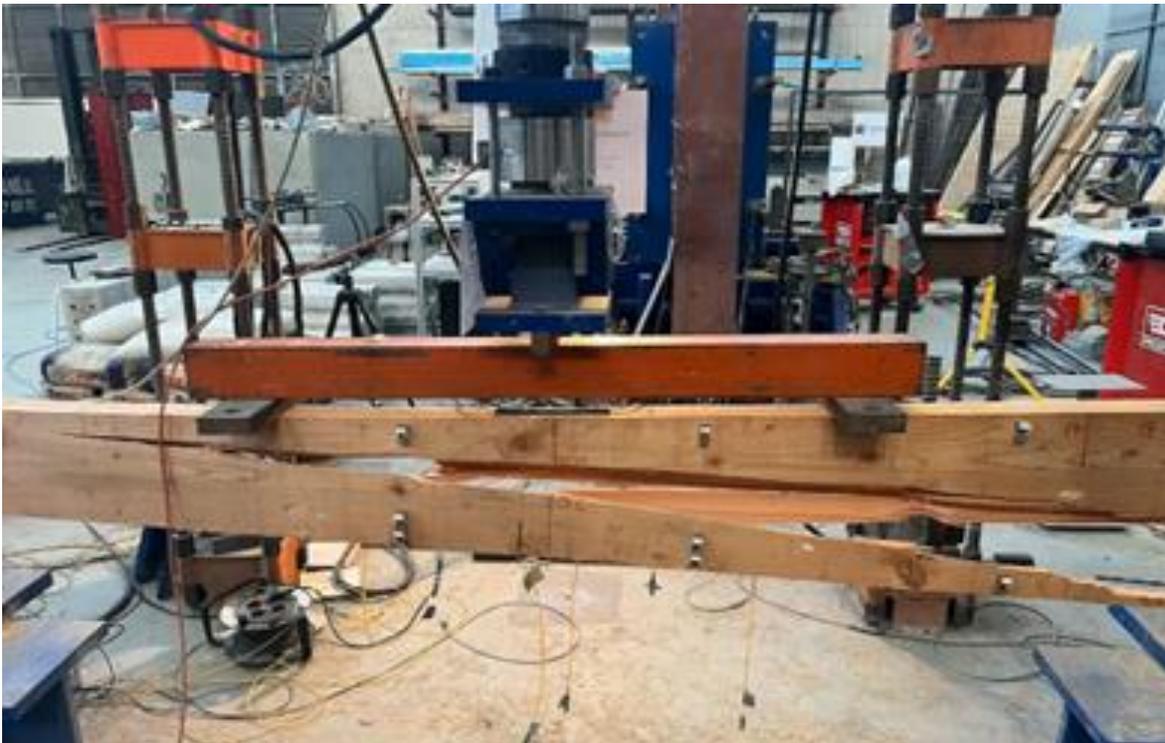


Imagen 51. Rotura de una viga durante un ensayo de flexión.



Imagen 52. Detalle de la rotura de una vigueta durante un ensayo de flexión.

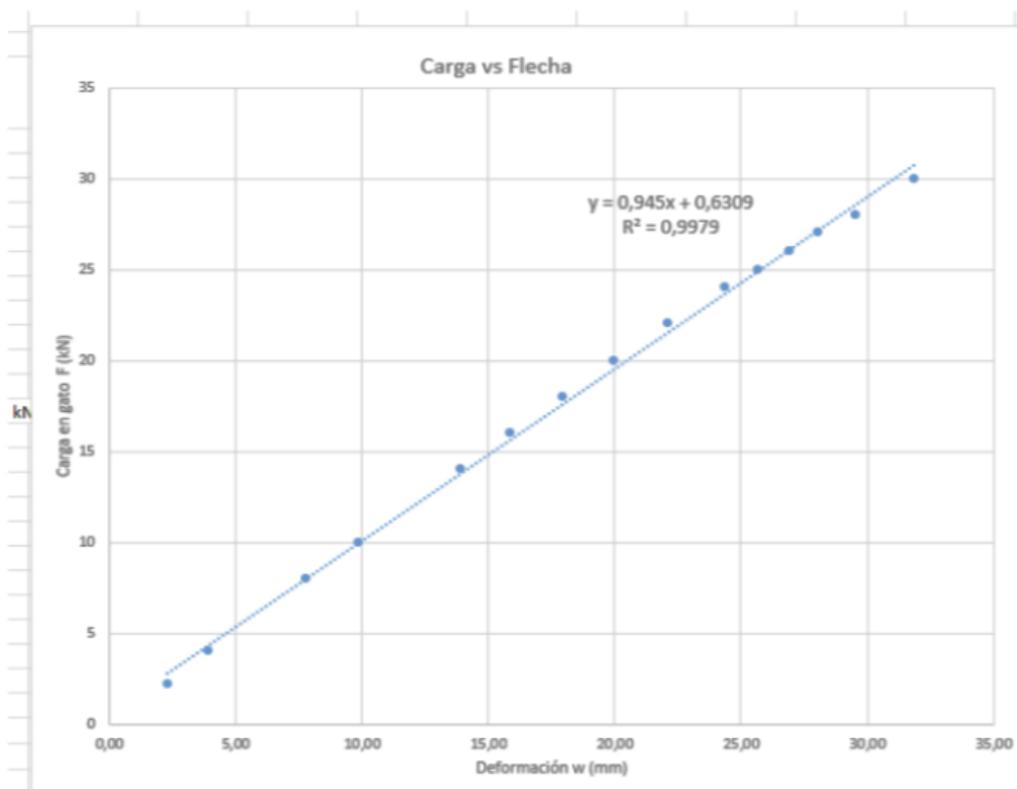


Imagen 53. Gráfica de carga aplicada a la vigueta (kN) frente a flecha (mm) durante un ensayo de flexión.

Debido a la complejidad del nuevo sistema de monitorización, al gran número de pruebas de configuración y ensayo que se hicieron y a los largos periodos necesarios para acondicionar las viguetas a una humedad del 10-12% (véase la página 12 de esta memoria), en la anualidad 2024 pudieron ensayarse con él solamente 10 de las viguetas acopiadas previamente. Los ensayos proseguirán en la anualidad 2025.

El nuevo sistema de monitorización servirá también en la anualidad 2025 para **definir la metodología de monitorización de los forjados de madera**. Una vez analizados todos los resultados y obtenidas las conclusiones, podrá implantarse de forma óptima la monitorización en forjados completos.

### 3.3. Aplicación de la Inteligencia Artificial para predecir las propiedades mecánicas de la madera antigua.

Con parte de los datos obtenidos de MOR y MOE se realizaron algunas pruebas preliminares de uso de redes neuronales artificiales multicapa (perceptrón multicapa), un método de Inteligencia Artificial, para predecir esas propiedades. Para el entrenamiento de las redes neuronales se usaron el 70% de los datos; y para la validación el 30% restante.

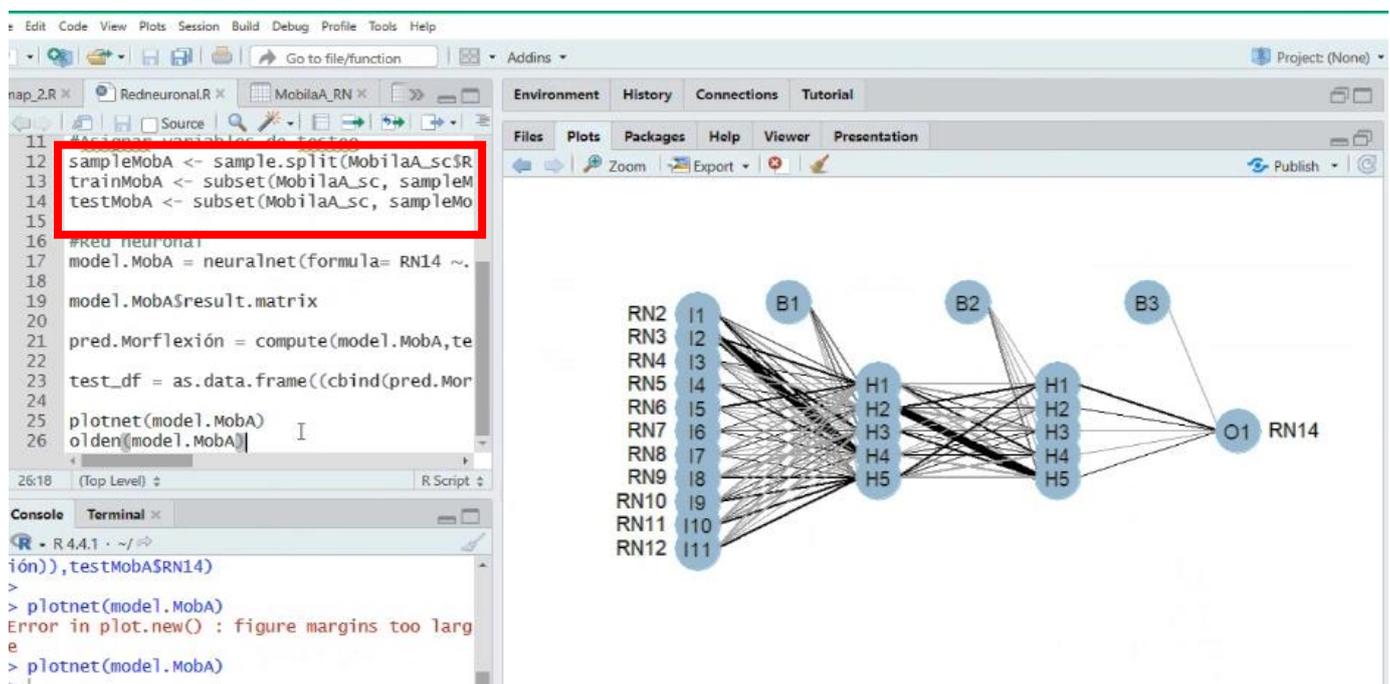


Imagen 54. Prueba preliminar de uso de una red neuronal artificial de cuatro capas para ajustar a los datos de MOE obtenidos (solo para la especie mobila).

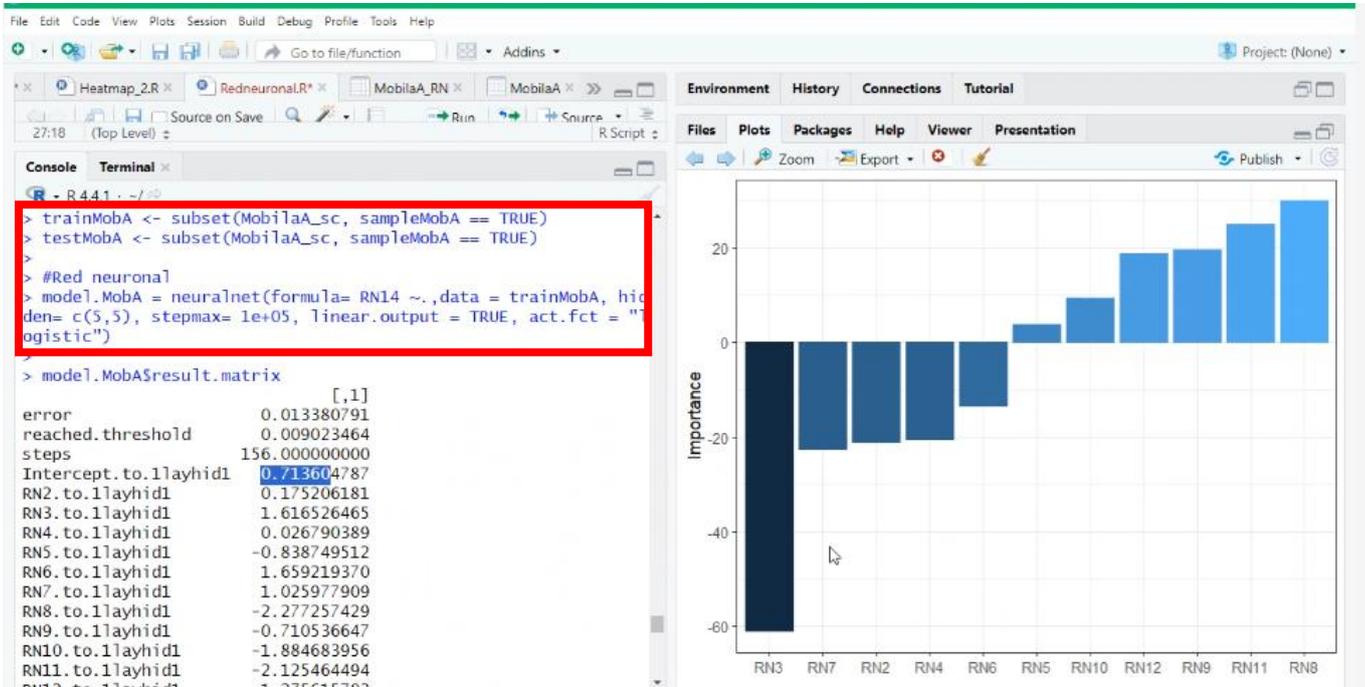


Imagen 55. Prueba preliminar de uso de una red neuronal artificial de cuatro capas para ajustar a los datos de MOE obtenidos (solo para la especie mobila). La red neuronal indica (a la derecha) los parámetros de los ensayos no destructivos de mayor y menor importancia para el MOE.

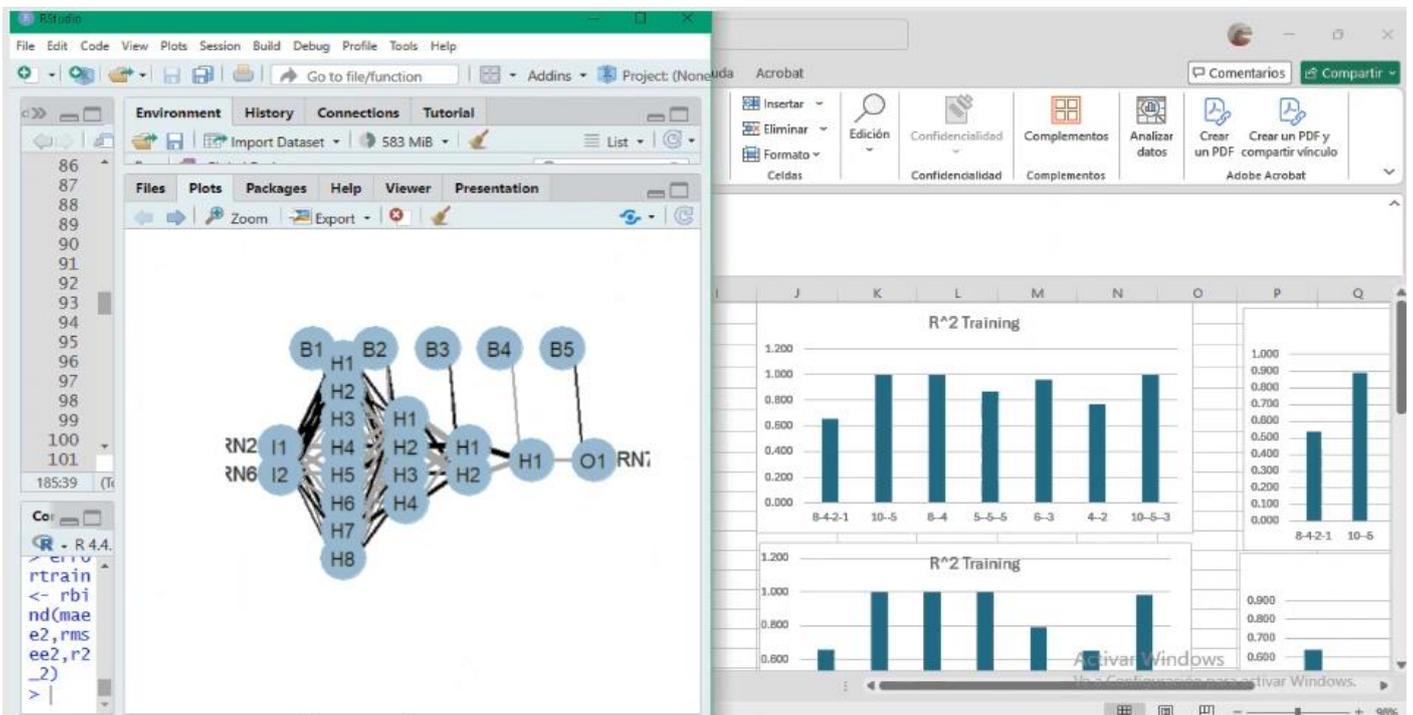


Imagen 56. Prueba preliminar de uso de redes neuronales artificiales para ajustar a los datos de MOE obtenidos (solo para la especie mobila). A la derecha puede verse el  $R^2$  (coeficiente de determinación) del entrenamiento de la red para 7 redes neuronales distintas, de 2 a 4 capas y de 2 a 10 neuronas por capa.

**Los resultados obtenidos mediante redes neuronales, aún de carácter provisional, mejoran los obtenidos mediante regresiones lineales múltiples, que se usan como contraste.**

En la anualidad 2025 se seguirá avanzando en el uso de la IA para madera antigua, a fin de predecir la resistencia mecánica y el comportamiento futuro de viguetas antiguas y, en consecuencia, poder realizar evaluaciones y rehabilitaciones inteligentes.

## 4 Resumen y conclusiones

Se han acopiado y saneado aproximadamente 145 viguetas de madera antigua procedentes de forjados de edificios de la Comunidad Valenciana (especies: pino silvestre, pino laricio, abeto y mobila). Parte de ellas se han acondicionado también hasta alcanzar un contenido en humedad del 10-12%.

Para caracterizar las viguetas, se ha diseñado y desarrollado un sistema de ensayo a flexión que realiza ciclos de carga y descarga a velocidad programable e incluye un actuador hidráulico. Mediante este sistema, partiendo de los cambios de longitud (por unidad de longitud) debidos a las cargas aplicadas, pueden calcularse las curvaturas de las distintas secciones de la vigueta y, después, pueden obtenerse muy precisamente las deflexiones de la vigueta cuando se encuentra sometida a carga. Además, puede determinarse la resistencia a flexión (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE).

Para implementar el sistema de ensayo, se ha desarrollado un nuevo y avanzado sistema de monitorización que adquiere datos de tres fuentes diferentes:

- 1) Transductores de desplazamiento lineal variable.
- 2) Unos nuevos sensores de fibra óptica de elevada precisión. Unos integran la medida a lo largo de una extensión larga (10-20 cm, por ejemplo); otros, a lo largo de una extensión corta (1-2 cm, por ejemplo). De esta manera se obtienen medidas que no son meramente en un punto, como sucede en los sensores tradicionales.
- 3) Células de carga muy precisas.

El mencionado sistema se ha puesto en marcha y se han verificado sus resultados.

Se han realizado ensayos mediante técnicas no destructivas de ensayo (inspección visual, emisión-recepción de ultrasonidos, excitación por impulso) en parte de las viguetas. Comparando con el Joint Committee on Structural Safety (JCSS) Probabilistic Model Code (PMC) (código ampliamente aceptado que sirve como código técnico para realizar cálculos estructurales fiables), las conclusiones provisionales son las siguientes:

- La densidad del pino silvestre antiguo y de la mobila antigua se ajusta mejor a una distribución de mayor valor esperado que a una distribución normal, que es la propuesta por el JCSS PMC para la densidad.
- La densidad del pino laricio antiguo se ajusta mejor a una distribución gamma que a una distribución normal, que es la propuesta por el JCSS PMC para la densidad.
- La resistencia a flexión (MOR) del pino silvestre antiguo y de la mobila antigua se ajusta mejor a una distribución de mayor valor esperado que a

una distribución lognormal, que es la propuesta por el JCSS PMC para el MOR.

- La resistencia a flexión (MOR) del pino laricio antiguo se ajusta mejor a una distribución gamma que a una distribución lognormal, que es la propuesta por el JCSS PMC para el MOR.
- El módulo de elasticidad (MOE) del pino silvestre antiguo y de la mobila antigua se ajusta mejor a una distribución de mayor valor esperado que a una distribución lognormal, que es la propuesta por el JCSS PMC para el MOR.
- El módulo de elasticidad (MOE) del pino laricio antiguo se ajusta a una distribución lognormal, que es la propuesta por el JCSS PMC para el MOE.  
**Por lo tanto, en este caso hay coincidencia entre los resultados obtenidos y el JCSS PMC.**

**De los resultados obtenidos se deduce que, para madera antigua, es importante adoptar distribuciones de probabilidad que consideren la especie de la madera y si esta es antigua o actual.**

**Por otra parte, las distribuciones recomendadas por el JCSS PMC difieren significativamente de aquellas que en este proyecto se ha encontrado provisionalmente, a falta de más ensayos, que ajustan mejor a los datos experimentales.** De las tres propiedades analizadas en tres especies de madera antigua, solo para el módulo de elasticidad del pino laricio coincide la distribución propuesta por el JCSS PMC con la que mejor se ajusta a los datos experimentales.

Con parte de los datos obtenidos de MOR y MOE se han realizado algunas pruebas preliminares de uso de **redes neuronales artificiales multicapa (perceptrón multicapa)**, un método de Inteligencia Artificial, para predecir esas propiedades. Para el entrenamiento de las redes neuronales se usaron el 70% de los datos; y para la validación el 30% restante. Los resultados obtenidos mediante redes neuronales mejoran los obtenidos mediante regresiones lineales múltiples, que se usan como contraste.

## 5 Anexos y bibliografía

- [1] D. Diamantidis (Ed.). Probabilistic Assessment of Existing Structures - JCSS Report, RILEM Publications SARL, 2001.
- [2] EN 1990:2002 - Eurocode - Basis of structural design, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2002.
- [3] JCSS PMC, JCSS probabilistic model code. Part 3: Resistance models. Section 3.5: Properties of timber, Joint Committee on Structural Safety (JCSS), 2006.
- [4] Fischer, Katharina & Barnardo Viljoen, Celeste & Köhler, Jochen & Faber, Michael. Optimal and acceptable reliabilities for structural design. Structural Safety, 76:149-161, 2018.
- [5] Rackwitz, R. Optimization - The basis of code-making and reliability verification. Structural Safety - STRUCT SAF, 2000.



# **AIDIMME**

## **INSTITUTO TECNOLÓGICO**

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13, (Parque Tecnológico)  
46980 Paterna, Valencia (España)  
Tlf, 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)  
46980 Paterna, Valencia (España)  
Tlf, 961 318 559 - Fax 960 915 446

[aidimme@aidimme.es](mailto:aidimme@aidimme.es)

[www.aidimme.es](http://www.aidimme.es)