

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

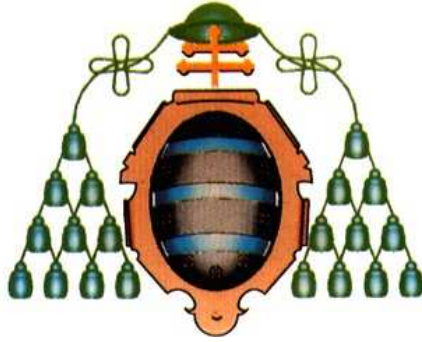
**Programa de Doctorado de Ciencia y Tecnología de
Materiales**

**DURABILIDAD, BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS,
DEL PANEL COMPUESTO LIGERO AUTOPORTANTE,
TIPO SANDWICH, DE CARAS DERIVADAS DE LA
MADERA, QUE SE EMPLEA COMO SISTEMA DE
CERRAMIENTO DE CUBIERTAS**

TESIS DOCTORAL

SALVADOR ESTRADA MARTINEZ

MAYO 2012



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Programa de Doctorado de Ciencia y Tecnología de Materiales

**DURABILIDAD, BAJO CONDICIONES CLIMÁTICAS,
DEL PANEL COMPUESTO LIGERO AUTOPORTANTE,
TIPO SANDWICH, DE CARAS DERIVADAS DE LA
MADERA, QUE SE EMPLEA COMO SISTEMA DE
CERRAMIENTO DE CUBIERTAS**

Doctorando: Salvador Estrada Martínez

Directores: Prof. Dra. Victoria Mollón Sánchez
Prof. Dr. Jorge Bonhomme González



RESUMEN DEL CONTENIDO DE TESIS DOCTORAL

1.- Título de la Tesis	
Español: Durabilidad, bajo condiciones climáticas, del Panel Compuesto Ligero Autoportante, tipo sándwich, de caras derivadas de la madera, que se emplea como sistema de cerramiento de cubiertas.	Inglés: Durability, under climatic conditions, of Self-supporting Composite Lightweight Panel, sandwich type, with wood-based skins, for use in roof covering systems
2.- Autor	
Nombre: Salvador Estrada Martínez	
Programa de Doctorado: Ciencia y Tecnología de Materiales	
Órgano responsable: Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica	

RESUMEN (en español)

Durabilidad, bajo condiciones climáticas, del Panel Compuesto Ligero Autoportante, tipo sándwich, de caras derivadas de la madera, que se emplea como sistema de cerramiento de cubiertas.

Esta investigación tiene como objetivo el estudio de la degradación, producida por los factores ambientales de humedad y temperatura, del *panel compuesto ligero autoportante* (panel sándwich) basado en madera, empleado como cobertura de tejados. Se estima que la cuestión no está suficientemente desarrollada en la guía europea de DITE, ETAG 016.

Sobre el *panel compuesto ligero autoportante*, tipo sándwich, de caras derivadas de la madera, utilizado como elemento no estructural para la cobertura de tejados, hay poca experiencia respecto a otras soluciones constructivas más tradicionales y hay una carencia de normas específicas para su evaluación. Esto provoca disparidad de calidades, y el empleo inadecuado del mismo por parte del instalador.

Una cuestión de gran importancia es su comportamiento a largo plazo, ya que en último término se trata de un producto formado por tableros derivados de la madera, unidos a espumas de polímero mediante adhesivos. De esta manera surge el interrogante acerca de a qué ritmo degradaría frente a las agresiones ambientales de todo tipo a que puede estar expuesto permanentemente y durante décadas: humedad, temperatura, heladas y desheladas, vientos, nevadas y organismos vivos.

Los fabricantes, presionados por la competencia y por los gustos del consumidor, tratan de innovar continuamente, introduciendo nuevos tipos de tableros derivados de la madera para conseguir diferentes estéticas de acabado; también emplean distintos materiales, espesores y densidades en el núcleo. El fabricante necesita saber si el próximo tipo de panel que pretende fabricar y comercializar va a funcionar correctamente, prediciendo el comportamiento del mismo antes de proceder a su fabricación y a su costoso proceso de evaluación normativa.

En noviembre de 2003 la organización europea EOTA publica la guía de evaluación de producto ETAG 016, Parte 1 como base para la evaluación técnica guía del panel compuesto ligero autoportante dentro del proceso de obtención del mercado CE. También publica la Parte 2, específica del panel para tejado.

La publicación de esta guía es, en sí mismo, un reconocimiento implícito de falta de conocimiento para generar una norma armonizada, y de hecho así se indica en la propia guía; en ella se aprecia la influencia del panel de caras metálicas, debido a que ha sido más profusa y largamente estudiado, y aunque ambos paneles tienen cierta semejanza de comportamiento,



el de caras derivadas de la madera tiene problemas y particularidades que no aparecen en el de caras metálicas.

En la ETAG 016 se especifica que la vida útil esperada para un panel autoportante habrá de ser de 10 años para aquel que resulte fácilmente reemplazable, y de 25 años para el que no lo sea; esto siempre que esté sujeto a un uso y mantenimiento apropiado. También se explicita que durante toda su vida útil, el panel habrá de cumplir con los Requisitos Esenciales

Este trabajo pretende responder a diversas cuestiones sobre el envejecimiento por causa de la humedad y la temperatura ambientales del panel sándwich de uso en cubierta:

1. Los ensayos de ciclos climáticos propuestos en la guía ETAG 016, ¿Cómo se relacionan con el daño experimentado por el panel sándwich basado en madera de cobertura de tejados cuando permanece durante años en ubicaciones reales?

2. Los criterios de evaluación propuestos para valorar las muestras después de haberlas sometido a esos ensayos de ciclos climáticos, ¿son apropiados para este tipo de panel sándwich?

3. Si el panel sándwich se somete a los mismos ensayos de ciclos climáticos que la ETAG 016 propone someter a las probetas de tracción perpendicular, ¿Cuál sería el comportamiento mecánico del panel?, ¿Hay una relación entre el ritmo de degradación de la resistencia a tracción y el ritmo de degradación del comportamiento mecánico de todo el panel sándwich?

4. ¿Es posible someter a un panel sándwich a un envejecimiento acelerado para simular la degradación experimentada por un panel sándwich en su ubicación real, sin tener que esperar tanto tiempo? Si, como se sospecha, los ciclos climáticos propuestos en la ETAG 016 son tan agresivos, ¿Cuál es el sentido de dañar las probetas de tracción perpendicular de una manera tan intensa que no ocurrirá nunca en las ubicaciones reales del panel?

5. La ETAG 016 indica que el panel sándwich debe someterse, tras su fabricación, a varios ensayos de evaluación. ¿Por qué no someter el panel sándwich a un envejecimiento más real y tras ello comprobar de nuevo si el panel envejecido cumple los Requisitos Esenciales?

Para ello se planificaron las siguientes tareas:

1. En primer lugar se desarrollaron y adaptaron los ensayos mecánicos propuestos en la guía ETAG 016. Se adaptaron para el estudio del comportamiento mecánico del panel compuesto ligero autoportante basado en madera y empleado como cerramiento de cubiertas. Se diseñaron y fabricaron los dispositivos necesarios y se adaptó una máquina de ensayos universales. Cada uno de estos ensayos fue analizado y probado para ver si era adecuado para evaluar la degradación higrótérmica esperada. Cada ensayo se describió detalladamente en un procedimiento, incluyendo la evaluación de incertidumbres cuando se estimó necesario.

2. Se seleccionaron dos tipos de panel sándwich de uso común en cobertura de tejados: el primero está formado por un tablero machihembrado de madera maciza de abeto + núcleo de XPS + tablero de partículas; el segundo está formado por una placa de yeso laminado + núcleo de XPS + tablero de partículas. Las caras exteriores o pieles están adheridas al núcleo de XPS (espuma de poliestireno extruido) mediante un adhesivo de poliuretano monocomponente de curado en presencia de humedad. Empleando los ensayos mecánicos seleccionados se caracterizaron estos dos tipos de panel y sus componentes sin envejecer, tras la fabricación.

3. Tomando como referencia tanto la normativa existente como la literatura científica al respecto, se ideó y aplicó un envejecimiento acelerado al panel sándwich. Empleando los ensayos mecánicos seleccionados, se midió la degradación de los materiales constituyentes, de las uniones adhesivas y del comportamiento del panel completo (estáticamente a flexión positiva en dos vanos y dinámicamente a impacto por cuerpo blando).



4. Un grupo de probetas del mismo lote de panel sándwich fueron sometidas a un envejecimiento en condiciones de servicio real (envejecimiento natural) durante cuatro años. Se midió su degradación y se comparó con la del envejecimiento acelerado descrito en el párrafo anterior

5. Estas degradaciones se compararon con las producidas por un ciclo climático de control o referencia, el Ciclo 2 de la guía ETAG 016, que se utiliza en la evaluación de la durabilidad ambiental, y se aplicaron los criterios que propone dicha guía para juzgar los resultados. Se propusieron mejoras a esos criterios.

Se han alcanzado las siguientes conclusiones:

1. Respecto al envejecimiento natural frente al acelerado

a. Si las condiciones ambientales en los alrededores del panel, presentan oscilaciones suaves de la humedad relativa, temperaturas ambientales moderadas y ausencia de ciclos de congelación-descongelación, la unión adhesiva XPS-tablero de partículas, la unión adhesiva XPS-tablero de friso de abeto (ambas adheridas con PUR monocomponente de curado en presencia de humedad), y el tablero de partículas mismo, no experimentan merma alguna de propiedades mecánicas en probetas sometidas a envejecimiento natural.

b. El envejecimiento acelerado consistente en un ciclado no brusco entre condiciones de humedad relativa baja (30% HR) y alta (85% HR), se ha revelado como significativamente más agresivo para la unión adhesiva que el envejecimiento según el ciclo 2 de la ETAG 016 consistente en el mantenimiento en condiciones de humedad máxima (100% HR). La unión adhesiva es la parte del panel que ha experimentado gran degradación en ambos ciclos, sin embargo esto no se traslada completamente a degradación en el comportamiento del panel completo.

c. Un panel deteriorado higrotérmicamente no es detectable en una mera inspección visual.

2. Respecto a la filosofía de la evaluación de la durabilidad en la guía ETAG 016

La ETAG 016 solamente evalúa la durabilidad higrotérmica a través de la variación de la resistencia de la unión adhesiva. Se ha concluido que se debería someter el panel completo a un envejecimiento realista y comprobar que se siguen cumpliendo los requisitos esenciales al menos en los ensayos relativos a la seguridad de utilización del panel.

Esto debería hacerse, al menos, con el ensayo de impacto por cuerpo blando, debido a la importancia que este ensayo tiene para la seguridad al uso; otras razones para ello son: porque en muchas ocasiones el ensayo sin envejecimiento es superado sin mucha holgura, por lo delicado que es el panel ante la humedad, y porque resulta sencillo de realizar.

3. Respecto al ensayo de ciclos climáticos Ciclo 2 de la guía ETAG 016

a. En la aplicación del ciclo 2 de la ETAG 016 al panel estudiado, se ha observado que resulta muy agresivo, ya que plantea unas condiciones que no se darían en la realidad, aunque sí que podrían darse por ejemplo en el caso de paneles de caras metálicas instalados como muros de fachada. Además el hecho de utilizar exclusivamente este ciclo hace que quede sin evaluar el comportamiento frente a oscilaciones cíclicas de la humedad, que tiene importancia en los productos derivados de la madera.

b. Entre otras, se recomienda modificar el procedimiento de realización del ensayo de ciclos climáticos en las siguientes cuestiones:

- Aclarar si el ensayo debe hacerse aunque el fabricante recomiende disponer elementos de impermeabilización sobre el panel. Ahora la decisión la toma el organismo notificado



evaluador.

- Para no mezclar resultados de diferentes causas de fallos en el ensayo de tracción, realizar el ensayo sobre cada una de las uniones adhesivas diferentes que tenga el panel.

c. También se proponen diversas modificaciones en los criterios numéricos utilizados en la evaluación de los resultados de la tracción perpendicular

4. Respecto al ensayo de flexión positiva (carga positiva)

El ensayo de flexión o carga positiva de la ETAG 016 debería hacerse según el montaje más desfavorable especificado por el fabricante, de manera que forme parte del ensayo no solamente el panel, sino las correas y las fijaciones en la manera en que se disponen en el montaje real, con el objetivo de ensayar toda la disposición correspondiente, lo mas fidedignamente posible, a las condiciones reales de uso. Actualmente la ETAG 016 solamente evalúa el panel sándwich a flexión positiva, pero sin el resto de los componentes del montaje real.



RESUMEN (en Inglés)

Durability, under climatic conditions, of Self-supporting Composite Lightweight Panel, sandwich type, with wood-based skins, for use in roof covering systems

The aim of this research is to study the degradation caused by humidity and temperature (environmental factors) in wood-based *self-supporting composite lightweight panels* (sandwich panels), used for roof covering. It is estimated that this issue is not completely developed in the Guideline for European Technical Approval ETAG 016

There is little experience on *self-supporting composite lightweight panel* with one or both wood-based skins, when it is compared with other more traditional building structures, and there is a lack of standards for evaluation. This causes a disparity in product quality and the misuse or inappropriate placement of sandwich panels by installers.

A matter of great importance is the long-term behavior, since it is a structure made of wood-based panels glued to plastic foam. Therefore, it arises the question about the degradation rate when it is subjected to environmental aggressions of all kinds that it could be exposed continuously for decades: humidity, temperature, freezing and thawing, wind, snow, and living organisms

Manufacturers, under pressure from competitors or consumer tastes, try to innovate, using skins made of new types of wood-based panels in order to obtain new looks. Different materials, thicknesses and densities are also used in cores. Manufacturers need to know if the next type of panel that they try to develop it will run correctly, and it is also necessary to predict its behavior prior to manufacturing and normative evaluation.

In November 2003 EOTA, European Organisation for Technical Approvals, issued the Guideline for European Technical Approval ETAG 016, Part 1, as the basis for technical assessment of self-supporting composite lightweight panel in the CE-marking process. EOTA also published Part 2, specific for roof panels

Issuing this guide is an implicit admission of lack of knowledge to issue a harmonized standard. In fact it is indicated in the guide itself. The guide seems to be influenced by metal-faced sandwich panels, due to they have been studied longer. Although wood-based sandwich panels and metal-faced sandwich panels show similarities of behavior, former ones have their own problems and peculiarities.

The ETAG 016 indicates that the expected working life of the self-supporting composite lightweight panels is 10 years for the easily replaceable ones, and 25 years for others, provided that they are subject to appropriate use and maintenance. It is also indicated that the Essential Requirements must be satisfied for the whole service life.

This paper focuses on several issues about aging on sandwich panels for roof covering, caused by environmental factors of humidity and temperature:

1. Climatic testing cycles proposed in the ETAG 016, How are related with the damage experienced by the wood-based sandwich panels for covering roofs when they are in service many years on real locations?
2. The assessment criteria proposed to assess the samples after subjecting them to these climatic testing cycles, Are they appropriate for this sandwich panel?
3. If the sandwich panel is subjected to the same climatic testing cycles that the ETAG 016 proposes to subject tensile strength specimens, What would be the mechanical behavior of that sandwich panel? Is there a relation between the tensile strength test degradation rate and the degradation rate of the mechanical behavior of the whole sandwich panel?



4. Is it possible to subject the sandwich panel to an accelerated aging test to simulate the degradation experienced by the sandwich panel in real placement, without having to wait so long? If, as suspected, climatic testing cycles proposed in the ETAG 016 are so aggressive, What is the purpose of damaging the tensile strength specimens so severely that would never experience in service?

5. The ETAG 016 indicates that the sandwich panel has to be subjected, after manufacture, to several tests in the assessment process. Why not subject the sandwich panel to a realistic aging and after that, make again the assessment process in order to see whether the aged sandwich panel fulfills the Essential Requirements?

For this, it was done the following:

1. First, the mechanical tests proposed in the ETAG 016 were developed and adapted for the study of mechanical behavior of wood-based self-supporting composite lightweight panel for roof covering. The necessary devices were designed and manufactured, and a universal testing machine was adapted. Secondly, each of these tests was analyzed to see its appropriateness to assess the hygrothermal degradation expected. Every test selected was described in detail, including uncertainty evaluation when necessary

2. Two common types of sandwich panel for roof covering were selected. The first one formed by tongue-and-groove board made of fir + foam core made of XPS + particle board. The second one formed by plasterboard + foam core made of XPS + particle board. The skins are bonded to the core using moisture-curing one-component polyurethane adhesive. Using the selected mechanical tests, the two selected sandwich panels and their constituents were tested after manufacture, before the aging processes.

3. Based on existing standards and scientific articles, it was devised and implemented an accelerated aging test to the sandwich panel. Using the selected mechanical tests, the degradation rate was measured in the constituent materials, in the adhesive bonds and in the sandwich panel mechanical behavior (statically using positive load test and dynamically using soft body impact test)

4. A group of specimens, from the same batch of sandwich panel, were subjected to aging in real conditions (natural ageing) for four years. The degradation rate was measured and compared with the degradation rate of accelerated aging that was described in the preceding paragraph

5. These degradations were compared with those produced by a climatic cycle taken as reference, which was Cycle 2 of ETAG 016. This cycle is used in the evaluation of environmental durability. In addition, the criteria proposed by ETAG 016 to judge the results were applied. Changes were proposed to those criteria

The following conclusions were reached:

1. With regard to natural aging versus accelerated

a. If the environmental conditions that surround the sandwich panel have soft oscillations in humidity, moderate temperatures and absence of freeze-thaw cycles, the adhesive joint XPS-particle board, the adhesive joint XPS-wooden groove-and-tongue board (bonded using moisture-curing one-component polyurethane adhesive), and the particle board itself, do not experience any significant loss of mechanical properties.

b. An accelerated aging consisting of a soft oscillation between low relative humidity conditions (30% RH) and high relative humidity (85% RH), was significantly more aggressive against the adhesive joints than aging according to cycle 2 of ETAG 016, which is maintenance in high humidity conditions (100% RH). Adhesive joint is the sandwich panel component that has



undergone further degradation. However this is not fully transmitted to degradation in the performance of the entire sandwich panel.

c. An hygrothermally damaged sandwich panel is not detectable in a simple visual inspection

2. With regard to philosophy of the durability assessment according to ETAG 016

ETAG 016 only evaluates the hygrothermal durability using the study of changes in adhesive joint strength. But it is a conclusion that it should be necessary to subject the entire sandwich panel to a realistic aging, and after that, the sandwich panel should be checked about whether the essential requirements are fulfilled. This should be done at least with the tests connected with safety in use.

3. With regard to climatic testing cycles, Cycle 2 in ETAG 016

a. After applying Cycle 2 of ETAG 016 to wood-based sandwich panel, the results showed that it was a very aggressive climatic cycle, because it imposes unrealistic conditions. These conditions perhaps are experienced in other cases, for instance in metal-faced sandwich panels placed as external walls, but not in this type of sandwich panel. Furthermore, using only this cycle, the behavior against humidity oscillations is not studied, which is an important phenomenon in wood-based products.

b. Among other issues, the way that the climatic testing cycle is carried out should be changed:

- It should be clarified whether the climatic testing cycles has to be carried out even when the manufacturer's installation specifications include using waterproofing elements protecting the sandwich panel placed on roofs. Now the decision is taken by the notified body that carry out the evaluation process.
- To avoid mixing up results from different causes of failure in the tensile strength test, every different adhesive joint in the sandwich panel should be tested separately
- Several changes are also proposed in the numerical criteria used to evaluate the climatic testing cycle 2.

4. with regard positive load test

The positive load test indicated in ETAG 016 should be carried out with the most unfavorable assembly in accordance with the manufacturer's installation specifications. The test should include the structure to which the sandwich panel is attached, screws and the sandwich panel, in order to test the whole assembly corresponding as much as possible with the end-use conditions. Now ETAG 016 only evaluates the sandwich panel under positive load test, but without of the rest of assembly.

Dedico esta tesis a Ana

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral se ha ido tejiendo de muchas contribuciones, grandes y pequeñas, aportadas por diversas personas que me han dado su ayuda, conocimientos, consejos y apoyo. Quiero dejar constancia de mi enorme gratitud hacia todos aquellos que han aportado algo, pero especialmente quisiera acordarme de algunos de ellos.

A los profesores Victoria Mollón Sánchez y Jorge Bonhomme González, por su amistad y por su indispensable asesoramiento científico y técnico durante el desarrollo de todo el trabajo de esta tesis bajo su dirección.

A la empresa para la que he trabajado todos estos años, Fundación ITMA, que ha posibilitado que pudiera realizar esta investigación, y me ha permitido disponer de todos los recursos necesarios para ello.

A los trabajadores de Fundación ITMA porque entre todos atesoran una colección de conocimientos de los que me he nutrido y que han sido indispensables. Sin la ayuda de muchos de ellos este trabajo no hubiera sido posible.

A Jacinto Blanco Miguel por su ayuda, y sus valiosas explicaciones sobre el panel sándwich.

Finalmente mi más profundo cariño a toda mi familia y en especial a mi mujer, Ana, a quien dedico esta tesis.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES	1
2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	6
3. OBJETIVOS	11

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	13
1. INTRODUCCIÓN A LAS ESTRUCTURAS SANDWICH	13
1.1. Aspectos generales	13
1.2. Mejora de la rigidez a flexión	15
1.3. Relación entre la carga y la deformación	18
2. PANELES SÁNDWICH DE MADERA CON NÚCLEO AISLANTE DE POLÍMERO	24
2.1. Tableros derivados de la madera empleados como pieles	24
2.1.1. Tipos de tableros	24
2.1.2. Fabricación de tableros	28
2.2. Espumas empleadas como núcleos	29
2.2.1. Fabricación de espumas	31
2.2.2. Espumas de poliestireno. EPS y XPS	32
3. UNIONES ADHESIVAS	34
3.1. Naturaleza, clasificación y tipos de adhesivos	37
3.2. Contacto entre superficies	43
3.2.1. Tensión superficial	43
3.2.2. Proceso de humectación	44
3.3. Factores de degradación de las uniones adhesivas	46
3.3.1. Degradación por causa de la humedad	46
3.3.2. Degradación por causa de la temperatura	48
3.3.3. Degradación por el efecto conjunto de humedad y temperatura	52
3.4. Adhesivos para paneles sándwich	53
3.4.1. Adhesivos de poliuretano	53
3.4.2. Adhesivos de poliuretano monocomponente de curado por humedad	54
3.5. Calidad en la realización de las uniones adhesivas	59
3.6. Ensayos de comportamiento de las uniones adhesivas	62
3.6.1. Comportamiento en ausencia de degradación ambiental	63
3.6.2. Comportamiento en presencia de degradación ambiental	65
4. DURABILIDAD DEL PANEL SANDWICH	68
4.1. Introducción	68
4.2. Predicción del periodo de vida	69
4.3. Ensayos de envejecimiento acelerado	72

4.4.	<i>Aspectos generales sobre la degradación en el panel sándwich</i>	78
4.4.1.	Degradación de los adhesivos que unen las caras al núcleo	78
4.4.2.	Degradación de los tableros que forman las caras.....	79
4.4.3.	Cargas permanentes y cargas de larga duración	81
4.4.4.	Cargas repetidas	82
4.4.5.	Gradiente de humedad en el panel	83
4.4.6.	Altas temperaturas actuando sobre el núcleo de espuma	83
4.4.7.	Degradación de los sellantes	84
4.5.	<i>Ensayos de durabilidad condicionada por la humedad y la temperatura</i>	84
4.5.1.	Clases de servicio.....	84
4.5.2.	Estudio de la durabilidad a través del ensayo de tracción perpendicular a las caras.....	87
4.5.3.	Estudio de la durabilidad a través de otras propiedades	91
4.6.	<i>Efectos de la humedad sobre el panel sándwich</i>	92
4.6.1.	Mecanismos de absorción de la humedad en la madera y sus derivados.....	93
4.6.2.	Estabilidad dimensional de los paneles sándwich	94
4.7.	<i>Efecto de la temperatura sobre el panel sándwich</i>	96
5.	ASPECTOS GENERALES DE LA HUMEDAD EN LA EDIFICACIÓN.....	97
5.1.	<i>Fuentes de humedad</i>	97
5.2.	<i>Transporte de la humedad y su control en la edificación</i>	99
6.	NORMATIVA RELATIVA AL PANEL SANDWICH Y A SU DURABILIDAD	104
6.1.	<i>Directiva 89/106/EEC sobre productos de construcción</i>	104
6.1.1.	ETA, European Technical Approval	105
6.1.2.	Conformidad para el uso de un producto de construcción	106
6.2.	<i>La Guía Técnica ETAG 016 para paneles autoportantes</i>	107
6.2.1.	Requisitos Esenciales (RE)	108
6.2.2.	El panel ligero compuesto autoportante y sus usos	112
6.2.3.	Verificación de los Requisitos Esenciales en el panel compuesto	114
6.2.4.	Verificación de la resistencia mecánica	115
6.2.5.	Verificación de la resistencia al impacto	116
6.2.6.	Verificación de la resistencia de las fijaciones	116
6.2.7.	Verificación de la caminabilidad	117
6.2.8.	Verificación de la durabilidad y de la capacidad de servicio.....	117
6.3.	<i>La Norma UNE-EN 14509 de paneles sándwich de caras metálicas.</i>	125
6.3.1.	Introducción	125
6.3.2.	Resistencia a la tracción perpendicular a las caras del panel	126
6.3.3.	Durabilidad por reducción de la resistencia a la tracción debida a envejecimiento.....	126

CAPÍTULO 3

MATERIALES EMPLEADOS Y DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

1.	MATERIALES	131
1.1.	<i>Descripción de la tipología de panel estudiada</i>	133
1.1.1.	Características de las capas constituyentes de los paneles	134

1.2. <i>Proceso de fabricación</i>	137
2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO.....	140
2.1. <i>Selección del ensayo de envejecimiento de referencia o de control</i>	142
2.2. <i>Diseño de un nuevo ciclo de envejecimiento acelerado</i>	145
2.3. <i>Envejecimiento natural</i>	150
2.4. <i>Tablas-resumen de los envejecimientos aplicados</i>	157
3. ENSAYOS MECANICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS ENVEJECIMIENTOS.....	159
3.1. <i>Ensayos de los elementos constituyentes del panel</i>	159
3.1.1. Procedimiento de ensayo del tablero PAR. Flexión en tres puntos.....	159
3.1.2. Procedimiento de ensayo del tablero FRI. Flexión en tres puntos.....	160
3.1.3. Procedimiento de ensayo de la plancha de XPS. Ensayo de compresión.....	160
3.2. <i>Ensayos de la unión adhesiva entre la piel y el núcleo</i>	161
3.2.1. Ensayo de tracción perpendicular a las caras.....	161
3.2.2. Ensayo de cortadura según el método del ensayo doble.....	165
3.3. <i>Ensayo de resistencia mecánica del panel completo. Flexión positiva</i>	169
3.3.1. Modelización analítica del ensayo de flexión positiva.....	174
3.3.2. Procedimiento de ensayo de flexión positiva en panel con tres apoyos y ocho líneas de carga. ..	182
3.4. <i>Ensayo de resistencia mecánica del panel completo. Flexión negativa</i>	195
3.5. <i>Ensayo de resistencia a impacto del panel completo. Impacto de cuerpo blando</i>	197
3.6. <i>Ensayo de fluencia en flexión del panel completo</i>	202
3.7. <i>Ensayo para evaluar la caminabilidad en panel completo</i>	204
3.8. <i>Ensayo de conductividad térmica</i>	205

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	207
1. INTRODUCCIÓN.....	207
2. EFECTOS DEL ENVEJECIMIENTO DE REFERENCIA.....	208
2.1. <i>Resultados</i>	210
2.2. <i>Discusión de los resultados</i>	216
3. EFECTOS DEL ENVEJECIMIENTO ACELERADO Y DEL ENVEJECIMIENTO NATURAL.....	226
3.1. <i>Efectos sobre el tablero PAR</i>	226
3.1.1. Discusión de los resultados.....	227
3.2. <i>Efectos sobre el tablero FRI</i>	227
3.2.1. Discusión sobre los resultados.....	229
3.3. <i>Efectos sobre la plancha XPS</i>	229
3.3.1. Discusión de los resultados.....	231
3.4. <i>Efectos sobre la unión adhesiva a través de la tracción perpendicular</i>	231
3.4.1. Discusión de los resultados.....	236
3.5. <i>Efectos sobre la unión adhesiva a través del comportamiento a cortante</i>	237
3.5.1. Discusión de los resultados.....	240
3.6. <i>Efectos sobre el panel completo: Flexión positiva</i>	241

3.6.1. Discusión de los resultados	253
3.7. <i>Efectos sobre el panel completo: Impacto de cuerpo blando</i>	259
3.7.1. Discusión de los resultados	262
3.8. <i>Efectos sobre la conductividad térmica</i>	264
3.8.1. Discusión de los resultados	265

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	267
---	------------

REFERENCIAS	275
--------------------------	------------

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES

Agrupados bajo la denominación genérica de panel existen diversos productos de construcción, de configuraciones muy diversas, formados generalmente alrededor de la combinación de un núcleo central con características aislantes y dos caras externas (también denominadas pieles), que resisten la mayor parte de los esfuerzos mecánicos que soporta el conjunto. Son elementos prefabricados ideados para ser montados en obra con el menor consumo de tiempo y mano de obra posible.

El elemento así formado funciona mecánicamente como un todo, y en el ámbito de la construcción se emplea en tejados, techos, muros exteriores y aislamiento externo de fachadas, paredes internas e incluso suelos, y también como cerramiento aislante en cámaras frigoríficas.

La creatividad de los fabricantes ha originado muchas variantes alrededor de esta idea central, por lo tanto existen paneles:

- Con las caras fabricadas de un material metálico, o de un material derivado de la madera, e incluso polimérico u orgánico.
- Con una única cara (panel tipo caja abierta), dos caras (una a cada lado), tres o más caras (combinando dos caras contiguas a uno de los lados).
- Con el núcleo de un material rígido que contribuye a la capacidad portante del panel, tal como el poliestireno expandido (EPS), la espuma de poliestireno extruido (XPS) o el poliuretano (PUR); o por el contrario con el núcleo de un material blando que no aporta resistencia mecánica, tal como la lana mineral (MW).
- Con el núcleo de un material aislante o no aislante, e incluso con una combinación de varios materiales en el núcleo, como por ejemplo un material aislante en la zona central y otro más rígido en la periferia del panel.
- Con nervios de refuerzo internos o no

- Con una capa adicional con efecto de barrera de vapor o sin ella.
- Con forma plana, que es la habitual, o con forma curvada
- Con las caras perforadas.

En la *figura 1.1* pueden verse esquematizadas algunas de estas variantes.

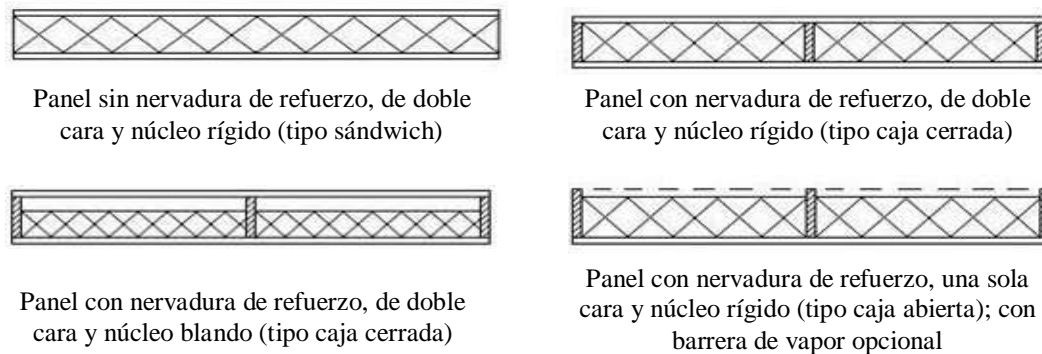


Figura 1.1. Sección transversal de diversas variantes de panel.

Los paneles se unen al resto de la estructura, a la cual cubren, a través de fijaciones, tales como tornillos, mientras que la junta existente entre cada dos paneles es tapada mediante conexiones, machihembrados, lengüetas y/o masillas sellantes para evitar el paso de polvo, humedad y gases. Estos productos auxiliares son parte importante del éxito del ensamblado total final, y han de elegirse e instalarse apropiadamente según sus propias especificaciones.

Respecto a su importancia estructural, los paneles utilizados en edificación pueden dividirse en dos grandes grupos:

- a. **Panel autoportante:** es un panel ligero que no soporta acciones de importancia estructural, sino que transmite las cargas que se aplican sobre él a las estructuras sobre las que se apoya. Las cargas que usualmente soporta y transmite son las debidas al peso propio y peso de elementos ligeros dispuestos sobre él tales como tejas, y también la carga de viento, presión interna del aire, nieve y las tensiones debidas a los gradientes térmicos causados por la diferencia de temperatura entre las caras del panel.
- b. **Panel portante:** es un panel que contribuye a la resistencia mecánica o a la estabilidad del edificio, o bien soporta otros elementos estructurales, o tiene una influencia

positiva en la resistencia estructural (horizontal o verticalmente). Las cargas son transferidas a la estructura principal. Obviamente las exigencias a que somete la legislación y la normativa a estos paneles es mayor que a los del tipo autoportante. Las fuerzas son transferidas a la estructura de la edificación sin una estructura intermedia o subestructura.

De entre esta amplia variedad de productos destaca el panel sándwich con núcleo aislante de polímero y dos caras de un material derivado de la madera, que se introdujo en nuestro mercado a finales de los años ochenta como solución constructiva, presentándose como una alternativa a otros elementos tradicionales.

Se trata de un panel autoportante sin responsabilidad estructural y que tiene un núcleo que es habitualmente una plancha de espuma de poliestireno extruido (XPS), de poliestireno expandido (EPS) o de poliuretano rígido. En cuanto a las dos caras, que son generalmente disimilares entre sí en material y espesor, suelen ser de tableros de materiales derivados de la madera, como el tablero de partículas, el tablero de contrachapado, el tablero de OSB o el de friso machihembrado de madera maciza.

En países como Suiza, Francia, Alemania, los países nórdicos y, especialmente, los Estados Unidos, el uso del panel sándwich es una solución muy extendida debido a sus cualidades mecánicas y aislantes. Sin embargo en España se ha tardado más en utilizar este producto debido a la predominancia del hormigón como solución constructiva y a la menor cultura del concepto de aislamiento y de la utilización de productos prefabricados en relación a los países vecinos. En otros mercados, el hormigón sigue siendo el líder en estructura, pero no en cubierta. Sin embargo, hay una excepción, Estados Unidos, donde el panel sándwich es empleado no sólo para la cubierta, sino también para suelos y paredes.

Es susceptible de ser utilizado en todas las aplicaciones en las que se necesite realizar una cubierta caliente, teniendo la gran ventaja de hacer habitable el bajocubierta. El forjado de cubierta, se compone de dos tableros de madera unidos por un núcleo aislante, adoptando forma de sándwich. Uno de los tableros aporta el acabado interior de la cubierta, el núcleo da el aislamiento térmico requerido y el otro tablero proporciona la resistencia necesaria al sistema.

Debido a esto, y a sus posibilidades estéticas, se utiliza mucho en viviendas unifamiliares y plurifamiliares (véase *figuras 1.2 y 1.3*), en edificios históricos, en edificación industrial y también ha extendido su uso en rehabilitación, dadas las actuales circunstancias del mercado y del sector de la construcción. Algunos ejemplos se pueden encontrar en edificaciones tales como bodegas, iglesias, aeropuertos, mercados, piscinas, centros comerciales, viviendas, etc.

Puede adaptarse, por tanto, a cualquier tipo de obra, aunque destaca en aquellas donde la cubierta supone una parte importante de su visibilidad, integrándose perfectamente tanto en la estética rústica como en la moderna. Aunque, como se ha comentado, la mayoría de sus aplicaciones están orientadas al cerramiento de cubiertas, cada vez se proyectan y se utilizan más variantes de este panel como paramento vertical, debido a su versatilidad y la gran variedad de acabados que puede presentar.

En un momento como el actual, en el que la construcción de obra nueva se está resintiendo ante la difícil situación de la economía nacional e internacional, la rehabilitación y la reforma se perfilan como un mercado muy interesante y al que hay que prestar una atención muy especial. Estos paneles son unos buenos candidatos debido a su bajo peso, fácil manejo, gran rendimiento de construcción y gran adaptabilidad a todo tipo de cubiertas ofreciendo ahorro energético a través su capacidad aislante a un bajo precio.

Para poder responder adecuadamente a las necesidades y demandas del mercado, los fabricantes deben mantenerse al día, innovando para adaptarse a todos los requerimientos existentes. El Código Técnico de la Edificación¹ (CTE), así como los Documentos Básicos que lo complementan, han introducido una serie de requerimientos que deben cumplir los materiales instalados en las nuevas construcciones para respetar, entre otras cosas, el aislamiento térmico y acústico.

Debido a su núcleo aislante el panel sándwich es un candidato eficaz para cumplir los requerimientos del Documento Básico de Ahorro de Energía (DB HE), es asimismo un candidato adecuado para cumplir lo indicado por el Documento Básico de Protección frente al ruido (DB HR) y está adaptado para responder a las exigencias del Documento Básico de Salubridad (DB HS) en las situaciones en las que sea necesario, gracias a la fabricación de estos paneles con tableros hidrófugos y fenólicos.

En cualquier caso, es necesario obtener los documentos técnicos de idoneidad, DITE y el Marcado CE, que los respaldan como un material apto y apropiado para su instalación en la edificación.



Figura 1.2. Colocación de panel sándwich

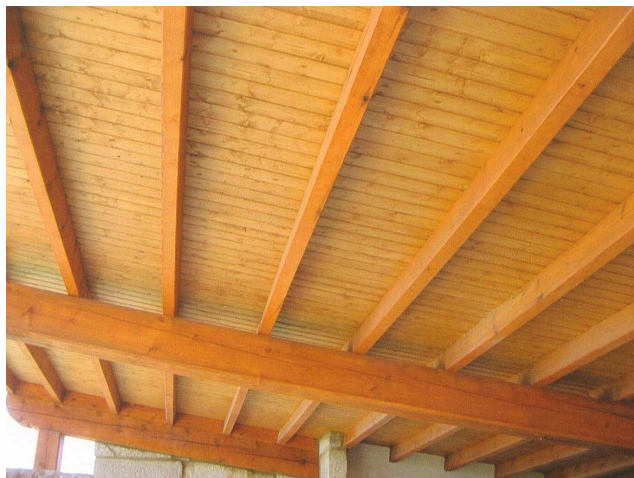


Figura 1.3. Vista, desde el habitáculo interior, del panel sándwich ya instalado.

2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Sobre el panel compuesto ligero autoportante, tipo sándwich, de caras derivadas de la madera, utilizado como elemento no estructural para la cobertura de tejados, hay poca experiencia respecto a otras soluciones constructivas más tradicionales y hay una carencia de normas específicas para su evaluación. Esto provoca disparidad de calidades, y el empleo inadecuado del mismo por parte del instalador.

Una cuestión de gran importancia es su comportamiento a largo plazo, ya que en último término se trata de un producto formado por tableros derivados de la madera, unidos a espumas de plástico mediante adhesivos. De esta manera surge el interrogante acerca de a qué ritmo degradaría frente a las agresiones ambientales de todo tipo a que puede estar expuesto permanentemente y durante décadas: humedad, temperatura, heladas y desheladas, vientos, nevadas y organismos vivos.

En algunas ocasiones los paneles son instalados en un ambiente seco, protegidos de la lluvia y de las inclemencias del tiempo por diversas capas protectoras, y rara vez se ven sometidos a oscilaciones acusadas de humedad y temperatura.

Sin embargo en otras muchas ocasiones los paneles se ven sometidos a un entorno más agresivo, desarrollando su vida útil en un ambiente hostil, sometidos a condiciones extremas, por ejemplo debido a que se ubican en regiones con frecuentes descensos de la temperatura por debajo de 0°C, lo que conlleva ciclos de congelación-descongelación; o por ser techo en instalaciones de cocinas o baños y por lo tanto sufriendo altas humedades.

Resulta revelador observar in situ los efectos que produce, en los paneles, la humedad en colaboración con los organismos vivos. Sirva como ejemplo la serie de fotografías mostradas en las *figuras 1.4, 1.5, y 1.6*, y que fueron tomadas por el responsable de la presente investigación en el curso de una asistencia técnica para evaluar la aptitud al uso de unos paneles dispuestos como cerramiento de cubierta de un complejo de naves industriales situado en la ciudad de Gijón, Asturias.



Figura 1.4. Estado de la cubierta. Vista exterior



Figura 1.5. Vista interior. Deterioro del panel en su apoyo sobre la correa



Figura 1.6. Detalle del estado de deterioro de los paneles. Fotografía tomada inmediatamente después de ser retirados de su ubicación.

Se observa como en las juntas frontales entre paneles, donde éstos apoyan sobre la correa, se van acumulando restos de polvo y tierra arrastrados por el viento; posteriormente, sobre estas grietas rellenas de materia orgánica crece la hierba que retiene la humedad y va provocando un daño al panel, precisamente en la zona comprometida de apoyo del mismo sobre la correa. El resultado final de este efecto y de otras degradaciones acumuladas puede verse en la *figura 1.6* donde se muestra el aspecto de estos paneles tras ser retirados de su ubicación: la

adherencia de las distintas capas entre sí ha quedado completamente eliminada con el paso de los años, quedando las capas posicionadas unas sobre otras sin adhesión alguna. En este caso se trataba de un panel de caras metálicas y núcleo de poliuretano.

Este tipo de degradación desemboca, en no pocas ocasiones, en graves accidentes cuando una persona al transitar por una cubierta visitable en mal estado, atraviesa el techo al ceder un panel y se precipita contra el suelo.

Piénsese, además, que el fabricante, presionado por los gustos del consumidor, y por la competencia, innova continuamente con distintas tipologías de panel, introduciendo nuevos tipos de tableros derivados de la madera para conseguir diferentes estéticas de acabado; también puede emplear distintos materiales, densidades y espesores para el núcleo.

Si se tiene en cuenta la variedad de paneles existentes, la necesidad de innovar en sus características, la presión por bajar precios, etc., se comprende el problema desde el punto de vista del fabricante: éste necesita saber si el próximo tipo de panel que pretende fabricar y comercializar va a funcionar correctamente, prediciendo el comportamiento del mismo antes de proceder a su fabricación y a su costoso proceso de evaluación normativa.

En noviembre de 2003 la organización europea EOTA publica la guía de evaluación de producto ETAG 016, Parte 1² como guía para evaluar el panel compuesto ligero autoportante dentro del proceso de obtención del marcado CE para este producto de construcción; para complementar la Parte 1 de la guía, aparece también la Parte 2³, específica del panel para tejado.

La publicación de esta guía es, en sí mismo, un reconocimiento implícito de falta de conocimiento para emitir una norma armonizada, y de hecho así se indica en la propia guía; en ella se aprecia la influencia del panel de caras metálicas, debido a que ha sido más profusa y largamente estudiado y aunque ambos paneles tienen cierta semejanza de comportamiento, el de caras derivadas de la madera presenta problemas y particularidades que no aparecen en el de caras metálicas.

En la ETAG 016 se especifica que la vida útil esperada para un panel autoportante habrá de ser de 10 años para aquel que resulte fácilmente reemplazable, y de 25 años para el que no lo sea; esto siempre que esté sujeto a un uso y mantenimiento apropiado. También se explicita que durante toda su vida útil, el panel habrá de cumplir con los Requisitos Esenciales.

En octubre de 2004 se publica en el BOE una Resolución⁴ de la Dirección General de Desarrollo Industrial que establece la obligatoriedad del marcado CE, a partir del 17/11/2006, para el panel compuesto ligero autoportante de cubiertas, a través de la consecución de un DITE (Documento de Idoneidad Técnica Europeo) que cumpla con las prescripciones de la ETAG 016.

De la experiencia del Departamento de Plásticos y Materiales Compuestos de la Fundación ITMA, por haber trabajado en algunos de los primeros procesos DITE de panel de cubierta llevados a cabo en Europa, surge este trabajo de investigación con el objetivo de profundizar en algunas de las cuestiones que aparecen en la ETAG 016 relativas al envejecimiento del panel de cubierta, y se plantean, pues, las siguientes cuestiones:

1. ¿Cómo se correlacionan los ciclos de envejecimiento propuestos en la guía ETAG 016 con el deterioro real que sufre al panel compuesto basado en madera?
2. Los criterios de aceptación/rechazo propuestos para valorar el resultado obtenido tras someter probetas del panel a ciclos climáticos de envejecimiento, ¿son adecuados, para este tipo de panel sándwich, a la luz de los resultados obtenidos?
3. Si se someten paneles completos a envejecimiento ¿se obtendrían conclusiones semejantes a las obtenidas a partir del envejecimiento y evaluación posterior de probetas de tracción perpendicular a las caras extraídas del panel como exige la ETAG? ¿cuál es el comportamiento mecánico del mismo? ¿Hay una equivalencia entre el ritmo de degradación observado en las probetas de tracción perpendicular a las caras y el ritmo de degradación de las prestaciones reales del panel completo?
4. Si se toma un envejecimiento natural no acelerado (real) ¿se puede establecer alguna correlación entre éste y un envejecimiento acelerado? Si, como se sospecha, los ciclos

climáticos propuestos por la ETAG 016 son excesivamente agresivos ¿qué sentido tiene someter las probetas a un estado de daño que jamás se producirá en la ubicación real del panel?

5. ¿Sería necesario someter el panel completo a algún tipo de envejecimiento y posterior comprobación del cumplimiento de los Requisitos Esenciales?

Se han encontrado numerosos estudios en la bibliografía científica pero en ninguno de ellos se detalla una manera inequívoca de someter el panel a un ensayo acelerado que pueda correlacionarse con lo que sucederá en el largo plazo. No hay un consenso sobre qué parámetros y en qué medida hay que aumentarlos para envejecer aceleradamente un panel un tiempo equivalente a 10 años de envejecimiento natural. Por tanto, este trabajo tiene como base el estudio del comportamiento de estos paneles con el paso del tiempo y el desarrollo de un procedimiento para imprimir un envejecimiento acelerado al panel capaz de obtener un estado final de éste similar al que tendría en el envejecimiento natural en un clima similar al de Asturias, caracterizado por un alto contenido de humedad, y discutir los ensayos y pruebas a realizar, con objeto de evaluar el envejecimiento sufrido por el panel.

3. OBJETIVOS

Esta investigación tiene como objetivo el estudio de la degradación, producida por los factores ambientales de humedad y temperatura, del panel compuesto ligero autoportante (panel sándwich) basado en madera, empleado en tejados, a partir del momento en que se instala en una edificación, aspecto éste que no está suficientemente desarrollado en la guía europea de DITE, ETAG 016. También se pretende desarrollar un método de envejecimiento acelerado para producir en el panel una degradación equivalente a varios años de servicio, estableciendo una correlación entre ambos tipos de envejecimiento que ayudará a predecir el comportamiento en servicio de estos paneles a largo plazo. Se pretende resaltar las zonas del panel más susceptibles al deterioro y al posterior fallo, pudiéndose por tanto introducir mejoras en la selección de los materiales y en los procesos de fabricación de los mismos.

Para ello se siguieron los siguientes pasos:

1. Se desarrollaron los ensayos propuestos en la ETAG 016 para el estudio del comportamiento mecánico del panel compuesto ligero autoportante basado en madera y empleado como cerramiento de cubiertas. Se diseñaron y construyeron los utillajes necesarios y se adaptó para este uso, una maquina universal de ensayos mecánicos INSTRON. Después, cada uno de esos ensayos fue analizado y probado para ver si era adecuado para evaluar la degradación higrotérmica esperada. Cada ensayo se describió detalladamente en un procedimiento, incluyendo la evaluación de incertidumbres cuando se estimó necesario.
2. Se seleccionaron dos tipos de panel sándwich de uso común en cobertura de tejados: el primero está formado por un tablero machihembrado de madera maciza de abeto + núcleo de XPS + tablero de partículas; el segundo está formado por una placa de yeso laminado + núcleo de XPS + tablero de partículas. Las caras exteriores o pieles están adheridas al núcleo de XPS (espuma de poliestireno extruido) mediante un adhesivo de poliuretano monocomponente de curado en presencia de humedad. Empleando los ensayos mecánicos seleccionados se caracterizaron estos dos tipos de panel y sus componentes sin envejecer, tras la fabricación.

3. Tomando como referencia tanto la normativa existente como la literatura científica al respecto, se ideó y aplicó un envejecimiento acelerado al panel sándwich. Empleando los ensayos mecánicos seleccionados se midió la degradación de los materiales constituyentes, de las uniones adhesivas y del comportamiento del panel completo (estáticamente a flexión positiva en dos vanos y dinámicamente a impacto por cuerpo blando).
4. Por otro lado, probetas del mismo lote de panel sándwich fueron sometidas a un envejecimiento en condiciones de trabajo real (envejecimiento natural) durante cuatro años. Se midió su degradación y se comparó con la del envejecimiento acelerado descrito en el párrafo anterior.
5. Estas degradaciones se compararon con las producidas por un ciclo climático de control o referencia, concretamente el Ciclo 2 de la guía ETAG 016, que se utiliza en la evaluación de la durabilidad ambiental, y se aplicaron los criterios que propone dicha guía para evaluar los resultados. Se propusieron mejoras a dichos criterios.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1. INTRODUCCIÓN A LAS ESTRUCTURAS SANDWICH

1.1. Aspectos generales

Como se ha indicado anteriormente, una estructura o panel sándwich es una estructura constituida por dos laminas resistentes, que se denominan pieles o caras, entre las que se dispone un material ligero que se conoce como núcleo. Las estructuras sándwich comprenden una gran variedad de materiales y configuraciones, proporcionando gran versatilidad al poder ser fabricadas a partir de un amplio rango de núcleos y pieles.

Entre las características más favorables de estos materiales de cara a su aplicación, cabe citar las siguientes:

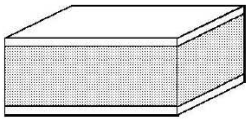
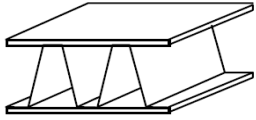
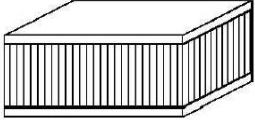
- **Baja densidad:** se trata de estructuras diseñadas para ser ligeras, debido a que el núcleo suele estar constituido por espumas poliméricas poco densas.
- **Rigidez a flexión:** son frecuentemente empleadas para maximizar la rigidez a flexión de la estructura minimizando el peso de la misma.
- **Aislamiento térmico:** estos materiales tienen una gran capacidad aislante, siendo la potencia calorífica transmitida a través de las mismas relativamente baja comparada con otros materiales.
- **Aislamiento acústico:** estos materiales presentan rendimientos especialmente significativos como aislantes acústicos pudiendo incorporar otros elementos para hacerlos más efectivos.

Otra consideración de tipo estructural que debe ser tomada en cuenta en la fabricación de estos materiales es el tipo de adhesivo utilizado para realizar la unión entre la piel y el núcleo. Dicha unión, a través del adhesivo, debe ser rígida para transmitir las cargas de una piel a otra. Existen en el mercado distintos tipos de adhesivos de alto módulo elástico y alta resistencia que están disponibles como líquidos, pastas o films. Como regla general, nunca

debe usarse una piel de baja resistencia o un adhesivo relativamente frágil para fabricar estructuras sándwich muy ligeras que sean susceptibles de sufrir daños importantes durante el almacenaje, manipulación o en servicio.

En la actualidad existen en el mercado una gran cantidad de variantes de panel sándwich o panel compuesto, cuyo uso está ampliamente extendido en la industria aeroespacial, de construcción, etc.

En la *tabla 2.1* se recogen los materiales más utilizados para pieles y para núcleos, así como sus disposiciones dentro del panel tipo sándwich:

	PIELES	NÚCLEOS
<p>Expandido</p> 	<p>Metales</p> <p>Laminados</p> <p>Contrachapados termoplásticos*</p>	<p>Espuma de poliuretano</p> <p>Espuma de poliestireno*</p>
<p>Placa nervada</p> 	<p>amianto/cemento</p> <p>Metales</p> <p>Laminados</p>	<p>Metal</p> <p>Material compuesto.</p>
<p>Nido de abeja</p> 	<p>Contrachapados</p> <p>Laminados</p> <p>Aluminio</p>	<p>Madera</p> <p>Nido de abeja de cartón</p> <p>Nido de abeja de Aluminio</p>

*NOTA IMPORTANTE: Las resinas poliésteres atacan a las espumas de poliestireno.

Tabla 2.1. Materiales más utilizados en la fabricación de pieles y núcleos

1.2. Mejora de la rigidez a flexión

Como es bien sabido una de las razones más importantes para emplear estructuras tipo sándwich es la mejora de la rigidez a flexión de la estructura resultante respecto a la de los materiales que la componen; esto es común a todas ellas independientemente de la configuración de pieles y núcleo que la formen (véase *figura 2.1*).

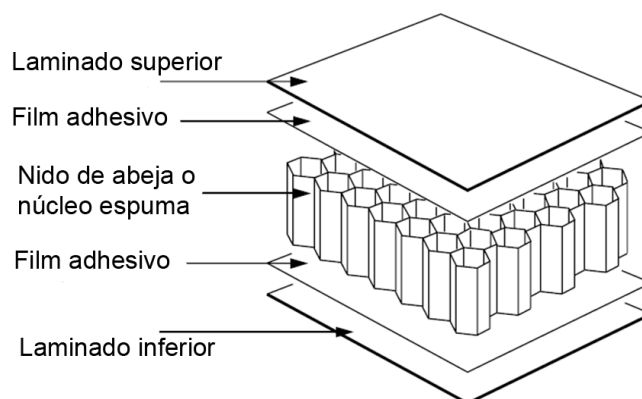


Figura 2.1. Diagrama esquemático mostrando la construcción de un panel tipo sándwich con un núcleo tipo panal de abeja

Para realizar un análisis tensional es conveniente convertir la sección transversal en una sección equivalente basada en solo un material. Esta nueva sección se comportará exactamente de la misma manera que el material de múltiples capas cuando se apliquen las cargas.

El primer paso al analizar la estructura tipo sándwich es calcular el momento de segundo orden (momento de inercia) de la sección transversal de la muestra. Esto se realiza mediante la conversión de la sección transversal de la estructura de tipo sándwich en una sección equivalente tal y como se puede ver en la *figura 2.2*.

La anchura de la sección equivalente viene dada por la expresión:

$$b_e = \frac{E_c}{E_s} b_c \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde E_c y E_s se refieren a los valores de módulo para el núcleo (c) y para la piel sólida (s) del material, respectivamente. En general, existe poca información disponible sobre el módulo

de los plásticos en forma de espuma que conforman el núcleo, pero existe una relación empírica entre la densidad (ρ) y el modulo, debida a Moore^{5,6} e Iremonger.

$$\frac{E_C}{E_S} = \left(\frac{\rho_C}{\rho_S} \right)^2 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

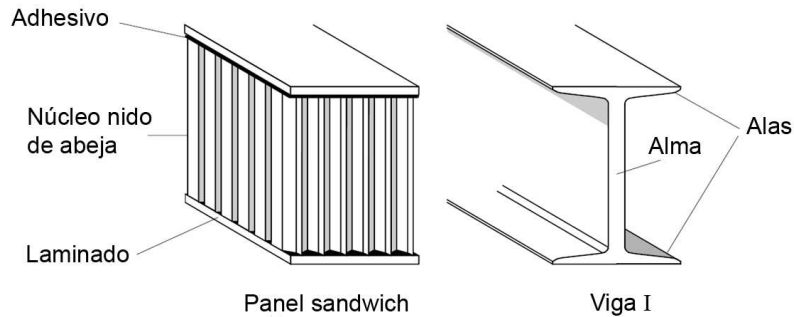


Figura 2.2. Sección equivalente de sólido de una estructura de tipo sándwich

Una vez que la estructura tipo sándwich se ha convertido a una sección equivalente de plástico sólido entonces pueden usarse los procedimientos de diseño a largo plazo. Por ejemplo, se puede determinar la desviación en el centro de una viga simplemente apoyada y con carga puntual central después de un periodo de tiempo de 1 año, utilizando el módulo apropiado deducido de las curvas de fluencia.

Progelhof y Throne⁷ propusieron que la relación entre el módulo de la espuma y la densidad se puede aplicar a otras propiedades como la resistencia a la tracción, la resistencia a la fatiga, propiedades de fluencia, así como a los módulos de compresión y de corte. Así si X es una característica general del material, se tendría:

$$\frac{X_C}{X_S} = \left(\frac{\rho_C}{\rho_S} \right)^2 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

La manera más simple, por tanto, de obtener paneles sándwich es unir entre sí dos láminas de material compatible

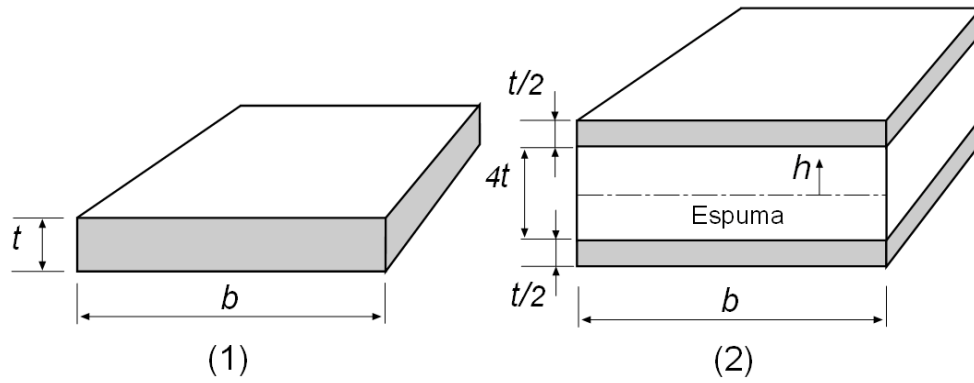


Figura 2.3. Ejemplo de incremento en el momento de segundo orden para paneles sándwich.

La figura 2.3 muestra la mejora significativa en la rigidez a flexión que se puede lograr con este método. Para este caso se tiene:

$$I_1 = \frac{bt^3}{12} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Para cada piel:

$$I_{PIEL} = I + Ah^2 = \frac{b\left(\frac{t}{2}\right)^3}{12} + b\frac{t}{2}\left(\frac{7t}{4}\right)^2 = \frac{148}{96}bt^3 \quad \text{ya que: } A = b\frac{t}{2} \text{ y } h = \frac{3}{2}t + \frac{t}{4} = \frac{7}{4}t \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Con lo que:

$$I_2 = 2I_{PIEL} = \frac{148}{48}bt^3 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

La mejora se logra con un incremento marginal de peso si se usa un material y/o una estructura para el núcleo entre láminas que sea de baja densidad (por ejemplo, usando una espuma polimérica o una estructura tipo panal de abejas). A menudo, la integridad estructural del panel sándwich está limitada por la resistencia a cortadura entre las láminas. Así, la unión lámina-núcleo debe ser lo suficientemente fuerte como para poder transmitir los esfuerzos de corte durante la deformación a flexión y prevenir fallos durante el doblado. En la figura 2.4 se muestra la rigidez y el peso relativos de paneles sándwich frente a paneles sólidos.


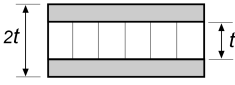
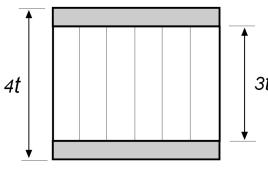
	 Material sólido	 Núcleo espesor t	 Núcleo espesor $3t$
Rigidez	1,00	7,00	37,0
Resistencia a flexión	1,00	3,50	9,20
Peso	1,00	1,03	1,06

Figura 2.4. Valores relativos de rigidez y peso de paneles sándwich comparados con paneles sólidos

1.3. Relación entre la carga y la deformación

Al igual que otras estructuras, el panel sándwich puede analizarse de una manera sencilla utilizando los principios elementales de la mecánica estructural; en este apartado se estudiará la relación entre una carga aplicada y la deformación resultante de la misma, que servirá como base de los cálculos que se realizarán en la parte experimental de la presente investigación; el desarrollo aquí presentado es válido para el caso particular en el que las caras o pieles sean planas, no perfiladas y de poco grosor respecto al grosor del núcleo.

A causa de la influencia de la relativa flexibilidad del material del núcleo, las ecuaciones que rigen el comportamiento del panel sándwich se han obtenido tradicionalmente utilizando una teoría de la flexión convencional pero añadiendo la flexibilidad a cortadura del núcleo, esto es, incluyendo la deformación por esfuerzo cortante. Esto resulta imperativo no solo por la innegable influencia de la cortadura del núcleo en el caso de tener cargas instantáneas, sino también en el hecho de que muchos de los materiales del núcleo utilizados comúnmente experimentan fluencia bajo tensión, lo que resulta relevante cuando actúan cargas permanentes. Otra consideración importante es que los materiales del núcleo se eligen generalmente por sus propiedades aislantes y por ello, pueden existir grandes diferencias de temperatura entre las caras del panel; esto trae consigo tensiones de origen térmico que también han de considerarse en el análisis.

Finalmente, el núcleo también influye como elemento que restringe los fenómenos de abollamiento y arrugamiento de las caras; estos fenómenos son relevantes en paneles sándwich de pieles de muy poco espesor como es el caso de los paneles de caras metálicas muy delgadas sin perfilar o con muy poco perfil; en el panel objeto de esta investigación este fenómeno es descartable. Por lo tanto, los principales factores a tener en cuenta cuando se considera el comportamiento estructural de un panel sándwich son:

- La influencia de la flexibilidad a cortante del núcleo en el comportamiento global.
- La fluencia de los materiales de espuma rígida con el tiempo.
- La influencia de las tensiones y deformaciones inducidas por la temperatura
- La influencia del núcleo en la restricción local de los fenómenos de abollamiento y arrugamiento de las caras.

Davies⁸ es uno de los investigadores que recopiló el desarrollo y las ecuaciones básicas mostradas en este apartado y que ya habían sido deducidas y discutidas por varios autores. La *figura 2.5* muestra las tensiones y las deformaciones resultantes en un elemento pequeño de un panel sándwich.

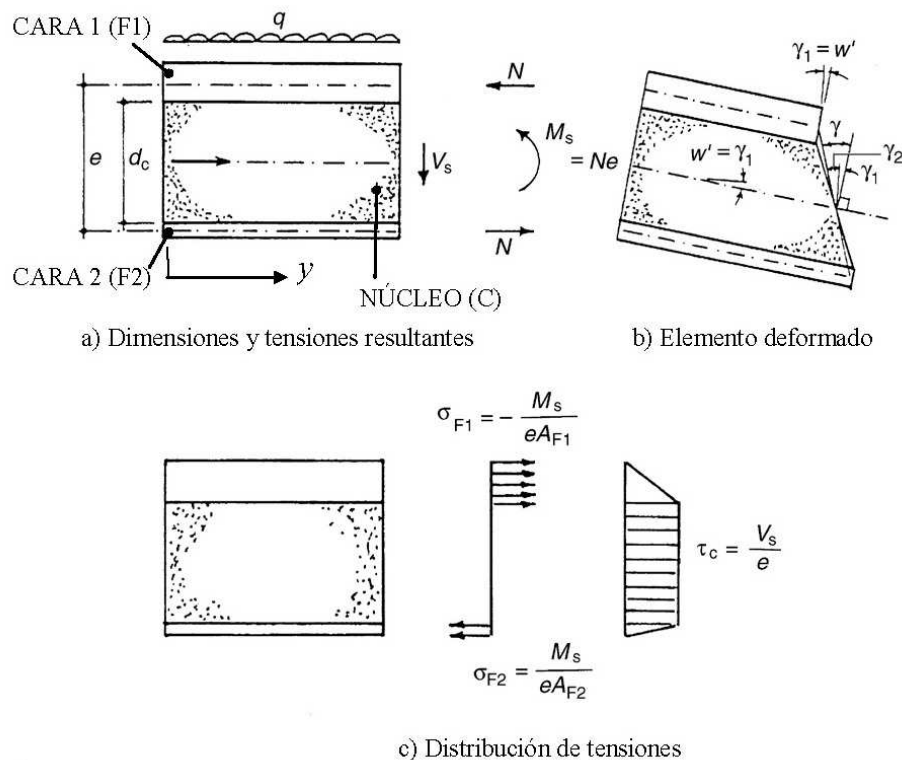


Figura 2.5. Fuerzas y deformaciones en un elemento sándwich típico, con caras delgadas

Las relaciones entre tensiones y deformaciones, incluida la existencia de tensiones debidas a la diferencia de temperatura entre las caras, son las siguientes:

$$M_s = B_s (\gamma_2' + \theta) = B_s (\gamma' - w'' + \theta) \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$$V_s = A_C G_{eff} \gamma \quad (\text{Ec. 2.8})$$

El superíndice prima indica la derivada con respecto a la dirección longitudinal del panel. Aparte de las magnitudes definidas en la *figura 2.5*, se tiene que:

- M_s es el momento flector en el sándwich
- $B_s = E_{F1} A_{F1} E_{F2} A_{F2} e^2 / (E_{F1} A_{F1} + E_{F2} A_{F2})$; es la rigidez a flexión del sándwich
- A_{F1} y A_{F2} son las secciones transversales de las caras
- E_{F1} y E_{F2} es el modulo de Young de las caras
- e es el espesor efectivo del núcleo
- γ es la deformación en el núcleo producida por el esfuerzo de cortadura; como puede verse es la divergencia de la normal respecto al eje horizontal de la sección.
- $\theta = (\alpha_{F2} T_2 - \alpha_{F1} T_1) / e$; es la curvatura resultante de la diferencia de temperatura entre las caras
- α_{F1} , α_{F2} , son los coeficientes de expansión térmica de las caras
- T_1 , T_2 es la temperatura de las caras
- w es la deformación vertical total o flecha total en cada punto del panel. Es función de la variable y
- V_s es la fuerza cortante en el sándwich
- $A_C = be$; es el área efectiva del núcleo de espuma
- b es el ancho del panel
- $G_{eff} = G_C e / d_C$; es el módulo de cortante efectivo, del núcleo
- G_C es el modulo de cortante del núcleo
- d_C es el grosor de la plancha del núcleo
- q es la carga por unidad de longitud, aplicada sobre el sándwich.
- N es la fuerza normal en la cara

Las ecuaciones de equilibrio son las de la teoría de la flexión:

$$\frac{dM_s}{dy} - V_s = 0 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$\frac{dV_s}{dy} + q = 0 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Y sustituyendo la relación entre la tensión resultante y la deformación, se llega a:

$$B_s (\gamma'' - w''') - A_c G_{eff} \gamma = 0 \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$A_c G_{eff} \gamma' = -q \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Despejando estas ecuaciones finalmente se llega a:

$$B_s w'''' = q - \frac{B_s}{A_c G_{eff}} q'' \quad (\text{Ec. 2.13})$$

$$\gamma' = -\frac{q'}{A_c G_{eff}} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

En muchos casos prácticos, los momentos flectores y las fuerzas cortantes resultan ser estáticamente determinados y solamente es necesario utilizar las ecuaciones anteriores para determinar las deformaciones; en esos casos resulta más útil emplear estas expresiones:

$$w'' = -\frac{M_s}{B_s} + \frac{V_s'}{A_c G_{eff}} - \theta \quad (\text{Ec. 2.15})$$

$$\gamma = \frac{V_s}{A_c G_{eff}} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

De tal manera que en la primera de estas ecuaciones se tiene la derivada con respecto a la variable de la dirección longitudinal, y , dos veces, de la deformada o flecha en cada punto de la estructura panel. Si no se considera el término de la temperatura, los dos términos restantes a la derecha de la primera de las ecuaciones son los términos correspondientes a la flexión y a la cortadura respectivamente. Desde un punto de vista práctico, es conveniente considerar

estos dos términos de manera separada y considerar la deformación como la suma de los dos componentes.

Como puede verse, los momentos flectores son soportados completamente por las caras, mientras que las fuerzas cortantes lo son por el núcleo. Para paneles estáticamente determinados, las tensiones resultantes son idénticas a las de la teoría de la flexión. Para esos paneles, la flexibilidad del núcleo sirve meramente para aumentar las deformaciones. Sin embargo para paneles estáticamente indeterminados, como por ejemplo para paneles dispuestos sobre tres apoyos formado dos vanos, que es el caso de uno de los ensayos realizados dentro de la presente investigación, las tensiones resultantes están también influenciadas por la flexibilidad del núcleo.

Partiendo de estas ecuaciones se pueden extraer soluciones para los diferentes casos de carga y apoyos. Así para el caso de un panel simplemente apoyado con una longitud de vano L , sobre el que se dispone una carga uniformemente distribuida q , la expresión de la deformación o flecha máxima en el centro del vano es:

$$w_{\max} = \frac{5qL^4}{384B_s}(1 + 3,2k) \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde el término k resulta de agrupar diversos valores y tiene la siguiente expresión, siendo L la longitud del vano:

$$k = \frac{3B_s}{A_c G_{\text{eff}} L^2} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Para el caso de un panel simplemente apoyado con una longitud de vano L , sobre el que se dispone una carga puntual P , la expresión de la deformación o flecha máxima en el centro del vano es:

$$w_{\max} = \frac{PL^3}{48B_s}(1 + 4k) \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Estos desarrollos pueden emplearse para obtener soluciones muy precisas en los casos más sencillos, sin embargo cuando haya irregularidades en las condiciones de los apoyos o en la carga, resulta necesario acudir a los métodos numéricos de análisis de propósito general; Davies⁸ recomienda el método de los elementos finitos como el que ofrece una mejor aproximación, si bien suele necesitar de la utilización de un gran número de elementos para obtener soluciones precisas.

2. PANELES SÁNDWICH DE MADERA CON NÚCLEO AISLANTE DE POLÍMERO

2.1. Tableros derivados de la madera empleados como pieles

Los tableros derivados de la madera que se emplean como pieles o caras del panel sándwich objeto de esta investigación, son denominados en ocasiones con los términos ingleses *panel*, o *composite*; esta última denominación resulta ser más genérica y se utiliza para describir aquellos materiales derivados de la madera que incluyen adhesivos o resinas para constituir un elemento completo y por tanto abarca desde un tablero de partículas hasta una viga laminada de propósito estructural.

2.1.1. Tipos de tableros

Hay una gran variedad de elementos derivados de la madera que se utilizan en la fabricación de tableros, como por ejemplo fibras largas, fibras cortas, virutas o partículas. A su vez estos elementos pueden presentarse en una gran variedad de formas y tamaños y pueden utilizarse solos o en combinación, lo que permite unas posibilidades casi ilimitadas. No obstante los tableros se podrían agrupar, de manera simplificada, en tres categorías:

- Tableros de madera contrachapada (tipo plywood)
- Tableros de partículas, tableros de virutas y tableros de fibras.
- Tableros compuestos madera y no-madera.

Dentro de cada una de estas categorías las variaciones surgen en función del tamaño de los elementos componentes, de su orientación preferente o no, de la densidad final alcanzada, del proceso de fabricación, del tipo y cantidad de resina empleada, etc. En la *tabla 2.2* se muestra una relación no exhaustiva de algunos de las tipologías más extendidas de tableros derivados de la madera.

Denominación		Definición
Tablero de madera contrachapada (plywood)		Tablero fabricado a base de delgadas láminas de madera adheridas entre sí, y con las fibras de cada lámina dispuestas transversalmente con respecto a las de las láminas contiguas.
Tablero de partículas (particleboard o chipboard)		Tablero fabricados con partículas de madera (de 0,2 a 0,4 mm) unidas por una resina
Tablero de virutas	Flakeboard	Tablero fabricado con virutas de madera estándar aglomeradas con una resina
	Waferboard	Tablero fabricado con virutas más grandes, que suelen ser de tipo rectangular y sin orientar en una dirección preferente
	Tablero de virutas orientadas (OSB)	Tablero fabricado uniendo capas formadas por virutas o astillas de madera orientadas en la misma dirección
Tablero de fibras (Fiberboard)	Medium-density fiberboard (MDF)	Tablero fabricado a partir de maderas que han sido reducidas a sus elementos fibrosos básicos y aglutinados con resinas sintéticas.
	Hardboard o High-density fiberboard (HDF)	Tablero similar al anterior pero más denso. Utiliza aglutinantes presentes en la propia madera
Tableros compuestos de madera y no madera		Tableros que además de llevar derivados de la madera incorporan otro u otros materiales tales como plástico, yeso o cemento.

Tabla 2.2. Relación no exhaustiva de tableros basados en madera

El segundo componente de estos tableros es el aglomerante que es el adhesivo que une las partículas o las virutas y que puede ser un polímero termoestable o una resina de curado a alta temperatura; algunos de los aglomerantes más usuales se indican en la *tabla 2.3*, siendo las más empleadas las resinas de UF y PF.

Los tableros derivados de la madera suelen incluir, además, diversos aditivos, siendo los más utilizados las ceras que se emplean para evitar la penetración del agua. Las ceras son hidrocarburos de alto peso molecular derivadas del crudo de petróleo, que se añaden en forma sólida o en emulsión. En los tableros de fibras y de partículas las emulsiones de cera dan al producto una excelente resistencia al agua y estabilidad dimensional frente al mojado del tablero, incluso en las pequeñas cantidades que se añaden (menos del 1% del peso en seco de las partículas o virutas de madera). Su efecto es el de retardar la velocidad de entrada del agua líquida⁹, si bien perjudican levemente las propiedades mecánicas del tablero.

En el caso particular de los tableros especialmente fabricados para resistir a la humedad se pueden añadir no solo ceras sino también asfaltos para mejorar el comportamiento frente al agua.

Estas propiedades mejoradas frente a la penetración del agua también son importantes para asegurar el éxito de las operaciones de adhesión del tablero a otros elementos, tales como el núcleo del panel sándwich.

Denominación	Definición
Resinas fenol-formaldehído (PF)	Los productos resultantes suelen denominarse fenólicos. Tienen un color rojizo. Se emplean en tableros sometidos a algún grado de exposición al ambiente exterior: OSB, plywood y otros. Comparativamente requieren tiempos largos de prensado y altas temperaturas. Los productos resultantes tienen estabilidad dimensional reducida.
Resinas de urea-formaldehído (UF)	Se emplean en tableros para uso en ambientes interiores. Los productos resultantes presentan buena estabilidad dimensional y suave acabado superficial. Tienen temperaturas y tiempos de prensado moderados. Son resinas más económicas que las PF y por eso se utilizan ampliamente en tableros de partículas y MDF. No presentan un color marcado lo que las hace muy utilizadas en muebles y productos decorativos
Isocianatos	Isocianatos, como el di-isocianato difenil metileno, se usan habitualmente en los composites de madera, como por ejemplo en el OSB.
Resinas de melamina-formaldehído	Se usan en laminados decorativos. En algunas aplicaciones se mezclan con resinas UF.

Tabla 2.3. Relación de algunos aglomerantes utilizados en tableros derivados de la madera

Los tableros empleados como pieles en paneles sandwich tienen una densidad de entre 600 y 750 kg/m³ y se fabrican en un rango de espesores que va desde los 2 a los 25 mm. Las longitudes raramente exceden de los 3,5 m, lo que junto con otras cuestiones hace que no sean apropiados para su uso en una línea de espumado en continuo; no obstante son aptos tanto para moldear espumas sobre ellos como para adherir la plancha de espuma ya extruida que hace de núcleo.

El tablero de partículas (chipboard o particleboard) basado en madera y el tablero de madera contrachapada (plywood) pueden usarse en ambientes donde no haya grandes variaciones de humedad en el aire, pero bajo cargas de largo plazo la fluencia de la cara tiene relevancia y por tanto debe tenerse en cuenta lo mismo que se tiene en cuenta la fluencia del material del núcleo.

En cuanto a los tableros compuestos de madera y no madera utilizados en paneles sandwich, destacan los tableros de yeso, los tableros de yeso reforzado con fibras, los tableros basados en cemento y los tableros de plástico.

El tablero de yeso es por sí mismo una estructura sándwich formada por caras de cartón y núcleo de yeso; compuesto principalmente por sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$)¹⁰. Tiene una resistencia bastante más baja que el tablero de madera pero por otra parte presenta muy buen comportamiento frente al fuego. Su resistencia al doblado está basada, principalmente, en la resistencia a tracción de las caras de cartón. Se fabrican en espesores de 6 a 15 mm y puede reforzarse con papel o con fibras de celulosa o fibras de vidrio. Los tableros de yeso son relativamente insensibles a pequeñas variaciones de la humedad, no obstante deben ser dispuestos únicamente en ubicaciones secas. Se ha observado, en materiales de yeso, la hidratación de los mismos que ha inducido el crecimiento de los cristales del sulfato de calcio, densificando el material, lo que a nivel macroscópico se traduce en una rigidización del material¹¹ (ver *figura 2.6*).

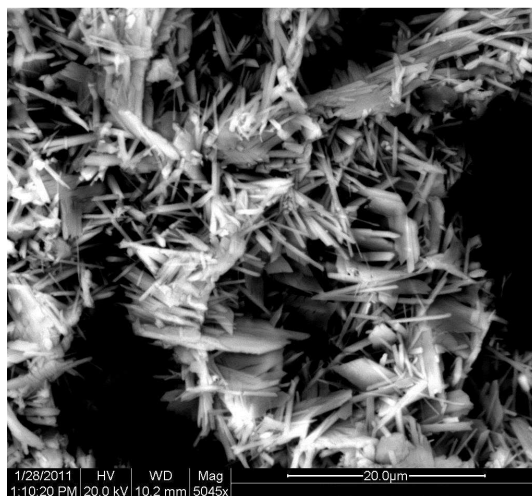


Figura 2.6. Microestructura del material del tablero de yeso susceptible de hidratación.

El tablero de madera-cemento destaca por su excelente resistencia al fuego, y al ataque por organismos vivos; asimismo tiene una reducida conductividad térmica, un alto aislamiento sonoro y buena estabilidad dimensional. No obstante su durabilidad se ve fuertemente afectada por los ciclos de humectación-secado¹².

2.1.2. Fabricación de tableros

Es importante conocer como se fabrica un tablero derivado de la madera para comprender como se comporta cuando se encuentra en servicio. Aunque existen multitud de variaciones en el esquema básico de fabricación de un tablero de partículas o de fibras, se puede dar un esquema general que se sigue en la mayor parte de los casos.

Primeramente se tienen las materias constituyentes derivadas de la madera y que se obtienen por procedimientos de corte o trituración; las partículas y virutas pueden tener diversas procedencias como por ejemplo residuos agrícolas o forestales. Una vez obtenidas, se someten a un proceso de secado y se les aplica el aglomerante. De esta manera se forma un entramado de resina, partículas y/o fibras que es prensado a alta temperatura hasta el curado del aglomerante. Posteriormente se enfría y se procesa hasta llegar a las dimensiones y calidad de superficie requeridas.

El tablero de partículas que forma parte del panel sándwich empleado en este trabajo está compuesto realmente de tres capas consistente en dos caras externas que contienen partículas muy pequeñas de madera y una capa interior hecha de partículas y virutas mas bastas, lo que de hecho resulta una conformación habitual en esta tipología de tableros. El hecho de presentar una superficie exterior más suave y uniforme facilita la realización de procesos posteriores sobre la misma tales como pintar o adherir laminados u otros tableros.

En la fabricación de los tableros uno de las primeras fases críticas es el secado de las partículas o fibras componentes, que se realiza debido a que la materia prima llega a la planta de producción con un contenido alto en humedad que, para el mezclado con resinas líquidas, ha de reducirse hasta alcanzar entre un 2 y un 7% tras la operación de secado. Este contenido

en humedad de las partículas es crítico durante las operaciones de prensado en caliente y condiciona si la resina aglutinante se añadirá en forma seca o en emulsión.

El contenido de resina de un tablero de partículas oscila entre un 4% y un 10% del peso seco de las partículas, siendo de un contenido mayor de resina las partes más exteriores del tablero y menor las interiores. Las ceras parafínicas o microcristalinas se añaden en una cantidad que va de un 0,3% a un 1% del peso seco de las partículas.

La mezcla de partículas, virutas, resina y aditivo, se dispone en forma de “mat” que será presionado para formar el tablero. El primer prensado se realiza en frío para reducir el espesor del “mat” y posteriormente se pasa al prensado en caliente que se realiza entre 1,4 y 3,4 MPa y entre 140 y 165°C. Antes del prensado en caliente, el “mat” tiene un contenido de humedad entre el 8 y el 12% que se ve reducido hasta entre el 5 y el 9% tras dicha operación⁹.

Después del prensado, el tablero se mecaniza para obtener las dimensiones deseadas, tras lo cual se puede aplicar alguna operación para mejorar el acabado superficial o algún producto químico retardador de la llama o contra el ataque de organismos vivos. Tras esto se empaqueta.

2.2. Espumas empleadas como núcleos

Un material celular o espuma es un material formado por pequeñas celdas rellenas de aire. Estas celdas están constituidas por estructuras columnares o estructuras tipo placa que forman las columnas y/o paredes de celdas. La estructura más simple es una estructura bidimensional formada por una matriz de polígonos, como es por ejemplo la estructura hexagonal de un panal de abejas (véase *figura 2.7.a*). Normalmente, esta estructura está formada por poliedros irregulares o esferas (véase *figura 2.7.b*) que se empaquetan en un espacio tridimensional dando lugar a una espuma. Si las celdas están interconectadas entre sí (la estructura es básicamente columnar) se dice que la estructura es de celda abierta, mientras que si las celdas no se interconectan, sino que están separadas por paredes, la estructura es de celda cerrada.

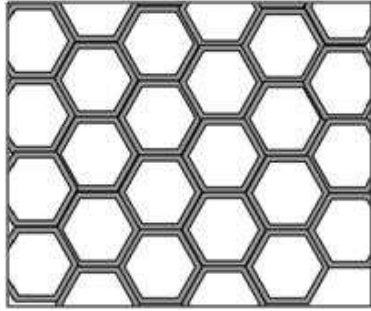


Figura 2.7.a

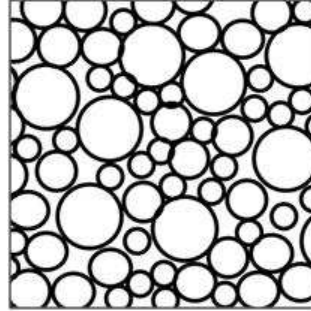


Figura 2.7.b

La propiedad más importante de una espuma es su densidad relativa ρ^*/ρ_s , donde:

ρ^* : densidad de la espuma

ρ_s : densidad del material sólido

Se pueden llegar a fabricar espumas ultraligeras con una densidad relativa de hasta 0,001¹³. Las espumas poliméricas utilizadas para fabricar envases o aislamientos térmicos tienen normalmente una densidad relativa entre 0,05 y 0,2. El corcho está en torno a 0,14 y la mayoría de las maderas blandas entre 0,15 y 0,40. A medida que se incrementa la densidad relativa de la espuma las paredes de las celdas van engrosando y el espacio de la celda disminuye hasta que a partir de una densidad de 0,3 hay una transición de lo que se considera un material celular a lo que es un material sólido que contiene poros aislados.

Las aplicaciones más habituales de las espumas son:

- Aislamiento térmico
- Envase y embalaje
- Aplicaciones estructurales (como núcleos de estructuras sándwich)
- Flotabilidad

En cuanto a las propiedades mecánicas, están íntimamente relacionadas con su densidad. En la bibliografía científica existen distintas expresiones matemáticas para predecir las propiedades mecánicas de las espumas a partir, fundamentalmente, de las propiedades del material sólido y la densidad relativa de la espuma.

Las espumas en su uso estructural trabajan fundamentalmente a cortadura y compresión. En la *figura 2.8* se muestra una curva típica de compresión de una espuma polimérica. Como se puede apreciar, el material presenta una zona inicial de comportamiento elástico lineal, seguido de una zona plana donde se produce el colapso de las celdas sin aumento de tensión y una zona final en la que una vez densificado el material, por el colapso de todas las celdas, la rigidez aumenta exponencialmente hasta el fallo del material.

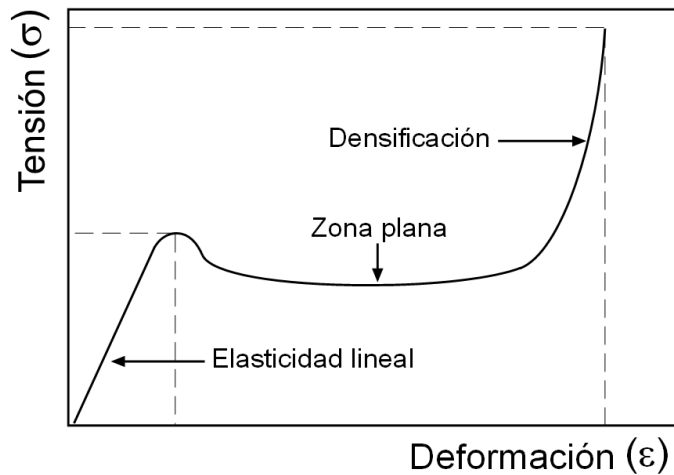


Figura 2.8. Curva típica de compresión de una espuma polimérica

2.2.1. Fabricación de espumas

Prácticamente cualquier material denso puede transformarse en espuma. Los materiales más comunes que se espuman son los plásticos, aunque también se pueden espumar los materiales metálicos y las cerámicas.

Los polímeros se espuman introduciendo gas en el polímero fluido, permitiendo que el gas forme pequeñas burbujas a partir de unos puntos de nucleación (por ejemplo por adición de carbonato cálcico). Estas burbujas crecen y se estabilizan cuando se enfría el material. El gas puede ser mezclado con el polímero inyectándolo en la extrusora o mezclando el polímero con algún agente espumante químico. Hoy en día se utilizan distintos gases para producir las celdas (dióxido de carbono, nitrógeno, isopentano, etc.). Cualquier proceso puede producir espumas de celda abierta o cerrada dependiendo de las condiciones del proceso y las propiedades reológicas del polímero fundido. Una estructura de celda cerrada tendrá mejores

propiedades mecánicas, mientras que una estructura de celda abierta permitirá la absorción de líquidos. En general una espuma tendrá celdas abiertas y cerradas en distintas proporciones.

2.2.2. Espumas de poliestireno. EPS y XPS

El panel sándwich objeto de esta investigación tiene como núcleo una espuma extruida de poliestireno, denominada usualmente como XPS.

El poliestireno es un material termoplástico lo que significa que se puede volver a conformar empleando calor. Destaca por su buen comportamiento como aislante térmico, y sin embargo no es tan empleado en paneles sándwich como cabría esperar debido a que no tiene propiedades de autoadhesión con las pieles o caras. Consecuentemente, el poliestireno se emplea únicamente en forma de planchas que se adhieren al material de las caras, posteriormente a su fabricación, utilizando adhesivos. Por lo tanto este material se utiliza en cantidades pequeñas y en diseños relativamente simples que implican bajos costes de equipamiento de producción.

Estrechamente emparentado con el XPS está el poliestireno expandido (denominado usualmente como EPS) que está constituido por un granulado de poliestireno que contiene un agente espumante, pentano, el cual causa que el granulado espume bajo la influencia de la temperatura. Las planchas de este material se producen en una línea continua o en moldes. En ambos casos son calentados con vapor caliente lo que causa que el granulado expanda y libere pentano, que queda encapsulado dentro de las perlas expandidas. Las perlas se juntan pero no forman una estructura celular cerrada. En una línea continua las planchas se laminan hasta llegar al espesor deseado, mientras que en la técnica de moldeo, se mecanizan a partir de bloques más largos. Por el propio proceso de fabricación, el EPS tiende a reducir su volumen cuando el pentano escapa desde la espuma y se igualan las diferencias de presión.

Cuando se comparan la espuma de poliuretano (PUR) y el EPS se encuentra que la primera es dos veces mejor que la segunda en términos de transmisión térmica, y esa es una de las principales razones por las que generalmente se emplea PUR.

El poliestireno procesado por el método de extrusión (XPS) da una espuma más uniforme, con una estructura de pequeñas celdas cerradas y superficies compactas y planas. Durante la fabricación, los granos de poliestireno se funden y después se extruyen. El agente espumante gas se añade a la mezcla, que posteriormente se enfría. Hace tiempo el gas utilizado era triclorofluorometano (R11), pero hoy en día ha sido reemplazado con gases menos dañinos para la capa de ozono tales como el dióxido de carbono o el R22. El XPS tiene excelentes propiedades físicas, es muy dúctil y relativamente fuerte comparado con otras espumas rígidas plásticas. Resulta también atractivo por la baja absorción de agua que presenta, lo que se debe a su estructura de celda cerrada.

Cuando se adhiere a las pieles del panel sándwich, se emplean adhesivos libres de disolventes, ya que la resistencia del poliestireno a los disolventes es pobre. Los mejores resultados se obtienen usando adhesivos de dos componentes basados en poliuretano⁸.

3. UNIONES ADHESIVAS

Aunque idealmente el diseño de una estructura no debiera contener uniones ya que éstas introducen discontinuidades, concentración de tensiones, aumento de peso y en general debilitan la estructura, en algunas ocasiones, como es el caso del panel sándwich objeto de estudio, es imperativo el empleo de las mismas.

Tradicionalmente las uniones se realizaban por soldadura o uniones mecánicas (tornillos, remaches, etc.), sin embargo el uso creciente de nuevos materiales como son los materiales compuestos de matriz plástica, o la utilización de distintos materiales dentro de la misma estructura (como es el caso de las estructuras sándwich), plantean nuevos problemas en la realización de uniones estructurales.

En estos casos, la unión de materiales mediante adhesivos (véase *figura 2.9*) es la mejor de las opciones cuando no la única. Las normas ASTM¹⁴ definen un adhesivo como una sustancia capaz de mantener juntos materiales a través de la sujeción por sus superficies, mientras que un adherente sería cada uno de los sustratos que se mantienen unidos por el adhesivo. Las uniones adhesivas pueden ser ventajosas frente a otros métodos tradicionales de unión, o en algún caso, como el que nos ocupa, la única solución factible.

Ventajas de las uniones adhesivas:

- Se mejora la distribución de las tensiones por lo que este tipo de uniones tiene un buen comportamiento a fatiga.
- Se reduce el peso de la estructura frente a las uniones mecánicas.
- Permiten nuevos tipos de diseño de estructuras (por ejemplo estructuras sándwich)
- Se mejora la resistencia a corrosión.

Inconvenientes de las uniones adhesivas:

- Son uniones fijas, no desmontables.
- Sufren debilitamiento con el tiempo y las acciones climáticas.
- Requieren tratamientos superficiales.
- Las temperaturas de servicio son menores que en las uniones mecánicas.

- La resistencia a tracción y cortadura son menores que en las uniones mecánicas, por lo que no suelen ser usados para unir componentes metálicos de gran espesor a no ser que el adhesivo trabaje a compresión.

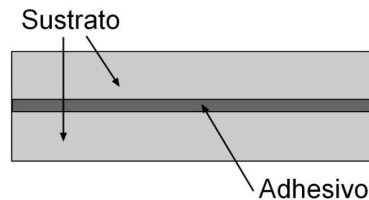


Figura 2.9. Unión adhesiva y nomenclatura

A nivel mundial, es en el sector de la construcción donde mayor cantidad de adhesivos se consumen, empleándose desde en la fabricación de puertas y ventanas hasta en la fabricación de componentes con función estructural pasando por todo tipo de tableros de fibras y de partículas.

La correcta transferencia efectiva de tensiones entre las partes que conforman un elemento compuesto de otros adheridos, tal como ocurre en el caso de un panel sándwich, es fundamental para el buen funcionamiento del mismo. Si la unión adhesiva está correctamente realizada, es capaz de transferir eficazmente las tensiones de un elemento a otro y por lo tanto de incrementar la resistencia y rigidez de los materiales compuestos. Para que esta transferencia de tensiones entre componentes funcione correctamente es imperativo comprender y controlar la complejidad de factores que intervienen en cada unión adhesiva particular.

En la adhesión, las dos superficies se mantienen juntas por fuerzas que actúan entre las caras. Estas fuerzas pueden ser fuerzas de valencia, fuerzas de enclavamiento mecánico u otras. Las fuerzas de valencia son fuerzas de atracción producidas por las interacciones de átomos, iones y moléculas que existen dentro y en las superficies de ambos, el adhesivo y el adherente. Las fuerzas de enclavamiento mecánico se generan cuando un adhesivo en su estado líquido ha penetrado una superficie porosa y posteriormente ha quedado anclado a la misma durante su solidificación. En un enlace adhesivo resulta incierto cual es el alcance de las fuerzas de

valencia y cuál de las fuerzas de enclavamiento mecánico, pero se reconoce a ambos tipos de fuerzas como esenciales para un enlace efectivo.

En lo que respecta a la adhesión a las estructuras porosas tales como la madera, son las fuerzas de enclavamiento mecánico las que tienen más peso⁹, y esta adhesión aumenta con la penetración del adhesivo en la microestructura que forman las cavidades celulares del material; si un adhesivo penetra profundamente en la madera y en el proceso del curado alcanza una rigidez suficiente, la fuerza del enlace así formado puede superar la resistencia de la madera. Para conseguir la máxima resistencia, el adhesivo habrá de contactar íntimamente, humedecer la superficie, esto es, que el ángulo de contacto entre la gota de adhesivo y la superficie a adherir se aproxime a cero, factor que está relacionado con la afinidad energética entre el adherente y el adhesivo.

La adhesión se completa tras la transición del adhesivo desde el estado líquido al sólido. Esta transición puede ser un cambio físico como es el caso de los adhesivos termoplásticos o un cambio químico como ocurre en el caso de los termoestables. En termoplásticos el cambio físico a sólido puede ocurrir por una pérdida de solvente del adhesivo a través de la evaporación y difusión en la madera o por enfriamiento del adhesivo en una superficie más fría. En termoestables el estado sólido se alcanza a través de polimerización química en estructuras de enlace cruzado que resisten el reblandecimiento por calor. La mayoría de los adhesivos para madera termoestables contienen agua como elemento portador; este agua ha de ser evaporada o absorbida por la madera para que el adhesivo cure completamente.

La calidad de la adherencia está afectada por las propiedades inherentes a la naturaleza del tipo de sustrato y por las propiedades físicas de su superficie, en especial por la densidad, porosidad, rugosidad y contenido en humedad.

La madera de abeto, integrante del panel sándwich objeto de este trabajo, está entre los tipos de madera más fáciles de adherir con amplio rango de adhesivos y de condiciones⁹.

3.1. Naturaleza, clasificación y tipos de adhesivos

Existe una gran cantidad de adhesivos comerciales. Estos adhesivos se pueden clasificar de distintas formas:

- En función de los polímeros de base: naturales o sintéticos.
- Termoplásticos o termoestables.
- En función de su forma física: monocomponente, multicomponente, laminado, etc.
- Por familias químicas: epoxis, siliconas, etc.
- Según su funcionalidad: estructurales, de contacto, etc.

La mayoría de las formulaciones de adhesivos para uso en madera y sus derivados están basadas en polímeros orgánicos, bien naturales, bien sintéticos. Dentro de los adhesivos que provienen de polímeros naturales están los adhesivos basados en celulosa, en caseína, en dextrina y en proteínas vegetales tales como la soja. Utilizados durante centurias, han sido progresivamente desplazados por los adhesivos basados en polímeros sintéticos, que no solo son más resistentes, rígidos y duraderos, sino que también presentan una mayor resistencia al agua. Los primeros adhesivos sintéticos de uso para madera se fabricaron masivamente en la década de 1930.

Los adhesivos basados en polímeros termoplásticos tienen generalmente menor resistencia al calor y a la humedad y resisten peor las cargas estáticas permanentes. Los adhesivos para madera basados en estos polímeros termoplásticos incluyen las emulsiones de acetato, de polivinilo y los elastómeros. Por otra parte los adhesivos basados en polímeros termoestables pueden ser excelentes adhesivos estructurales ya que por la misma naturaleza de su proceso de solidificación, al producirse un cambio químico irreversible no ablandan por el efecto de la temperatura y sus estructuras de enlaces cruzados presentan gran resistencia a la humedad, a otros productos químicos y son suficientemente rígidos para soportar cargas estáticas permanentes sin sufrir deformación. Ejemplos de adhesivos de uso en madera basados en polímeros termoestables son los fenólicos, resorcinólicos, melamínicos, isocianato, urea y los adhesivos epoxi.

En el ámbito de la construcción se consideran adhesivos estructurales aquellos que contribuyen a la resistencia y rigidez de una estructura durante la vida útil de la misma. Son, en general, más resistentes y rígidos que la madera a la que unen, y el enlace que forman resulta de una importancia crítica ya que un fallo en el mismo puede acarrear consecuencias serias en la estructura e incluso pérdida de vidas humanas.

Como ejemplo de aplicaciones estructurales de adhesivos se tienen las vigas de madera laminada encolada, los paneles prefabricados portantes de caras tensionadas basados en madera y las viguetas I prefabricadas derivadas de la madera.

Los adhesivos que son más fuertes, rígidos y resistentes al deterioro en condiciones de servicio son, desafortunadamente, los menos tolerantes a variaciones en las condiciones de la superficie de la madera, en el contenido en humedad de la misma y a como se realiza el ensamble o montaje (presión, temperatura y condiciones del curado). Por el contrario los adhesivos que son más débiles, menos rígidos y con menos resistencia a condiciones de servicio severas son aquellos más tolerantes a variaciones en la superficie de la madera, en las condiciones del ensamblado y en las condiciones del curado.

En la *tabla 2.4* se muestra una clasificación no exhaustiva de los adhesivos según su comportamiento estructural. Se consideran adhesivos de pleno uso en ambiente exterior a aquellos que mantienen su fuerza y rigidez bajo los más severos ciclos de humectación acuosa y secado. Cuando la humedad hace que la unión adhesiva sea menos resistente que la propia madera, éste adhesivo se considera de rango inferior. Cabe indicar que la inclusión de un tipo de adhesivo en una única categoría no excluye que ciertas formulaciones del mismo puedan entrar en una categoría superior o inferior.

Entre los adhesivos para usos exteriores y para usos interiores hay adhesivos intermedios que mantienen la resistencia y la rigidez aun cuando experimenten inmersiones acuosas durante cortos periodos de tiempo, pero que se deterioran más rápidamente que la madera, en general, frente a la exposición al agua y al calor. Los adhesivos semiestructurales aportan resistencia y rigidez a una unión adhesiva y en algunos casos pueden ser tan fuertes y rígidos como la madera, sin embargo no soportan, sin deformarse, cargas permanentes estáticas. Se pueden poner en contacto con agua durante breves periodos de tiempo, pero no soportan ciclos de

saturación a largo plazo, por tanto están limitados en su uso exterior. Un ejemplo de este tipo de adhesivos es el poliuretano empleado en el panel sándwich objeto de este trabajo.

Los adhesivos no estructurales pueden soportar el peso del material al que une y puede igualar la resistencia y rigidez de la madera bajo condiciones secas. Sin embargo cuando se expone al agua o a condiciones de alta humedad, los adhesivos no estructurales pierden rápidamente su capacidad de transferir carga. Esto ocurre por ejemplo con los adhesivos empleados para unir baldosas.

Algunos adhesivos podrían incluirse en más de una categoría porque pueden formularse para un amplio rango de aplicaciones. Los adhesivos de poliuretano son un ejemplo de esto; así, forman películas duraderas y muy adhesivas, pero el enlace que forman es susceptible de deterioro por causa de las tensiones debidas a procesos de hinchado húmedo y posterior secado y merma dimensional⁹.

Integridad estructural	Ambiente de servicio	Tipo de adhesivo
Estructural	Plena utilización en ambiente exterior (durante largos periodos de tiempo soporta mojado por agua y secado)	Fenol formaldehido (PF)
		Resorcina formaldehido (RF)
		Fenol resorcina formaldehido (PRF)
		Emulsión polímero/isocianato
		Melamina-formaldehido
	Uso limitado en exteriores (soporta mojado por agua durante cortos periodos de tiempo)	Melamina-urea-formaldehido (MUF)
		Isocianato
		Epoxi
	Uso en interiores (soporta cortos periodos de tiempo en condiciones de alta humedad)	Urea formaldehido (UF)
Caseína		
Semiestructural	Uso limitado en exteriores (soporta mojado por agua durante cortos periodos de tiempo)	Acetato de polivinilo de enlaces cruzados
		Poliuretano (PUR)
No estructural	Interior	Acetato de polivinilo
		Adhesivos de origen animal
		Adhesivos de proteínas vegetales
		Adhesivos elastoméricos

Tabla 2.4. Adhesivos utilizados para madera y sus derivados, clasificados según su comportamiento estructural esperado según el nivel de exposición ambiental.

A continuación se describen las características de las familias de adhesivos más utilizados.

Fenólicos (o fenol-formaldehídos): son adhesivos termoestables. Se pueden presentar en forma de uno o dos componentes, en los dos casos la reacción de polimerización es por condensación, dando lugar a subproductos. En general, estos adhesivos son de bajo coste presentando una buena resistencia mecánica, resistencia a biodegradación, agua caliente y acción atmosférica. La resistencia a temperaturas elevadas es también buena. Como limitaciones, estos materiales tienen baja resistencia a impacto, y grandes tensiones residuales por contracciones durante el curado que les hace ser frágiles.

Los adhesivos fenólicos dominan el mercado de los adhesivos para madera, especialmente en el caso de la madera laminada. La unión de sustratos metálicos es otra aplicación típica de estos adhesivos.

Adhesivos de base Epoxi: son adhesivos ampliamente utilizados. Son adhesivos termoestables, disponibles en una gran variedad de formulaciones. Tienen una alta resistencia mecánica y durante el curado las contracciones sufridas son pequeñas además de no expulsar volátiles. Sin embargo, la resistencia a pelado es baja y son materiales muy frágiles. Por otro lado, mantienen una buena resistencia a altas temperaturas y tienen un coste relativamente bajo. Entre las limitaciones de estos materiales podemos destacar el hecho de que suelen estar formados por dos componentes que requieren una mezcla bastante exacta además de sufrir una reacción exotérmica durante el curado. Normalmente uno de esos componentes requiere el almacenamiento en un lugar refrigerado.

Poliuretanos: son válidos para unir la mayoría de los materiales. Son flexibles, tienen una alta resistencia a la abrasión, son tenaces y a bajas temperaturas son los adhesivos de mayor resistencia mecánica. Como principales inconvenientes de estos adhesivos se encuentran su alta sensibilidad a la humedad antes y después del curado, la toxicidad del isocianocrilato y su baja resistencia a cortadura a temperatura ambiente y a altas temperaturas. Su coste se puede calificar como moderado.

Acrílicos modificados: se denominan también acrílicos de segunda generación. Están formados por un adhesivo acrílico modificado y un activador de superficie. Debido al mecanismo de polimerización (polimerización por adición de radicales libres), no es necesario realizar la mezcla en proporciones muy exactas. El endurecimiento del adhesivo se realiza en

un tiempo muy pequeño. Estos adhesivos presentan una buena resistencia a pelado, impacto y cortadura entre -107 y 121 °C. En la unión de plásticos y metales, se obtienen resistencias altas, aún cuando las superficies de unión no están suficientemente desengrasadas o limpias. Durante el curado se observan contracciones pequeñas. Presentan una resistencia alta frente a la humedad especialmente en la unión de plásticos. Entre sus limitaciones podemos destacar una baja resistencia a altas temperaturas, su toxicidad y su inflamabilidad. Su coste es moderado.

Anaeróbicos: son líquidos monoméricos de un sólo componente que curan por un proceso de polimerización por radical libre, cuando se elimina el oxígeno. Estos adhesivos se manufacturan en contacto con aire para mantener su estado monomérico. Los adhesivos anaeróbicos estructurales presentan en general una temperatura máxima de servicio de 149 °C. Su resistencia mecánica es alta y se comportan bien ante la humedad. En presencia de aire atacan a algunos termoplásticos y elastómeros. No es recomendable utilizarlo en superficies permeables. Su coste es moderado.

Siliconas: está formado por sistemas mono o bicomponente que curan dando lugar a un sólido termoestable cuando entra en contacto con la humedad atmosférica. En el caso de dos componentes no es necesario el contacto con la humedad. En el sistema bicomponente la reacción de polimerización se produce por condensación dando lugar a subproductos. Estos adhesivos son válidos para unir una gran variedad de sustratos.

En general las siliconas tienen buena resistencia a pelado entre -60 y 120 °C. Muestran una buena flexibilidad y resistencia a impacto, humedad, resistencia al agua caliente, oxidación y degradación climática. La resistencia a cortadura de uniones metal-metal es generalmente baja (entre 1,72 y 3,44 MPa). Las siliconas son útiles para unir metales, vidrio, papel, plásticos y elastómeros, aunque el coste de estos adhesivos es alto.

Cianocrilatos: son líquidos de un sólo componente que curan cuando se depositan sobre una superficie. El proceso de curado, se ve fuertemente afectado por la humedad y el pH de las superficies, la humedad relativa del ambiente y el espesor de la capa de adhesivo.

Estos adhesivos pueden unir la mayoría de los sustratos. Tienen un proceso de curado muy rápido y una resistencia alta a tracción. Entre sus limitaciones se incluyen un coste relativamente alto, una baja resistencia a pelado, son frágiles y tienen bajas propiedades a

altas temperaturas. Presentan también una buena adhesión en metales, pero tienen una vida corta sobre algunas superficies. Uno de sus principales inconvenientes es su adhesión a la piel.

Adhesivos para alta temperatura: estos adhesivos están basados en polímeros sintéticos que contienen anillos aromáticos y/o heterocíclicos en la cadena principal. La reacción de polimerización por condensación de estas estructuras da lugar a sistemas altamente reticulados. Estos adhesivos tienen un coste alto, son difíciles de manipular y tienen unos tiempos de curado grandes durante los cuales se producen volátiles que deben ser eliminados.

A altas temperaturas tienen mayor resistencia mecánica que los epoxi o los fenoles, sin embargo son más sensibles a la exposición de agua o humedad. Estos adhesivos se aplican principalmente en el campo aeroespacial para unir materiales que soporten una temperatura en servicio igual o superior a 260 °C.

En la *tabla 2.5* se muestran las propiedades típicas de los adhesivos más utilizados.

Propiedad	Epoxi	Poliuretano	Acrílico m.	Cianocrilato	Anaeróbico
Sustratos que unen	La mayoría	Superficies suaves no porosas	Superficies suaves no porosas	Metales y plásticos no porosos	Metales, vidrios, termoestables
Temp. de servicio	-55 a 121 (°C)	-157 a 79 (°C)	-73 a 121 (°C)	-55 a 79 (°C)	-55 a 149 (°C)
Resistencia a impacto	Baja	Excelente	Buena	Pobre	Regular
Resistencia a cortadura	15,4 (MPa)	15,4 (MPa)	25,9 (MPa)	18,9 (MPa)	17,5 (MPa)
Resistencia a pelado	< 525 (N/m)	14000 (N/m)	5250 (N/m)	< 525 (N/m)	1750 (N/m)
Resistencia disolventes	Excelente	Buena	Buena	Buena	Excelente
Resistencia a humedad	Excelente	Regular	Buena	Baja	Buena
Toxicidad	Media	Media	Media	Baja	Baja
Inflamabilidad	Baja	Baja	Alta	Baja	Baja

Tabla 2.5. Propiedades de los adhesivos más utilizados

3.2. Contacto entre superficies

Actualmente está ampliamente aceptado que para que exista una unión fuerte entre adhesivo y sustrato es necesario un contacto íntimo intermolecular, aunque esta condición por sí sola no sea suficiente. Esto significa que el adhesivo y la imprimación previa, si existe, deben extenderse por el sólido a unir, desplazando en su movimiento al aire e impurezas que pueda haber sobre la superficie.

Para que un adhesivo consiga esto, debe cumplir las siguientes condiciones:

- El líquido debe tener un ángulo de contacto cero o próximo a cero.
- Durante la aplicación del adhesivo, este debe tener una viscosidad baja.
- Debe unirse al sustrato a una velocidad adecuada, de forma que no queden atrapadas bolsas de aire.

En el estudio del contacto entre superficies, se deben tener en cuenta consideraciones de origen termodinámico, energías libres superficiales, cinéticas de humectación y se debe seguir un procedimiento de unión adecuado.

3.2.1. Tensión superficial

La tensión superficial es una medida de las fuerzas moleculares. La tensión en una capa superficial es la resultante de la fuerza de atracción que ejerce el material en su conjunto sobre dicha capa, lo que tiende a reducir el número de moléculas en la superficie.

La capa superficial al no tener moléculas por encima de ella, tiene una resultante de fuerzas no nula, lo que da lugar a una tensión superficial o su equivalente en energía libre superficial.

Estas fuerzas de atracción molecular son principalmente fuerzas de Van der Waals, las cuales son debidas a fuerzas de dispersión por movimientos de los electrones internos y a fuerzas polares debidas a orientaciones permanentes de dipolos. Otro tipo de fuerzas que pueden intervenir, son los enlaces puente de hidrógeno formados entre una molécula de hidrógeno y otra molécula fuertemente electronegativa.

3.2.2. Proceso de humectación

El grado de humectación producido por un líquido sobre una superficie se puede cuantificar a través de una gota depositada sobre dicha superficie como se muestra en la *figura 2.10*. En dicha figura se denota el equilibrio de fuerzas en el punto de contacto de las tres fases: aire, líquido y vapor.

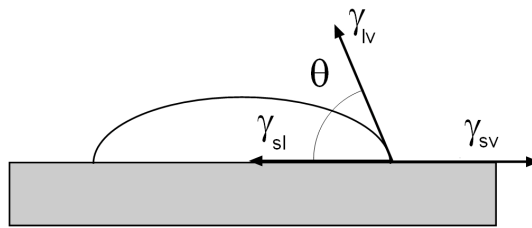


Figura.2.10. Equilibrio de una gota sobre una superficie

La ecuación de Young plantea el equilibrio de estas tres fuerzas teniendo en cuenta que su suma debe ser cero para que el sistema esté en equilibrio.

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde los subíndices sv , sl , lv , denotan los contactos sólido-vapor, sólido-líquido y líquido-vapor. El término γ_{sv} representa la energía libre superficial del sustrato resultante de la adsorción del vapor procedente del líquido, siendo considerablemente más baja que la del sólido en vacío γ_s .

Esta reducción en el valor de la energía libre superficial del sustrato cuando se recubre por una capa de vapor se define por el concepto de presión de equilibrio de recubrimiento Π_s , de tal forma que cuando el vapor obedece a la ley de los gases ideales¹⁵, tenemos:

$$\Pi_s = \gamma_s - \gamma_{sv} = RT \int_0^{p_0} \Gamma d(\ln(p)) \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde p es la presión de vapor, p_0 es la presión de equilibrio del vapor, R es la constante de los gases, T la temperatura absoluta y Γ es la concentración superficial de vapor absorbido. Así la ecuación anterior puede describirse como:

$$\gamma_s = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta + \Pi_s \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Cuando $\theta > 0^\circ$, el líquido no cubre totalmente el sólido, pero si $\theta = 0^\circ$ el líquido cubre toda la superficie de forma espontánea, dependiendo la velocidad de la viscosidad y la rugosidad superficial.

Así en el caso de que el recubrimiento sea espontáneo:

$$\gamma_{sv} \geq \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

$$\gamma_s \geq \gamma_{sl} + \gamma_{lv} + \Pi_s \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Este criterio puede ser expresado también definiendo un parámetro denominado coeficiente de recubrimiento en equilibrio S :

$$S = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} - \gamma_{lv} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

O alternativamente:

$$S = \gamma_s - \gamma_{sl} - \gamma_{lv} - \Pi_s \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Así un líquido se extenderá espontáneamente sobre una superficie cuando $S \geq 0$.

Se ha demostrado que la rugosidad puede cambiar el ángulo de contacto aparente¹⁶.

3.3. Factores de degradación de las uniones adhesivas

Además del estado tensional al que está sometida, los principales factores de degradación de una unión adhesiva son la humedad y la temperatura, resultando una mayor degradación cuando estos dos factores operan de manera conjunta.

3.3.1. Degradación por causa de la humedad

El agua es una molécula altamente polar que es permeable para la mayoría de los polímeros. Cuando las uniones adhesivas están expuestas a ambientes húmedos, las moléculas de agua son absorbidas por difusión a través del adhesivo (y raras veces a través de la intercara), dirigiéndose preferentemente hacia la región de la intercara, en donde el agua desplaza al adhesivo de la superficie del adherente. Este desplazamiento se ve aumentado por la existencia de microgrietas o zonas despegadas de la superficie que se originan por un pobre mojado del adhesivo en el momento de ejecución de la unión.

Aunque el agua actúa como plastificante para el polímero, se cree que es el deterioro de la intercara adhesivo-adherente lo que causa la reducción de la resistencia mecánica de la unión.

a) Difusión del agua en los polímeros:

Existen numerosos estudios acerca de la absorción de agua en adhesivos^{17, 18, 19, 20}. La molécula de agua es relativamente pequeña y en estado líquido está fuertemente asociada a través de enlaces de hidrógeno. La entalpía de formación del enlace de hidrógeno está entre 14,2 y 27,6 kJ/mol; esto hace que se puedan formar enlaces fuertes y localizados entre las moléculas de agua y los grupos polares de los polímeros.

La velocidad de difusión del agua en los polímeros es un fenómeno típicamente "no Fickiano", donde el coeficiente de difusión D no es constante y depende fuertemente de la concentración acuosa y del espesor de la unión adhesiva.

La velocidad de penetración del agua en el polímero se ve incrementada por varios factores: aumento de la temperatura, presencia de tensiones internas y externas, y dilatación de las piezas.

En la *tabla 2.6* se muestran algunos valores del coeficiente de permeabilidad p y la constante de difusión D en agua para algunos polímeros. El coeficiente de permeabilidad, p , se define como la cantidad de vapor en cm^3 que atraviesa una sección transversal de 1 cm^2 con espesor de 1 cm en un segundo, con una diferencia de presión de 1 cm Hg a lo largo del polímero.

El factor p está gobernado por el producto de D y la solubilidad S del polímero en agua. Como se puede apreciar en la *tabla 2.6* los polímeros epoxi y fenólicos muestran bajas velocidades de difusión, siendo adhesivos muy utilizados en aplicaciones estructurales, cada uno en su campo de aplicación.

Polímero	T (°C)	$p \times 10^{-9}$	$D \times 10^{-9}$
Fenólico	25	166	0.2-10
Epoxi	25	10-40	2-8
Polimetil metacrilato	50	250	130
Polietileno (LD)	25	9	230
Poliestireno	25	97	-----

Tabla 2.6. Coeficiente de permeabilidad (p) y constante de difusión (D) del agua en varios polímeros.

b) Agua líquida y vapor de agua:

Un ambiente húmedo puede consistir en agua líquida o vapor de agua a distintas humedades relativas. Al 100% de humedad relativa, el potencial químico del vapor es el mismo que el del líquido, por lo tanto, la absorción, difusión y equilibrio de humedad serán los mismos que en el caso de agua líquida.

Sin embargo, a presiones parciales de humedades relativas menores del 100%, la cantidad de humedad en equilibrio dentro del adhesivo es mucho menor que en el caso de agua líquida. Por otra parte, si la difusividad depende de la concentración, debido a que el coeficiente de difusión aumenta con la concentración, un ambiente con humedad relativa más baja produce una cinética de absorción también más baja.

La cantidad de agua en equilibrio se ve reducida al aumentar el grado de entrecruzamiento en el polímero como, por ejemplo, con mayor tiempo de curado.

c) Concentración crítica de agua:

Existe una concentración crítica de agua por debajo de la cual no se produce daño en el adhesivo. Por ejemplo para un adhesivo de base epoxi, esta concentración está estimada en un 1,35% en peso. Así exponiendo una unión metal-epoxi a humedades relativas por debajo de 50% y 60 °C no se causa daño permanente en la unión.

Así como en un ambiente seco, el fallo de la unión se produce normalmente por rotura cohesiva en el adhesivo, sin embargo, periodos prolongados en ambientes húmedos hace que el fallo sea produzca en la intercara adhesivo-sustrato (rotura adhesiva). Toda pérdida en la resistencia mecánica de la unión por absorción de agua puede ser recuperada secando la unión siempre que el agua en equilibrio dentro de la unión estuviese por debajo de la concentración crítica.

3.3.2. Degradación por causa de la temperatura

Temperatura de transición vítrea:

Todos los polímeros tienen una temperatura de transición vítrea que es una propiedad de la fase amorfa. Si elevamos la temperatura hasta fundir un polímero amorfo, los enlaces intermoleculares se rompen con lo que las cadenas lineales pueden deslizarse unas sobre otras fácilmente.

Al disminuir la temperatura, se empiezan a formar enlaces, con lo que la movilidad de las macromoléculas va disminuyendo. Si seguimos disminuyendo la temperatura, se habrán formado ya multitud de enlaces intermoleculares y se habrá producido una contracción en volumen por enfriamiento, con lo que las cadenas moleculares, ahora muy próximas entre sí y con numerosos enlaces entre ellas, quedan atrapadas en posiciones fijas y sin posibilidad de movimiento; se ha entrado en la fase vítrea y a la temperatura a la que sucede este fenómeno se la denomina temperatura de transición vítrea.

Este brusco cambio estructural provoca alteraciones importantes en el comportamiento mecánico como se puede apreciar en la *figura 2.11*. A altas temperaturas están rotos todos los enlaces intermoleculares con lo que el polímero se comporta como un fluido viscoso. Al enfriar el polímero, se forman algunos enlaces intermoleculares con lo que el material se comporta como un elastómero.

Al disminuir más la temperatura, se irán formando cada vez más enlaces, con lo que los movimientos de las cadenas se dificultan y el módulo elástico aumentará cada vez más. Al llegar a la temperatura de transición vítrea, se produce un cambio brusco de comportamiento ya que todos los movimientos están impedidos, con lo que el material sólo permite pequeñas deformaciones elásticas y se hace muy frágil, ya que su estructura desordenada y rígida, no permite liberar energía en forma de deformación plástica.

La temperatura de transición vítrea está asociada con la composición y estructura de las cadenas moleculares del polímero. Así un polímero con cadenas cortas, no presentará zonas de comportamiento elastómero ya que una vez sobrepasada la temperatura de transición vítrea, comenzará a fluir de manera viscosa.

La temperatura de transición vítrea también está asociada a la flexibilidad de las cadenas, ya que cuanto mayor sea ésta, mayores serán las posibilidades de movimiento entre las cadenas, y por tanto, la T_g se presentará a temperaturas más bajas.

En la flexibilidad de las cadenas influye el tamaño y simetría de los grupos laterales. Cuanto más pequeños y simétricos sean éstos, la flexibilidad de las cadenas aumentará y la T_g disminuirá.

También influye en la T_g las fuerzas intermoleculares, ya que cuanto más fuertes sean los enlaces y mayor sea el número de ellos, más difícil será el movimiento y la T_g aumentará. Por ejemplo las estructuras reticuladas presentarán una T_g muy alta y se degradarán directamente una vez sobrepasada ésta sin presentar una movilidad progresiva.

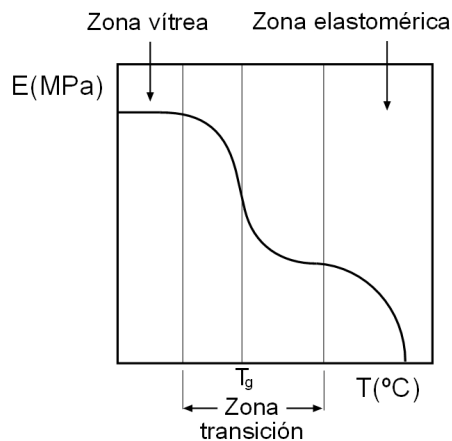


Figura 2.11. Variación del módulo elástico con la temperatura.

Además de la T_g , existen otras temperaturas de transición secundarias por debajo de ella ya que cuando la cadena principal queda bloqueada, otros grupos laterales aún pueden tener energía suficiente para realizar pequeños movimientos.

Existen adhesivos que trabajan en la fase vítrea y otros en la elástica. Los epoxis, fenólicos y acrílicos son ejemplos de adhesivos en fase vítrea. Los adhesivos de base elástica, por ejemplo, trabajan en fase elástico. Sin embargo, es inaceptable que un adhesivo tenga su temperatura de transición vítrea en las inmediaciones de la temperatura de trabajo, debido al brusco cambio que pueden sufrir las propiedades mecánicas al variar unos pocos grados la temperatura exterior.

Otra temperatura característica de los materiales es su punto de fusión, sin embargo, la mayoría de los polímeros utilizados como adhesivos son amorfos y por lo tanto no tienen un punto de fusión característico salvo algunas excepciones como son el polivinil alcohol, usado en algunos tipos de adhesivos, y los adhesivos basados en copolímeros de etileno y poliamidas.

Degradación térmica de los adhesivos:

a) Despolimerización:

Para que un adhesivo sufra una despolimerización tienen que darse dos condiciones. La primera es que la temperatura sea superior a una temperatura *umbral* del polímero y la segunda es que debe estar presente algún mecanismo activador de la despolimerización.

Cuando un adhesivo reactivo cura, el calor de polimerización debe ser eliminado. Si el curado es lento permitiendo al calor generado evolucionar fuera del adhesivo, el proceso será isoterma. Un curado rápido puede dar lugar a una elevación de la temperatura pudiendo dañarse el adhesivo.

b) Degradación oxidativa:

El oxígeno atmosférico ataca generalmente a los polímeros. La mayoría de los polímeros necesitan aditivos estabilizadores aún a temperatura ambiente. Ejemplos de polímeros que utilizan antioxidantes son los basados en elastómeros naturales o sintéticos y los sensibles a presión.

Aunque la mayoría de los polímeros se degradan a temperaturas elevadas en ausencia de aire, la velocidad de degradación se ve incrementada en presencia de oxígeno. En las uniones adhesivas, la entrada de oxígeno depende de la permeabilidad del adhesivo y adherentes y de la distancia que el oxígeno debe difundir en cada uno de los casos.

Los adherentes metálicos, cerámicos y vidrios, son impermeables al oxígeno y por lo tanto presentan una barrera completa a la penetración del mismo, pero los compuestos de matriz polimérica son permeables a los gases atmosféricos. Sin embargo la permeabilidad de los adhesivos a temperaturas altas es suficiente como para que los adherentes impermeables al oxígeno sólo puedan ofrecer una pequeña protección.

El oxígeno es un diradical por lo que puede participar en las reacciones de polimerización y degradación actuando como un iniciador. El oxígeno absorbido por el polímero forma hidroperóxidos que se descomponen para dar radicales que inician la degradación.

En presencia de antioxidantes, hay un periodo largo de inducción en el que estos compuestos eliminan los radicales libres. El final del periodo de inducción está marcado por el momento en el que el antioxidante se consume por completo. Los productos resultantes de la degradación del polímero pueden ser un monómero, volátiles o un polímero modificado.

Los polímeros se ven también atacados por la radiación UVA. La combinación de radiación UVA y oxígeno es particularmente dañina.

3.3.3. Degradación por el efecto conjunto de humedad y temperatura

La interacción de la temperatura y la humedad causa una degradación mayor que la atribuida a cada una de ellas por separado. El efecto más crítico de la acción conjunta temperatura-humedad es la difusión de las moléculas de agua dentro del adhesivo.

La dependencia de los mecanismos de difusión con la temperatura es muy compleja en polímeros ya que se superponen numerosos mecanismos como es la dependencia de la difusión con la concentración (Ley de Fick), dependencia del coeficiente de difusión con la temperatura, relajación del polímero, temperatura de transición vítrea, etc. Dependiendo de la temperatura, unos mecanismos pueden prevalecer sobre otros. En condiciones normales de operación, la mayoría de los adhesivos muestran un mecanismo gobernado normalmente por relajación. Este mecanismo es debido al fenómeno de relajación del polímero y no es dependiente de la concentración de humedad.

El mecanismo de difusión dependiente de la concentración se denomina Fickiano. La velocidad de difusión es mayor en esta última región que en la zona gobernada por fenómenos de relajación.

Debido a que los ensayos acelerados de vida en servicio de un adhesivo obligan a realizar dicho ensayo a una temperatura superior a la de servicio, existe el peligro de pasar de un mecanismo basado en la relajación del polímero a un mecanismo Fickiano a través de una zona denominada anómala. En esta última zona coexisten los dos mecanismos: dependiente de la concentración y

dependiente de la relajación. Esta zona es muy estrecha y el polímero pasa rápidamente de relajación a la Fickiana.

3.4. Adhesivos para paneles sándwich

Para la fabricación de los paneles sándwich cuyo núcleo es una plancha de espuma rígida adherida a las pieles (y no espumada sobre ellas) se emplean uno de estos dos tipos diferentes de adhesivos:

El primer tipo son los basados en disolventes y se aplican a ambas superficies por medio de un sistema de spray o de aplicador. Tras un breve periodo de tiempo de secado, las superficies son presionadas una contra otra. Los adhesivos más apropiados tienen una buena capacidad de adherencia inicial y el tiempo de endurecido puede ser acortado mediante la aplicación de una cierta temperatura. Estos adhesivos ofrecen la ventaja de su fácil manipulación, pero tienen como desventaja el hecho de que la posición de las capas adheridas no puede ser corregida. Además, han de tomarse precauciones para recoger y neutralizar los disolventes evaporados, cuando se usan grandes cantidades.

El segundo grupo de adhesivos son los de dos componentes basados en resinas epoxi o poliuretano. Los dos componentes son mezclados in situ y después de un tiempo predeterminado reaccionan repentinamente y endurecen rápidamente. La ventaja de estos adhesivos está en la posibilidad de corregir la posición una vez contactadas las superficies. La desventaja está en que necesitan ser sujetos en posición bajo presión durante cierto tiempo.

3.4.1. Adhesivos de poliuretano

Los adhesivos más empleados para unir las caras al núcleo son los de poliuretano de uno o dos componentes.²¹ Los de un componente son realmente adhesivos de dos componentes preactivados que continúan con el curado cuando se exponen a la humedad. Necesitan de una niebla de agua, que se añade en spray sobre la capa de sándwich, para continuar con el curado. Normalmente el tiempo de prensado es de menos de una hora, pero se puede reducir por debajo de los 20 minutos si se precalientan las caras. La cantidad de adhesivo que se dispone en cada uno de los dos lados de la adhesión suele estar comprendido entre 200 y 350

g/m^2 , y se aplican generalmente en estado líquido, que es la manera más sencilla de incorporarlo a un proceso de fabricación automatizado.

En el panel sándwich que se fabrica adhiriendo las distintas capas que lo componen, cuando se adhiere la piel y el núcleo, el adhesivo penetra en el material de éste y el resultado es una zona de adhesión que contiene una mezcla de adhesivo y material del núcleo. Es esencial que se emplee la cantidad correcta de adhesivo (y de cualesquiera otros materiales tales como agua, que pueden ser necesarios para el proceso de curado) y también que sea curado correctamente de acuerdo a las instrucciones del fabricante.

Así mismo, es muy importante conseguir un enlace entre el núcleo y las caras que tenga suficiente resistencia a tracción, ya que al flexionar el panel, el núcleo y la cara de la zona cóncava están en tensión. En general la resistencia a tracción de la unión debe ser mayor que la del núcleo mismo, y aunque no se puede dar un límite exacto, diversos estudios indican que un valor de $0,1 \text{ N/mm}^2$ resulta adecuado en paneles típicos⁸. Un enlace más débil sería indicativo de una deficiente calidad de fabricación. Téngase en cuenta que esos valores se aceptan únicamente como valores indicativos y para el caso de condiciones de temperatura ambiente. A temperaturas más altas, las espumas rígidas plásticas tienden a reblandecer y a comportarse viscoelásticamente, mientras que a temperaturas bajas se vuelven más frágiles, rígidas y fuertes. Por lo tanto habría que buscar o determinar los valores apropiados para otras condiciones de temperatura de trabajo si así se necesitase.

3.4.2. Adhesivos de poliuretano monocomponente de curado por humedad

Este tipo de adhesivos, utilizado en los paneles sándwich empleados en este trabajo, empezó a aplicarse en Europa en estructuras de madera con capacidad portante inicialmente en Suiza a principios de la década de 1970.

Se fue incrementando su uso a lo largo de la década siguiente debido a los prometedores resultados alcanzados; entre sus ventajas destaca el hecho de que el producto está listo para ser empleado sin que el usuario haya de realizar la tarea del mezclado previo a la aplicación, y además su composición está libre de formaldehído.

Propiedades mecánicas a largo plazo:

En el caso concreto del adhesivo de poliuretano empleado en el panel sándwich objeto de este trabajo, éste se aplica directamente sobre una de las dos superficies a adherir, preferiblemente con la superficie previamente impregnada suavemente con agua ya que reacciona en presencia de humedad, tiene un curado a temperatura ambiente y requiere de una aplicación de presión. Tiene la capacidad de cubrir huecos existentes en el material, presentando buen comportamiento mecánico en ellos. Presenta alta resistencia en ambientes secos y húmedos, pero una resistencia limitada cuando sufre ciclos repetidos de humectación y secado. Suele usarse como adhesivo de construcción para sistemas de suelo y muro, para unir tablero contrachapado a tableros tanto metálicos como plásticos, y da buen resultado para unir elementos laminados y en la adhesión de tableros de yeso⁹.

A consecuencia de este incremento en el uso se comenzó a estudiar en Alemania la idoneidad de estos adhesivos para la fabricación de estructuras de madera con capacidad portante estructural, hasta que a finales de la década de 1980 los primeros borradores de normativa surgieron en el Instituto Otto Graf (primer laboratorio de ensayo alemán autorizado para la comprobación de adhesivos de uso en estructuras de madera con capacidad portante).

Vistos los satisfactorios resultados de comportamiento a corto plazo en cuanto a la fabricación de estructuras portantes de madera, Borimir²² realizó un laborioso plan de comprobaciones sobre diversos adhesivos de poliuretano monocomponente de curado por humedad, para la unión de partes de madera. Un grupo de probetas de tracción hechas con madera de haya adherida se dispuso en condiciones de almacén abierto sujetas a una tensión perpendicular a la capa de adhesivo de 1 N/mm^2 durante 3 años. Periódicamente se extraían grupos de probetas que, tras el re-aclimatado, se ensayaban. Los registros climáticos realizados indicaron que las probetas habían estado sometidas a una variación de la temperatura de -10°C a $+45^\circ\text{C}$ y a una variación de la humedad del 20 al 100%, con diferencias diarias de hasta 16°C y 70% HR. Como grupo de control se emplearon probetas de madera de haya sin junta adhesiva.

Las conclusiones tras 3 años de ensayo mostraron que la disminución de la resistencia a tracción transversal de las probetas unidas con los adhesivos de poliuretano era más pequeña incluso que la disminución en resistencia de las probetas sin junta adhesiva.

En un segundo ensayo de más largo plazo se mantuvo a flexión, y bajo carga permanente de 2800 kg, un montaje consistente en una viga de madera laminada con adhesivo PUR mono componente. De esta manera se dispusieron hasta seis vigas, cuatro de ellas incluyendo dos adhesivos PUR mono componente de curado por humedad y otras dos vigas de referencia con un adhesivo PRF de comportamiento reconocido y aprobado para la unión de estructuras de madera con responsabilidad portante. Las vigas se mantuvieron bajo carga permanente, en la disposición que puede verse en la *figura 2.12*, en un almacén abierto lateralmente.

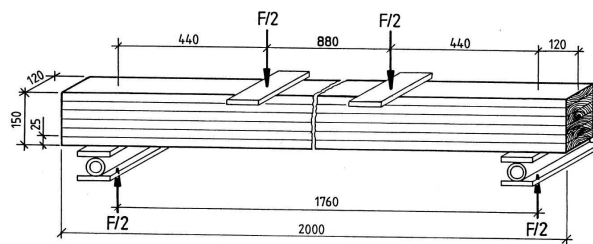


Figura 2.12. Disposición del ensayo de flexión bajo carga permanente

La flexión máxima era de 14 N/mm^2 y la tensión de cortadura de $1,2 \text{ N/mm}^2$, valores que se corresponden con los máximos niveles de tensión permitidos para vigas laminadas de resistencia de clase BS 14 según DIN 1052. Tras la aplicación de la carga permanente, se midió el incremento de la deflexión a intervalos regulares. En lo que respecta a los registros de las condiciones climáticas, las temperaturas alcanzadas en el almacén estuvieron comprendidas entre -11 y $+32^\circ\text{C}$, mientras que la humedad relativa varió entre el 15 y el 100%.

Se calcularon los factores f_t/f_0 de cada viga, siendo f_0 la deflexión medida al comienzo de la carga y f_t la deflexión correspondiente al tiempo transcurrido t . Este factor así determinado describe el incremento de la deflexión con el tiempo, esto es, la fluencia de la viga ensayada. La *tabla 2.7* muestra el factor f_t/f_0 para cada viga en función de la duración del ensayo. Asimismo se puede representar el factor $k_{def} = (f_t/f_0 - 1)$ gráficamente como se ve en la *figura 2.13* durante ese periodo de 10 años.

Viga nº	1	2	3	4	5	6
Adhesivo	Adhesivo 1	Adhesivo 1	Adhesivo 2	Adhesivo 2	Adhesivo PRF	Adhesivo PRF
Deflexión inicial	4,4	5,0	5,0	4,6	4,6	4,8
$f_{52 \text{ semanas}}/f_0$	1,52	1,40	1,34	1,37	1,41	1,35
$f_{104 \text{ semanas}}/f_0$	1,59	1,50	1,40	1,39	1,48	1,46
$f_{156 \text{ semanas}}/f_0$	1,64	1,52	1,44	1,43	1,52	1,48
$f_{208 \text{ semanas}}/f_0$	1,68	1,58	1,46	1,48	1,56	1,50
$f_{262 \text{ semanas}}/f_0$	1,73	1,64	1,50	1,54	1,59	1,52
$f_{310 \text{ semanas}}/f_0$	1,75	1,68	1,52	1,57	1,61	1,56
$f_{362 \text{ semanas}}/f_0$	1,80	1,70	1,56	1,59	1,61	1,56
$f_{415 \text{ semanas}}/f_0$	1,80	1,69	1,55	1,53	1,63	1,56
$f_{467 \text{ semanas}}/f_0$	1,81	1,71	1,55	1,54	1,64	1,56
$f_{523 \text{ semanas}}/f_0$	1,82	1,70	1,56	1,54	1,64	1,56

Tabla 2.7. Factor f_t/f_0 en función del tiempo

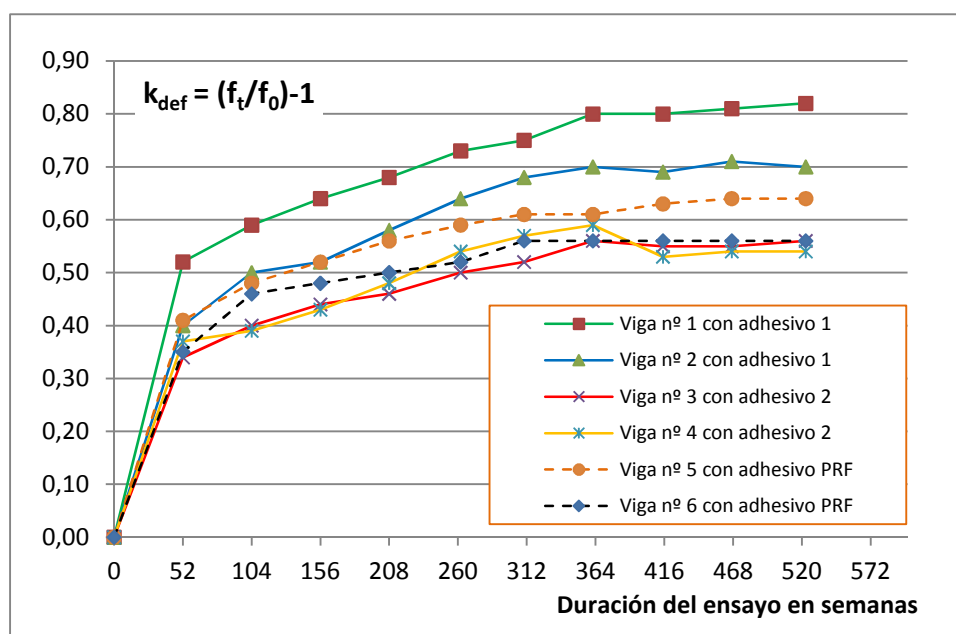


Figura 2.13. Factores de deformación k_{def} sobre las vigas durante el periodo de ensayo de 10 años

Como se puede observar, los valores para los factores de deformación k_{def} después del periodo de carga de diez años son 0,82 y 0,70 para las dos vigas unidas con el adhesivo 1; y son 0,56 y

0,54 para las dos vigas unidas con el adhesivo 2, y 0,64 y 0,56 para las dos vigas unidas con el adhesivo PRF.

La norma DIN 1052 fija un factor de deformación k_{def} de 0,8 para las vigas laminadas en el cálculo de la deformación final para el uso en condiciones de servicio, clase dos y bajo carga permanente. Después de un periodo de carga de diez años, cinco de las seis vigas estaban significativamente por debajo de este valor, uno de las dos vigas unidas con adhesivo 1 fue insignificamente mayor que este valor con $k_{def}=0,82$.

La conclusión de los ensayos realizados, especialmente del ensayo con vigas de madera laminada bajo cargas permanentes durante más de 10 años, mostró que los elementos estructurales unidos con adhesivos de poliuretano de un componente que curan por humedad, trabajaban satisfactoriamente bajo cargas de largo plazo con la máxima carga de diseño permisible. Esto es así, siempre que los fabricantes sigan las instrucciones de manipulación y tengan en cuenta las propiedades de estos adhesivos, especialmente en lo relativo a su reactividad ante la humedad; se comprobó que el espesor máximo de unión adhesiva que debería disponerse en la junta es de 0,3 mm.

Evolución de la cuota de mercado

La cuota de mercado de los adhesivos de poliuretano mono componente de curado por humedad, respecto al total de los adhesivos usados en la producción de estructuras de madera con capacidad portante, ha ido creciendo en los últimos años²². Como referencia, en Alemania en el año 2003 había unas 170 empresas autorizadas para la fabricación de estructuras de madera hechas con unión adhesiva y con capacidad portante.

La *tabla 2.8* muestra la relación de adhesivos de probada idoneidad para su uso en la fabricación de estructuras de madera con capacidad portante. En total se han probado 80 adhesivos de los cuales 46 son adhesivos PRF, 13 son adhesivos basados en melanina, 9 son adhesivos UF, 9 son adhesivos de poliuretano mono componente y 3 son adhesivos para aplicaciones especiales.

No obstante hay una gran cantidad de adhesivos de PRF ensayados y aprobados que tienen una cuota de mercado nula o muy baja. Existe una tendencia a reemplazar los adhesivos PRF

por los adhesivos de melamina, siendo utilizados aquellos casi en exclusiva por las compañías que producen vigas de madera laminada con un certificado A (y no por las que fabrican con certificado B).

En lo que respecta a la producción de elementos de madera machihembrados con juntas tipo finger-jointed, se está incrementando significativamente el uso de los poliuretanos mono componente de curado por humedad, mientras que los adhesivos de PRF y UF están totalmente ausentes de la producción de este grupo de productos.

Tipo de adhesivo	Resinas Fenol-resorcinol ⁽²⁾	Resinas melamina MF/MUF ⁽²⁾	Adhesivos PUR mono componente ^{(2), (4)}	Resinas de urea UF ⁽³⁾	Adhesivos aprobados para aplicaciones especiales en construcción	Total
Numero de adhesivos ensayados ⁽¹⁾	46	13	9	9	3	80

Tabla 2.8. Numero de adhesivos ensayados exitosamente, divididos por el tipo de adhesivo (datos de Alemania en 2003). Notas: (1) Resinas ensayadas, algunas resinas son ensayadas y aprobadas con diferentes endurecedores o proporciones diferentes de endurecedor. (2) Para uso en condiciones de interior y de exterior. (3) Para uso en condiciones de interior. (4) Línea de encolado de espesor máximo 0,3 mm.

3.5. Calidad en la realización de las uniones adhesivas

El éxito de una adhesión no solo está relacionado con la naturaleza de los materiales que la forman y con el adhesivo empleado, sino que implica otros factores.

Contenido de humedad:

Inmediatamente después de una adecuada selección del adhesivo el segundo factor más importante es el control del contenido en humedad de la madera y elementos derivados de la misma antes y durante el proceso del curado, ya que afecta a la resistencia y durabilidad final de la junta. La madera no debe adherirse cuando tiene un alto contenido de humedad a menos que también vaya a tenerlo cuando esté en servicio; por lo general debería estar lo suficientemente seca para que, incluso si se añade agua durante el proceso de adhesión, el contenido en humedad sea de un nivel similar al esperado durante la vida en servicio del conjunto adherido.

Durante el curado, la madera absorbe humedad contenida en el adhesivo y a causa de ello hincha. Posteriormente la humedad se va evaporando y también se va distribuyendo más uniformemente en el resto de la madera. Los cambios en el contenido de humedad conllevan variaciones dimensionales (hinchado o merma) que pueden inducir tensiones, sobre todo cuando la cantidad de agua implicada (por ejemplo, contenida en el propio adhesivo) es alta. Estas tensiones debilitan la madera y la junta.

Algunos de estos problemas se pueden atenuar si tras el proceso de adhesión las piezas se acondicionan higrotérmicamente de manera apropiada antes de llevar a cabo ensamblados, mecanizados o encajados posteriores y también antes de la disposición final en las condiciones de servicio en las que se va a encontrar la pieza.

Preparación de la superficie:

En lo que respecta a la preparación de la superficie, ésta debe estar libre de todo material que interfiera con la formación de la unión. Aparte de esto hay ciertamente una amplia variedad de acabados superficiales que dan buen resultado para los diferentes tipos de adhesivos que se pueden utilizar, tales como acabados producidos por serrado, acabados hechos con herramientas abrasivas, y otros.

Disposición del adhesivo sobre la superficie:

En cuanto a la manera de disponer el adhesivo sobre la superficie, habrá de distribuirse de tal manera y en tal cantidad que cuando se someta a presión una superficie contra otra en el momento de proceder al curado, fluya en una capa uniforme y delgada. La cantidad de adhesivo a aplicar depende de la madera y de la naturaleza de los otros materiales a unir, del contenido en humedad, del tipo de adhesivo, de las condiciones ambientales donde se realice el proceso, del tiempo de curado y de si el adhesivo tiene que aplicarse en una o en dos de las superficies. Para la distribución del adhesivo existe una amplia variedad de métodos desde los más manuales a los más automatizados.

Consistencia del adhesivo y presión:

Tras la aplicación del adhesivo, y antes de someter la junta al prensado, ha de efectuarse un control de la consistencia del adhesivo ya dispuesto sobre el material. Ha de llegarse a un

delicado equilibrio entre la consistencia del adhesivo y la presión a la que hay que someter a la junta mientras cura, tal como ilustra la *figura 2.14*. La consistencia del adhesivo afecta al mojado, al flujo, a la penetración y es un factor que depende del tipo de adhesivo, tipo y porcentaje de disolvente, tiempo que tiene la mezcla adhesiva, cantidad de adhesivo, tipo y características de la madera y condiciones ambientales presentes.

La presión sirve para varios propósitos, expulsa el aire, pone el adhesivo en contacto molecular con las superficies a adherir, fuerza al adhesivo a penetrar en la estructura de la superficie lo que acentúa la efectividad del efecto de unión mecánica del mismo. Así mismo expande el adhesivo en una película continua y delgada y mantiene el montaje en posición mientras el adhesivo cura. No obstante si la presión es muy alta el adhesivo puede penetrar en exceso en las superficies porosas lo que genera juntas escasas de adhesivo que resultan de baja resistencia. Las juntas más fuertes se obtienen cuando la consistencia del adhesivo permite el uso de altas presiones (relativamente) que son consistentes con las presiones que se recomiendan para esa densidad de la madera. Así, las maderas de baja densidad obtienen buenos resultados con presiones del orden de 700 kPa, mientras que las maderas de alta densidad requieren presiones de hasta 1700 kPa.

Las superficies planas de acabado suave y poca área pueden unirse satisfactoriamente a presiones más bajas, sin embargo debido a que la presión alta tiende a introducir el adhesivo dentro de la madera o a expulsarlo fuera de la junta, las maderas más densas requieren de adhesivos de mayor consistencia. Esa mayor consistencia puede conseguirse dando más tiempo al montaje, lo que permite incrementar la absorción del disolvente líquido por parte de la madera y también su evaporación en el aire. No obstante ha de procederse con cuidado para asegurar que el tiempo de montaje no sea excesivo.

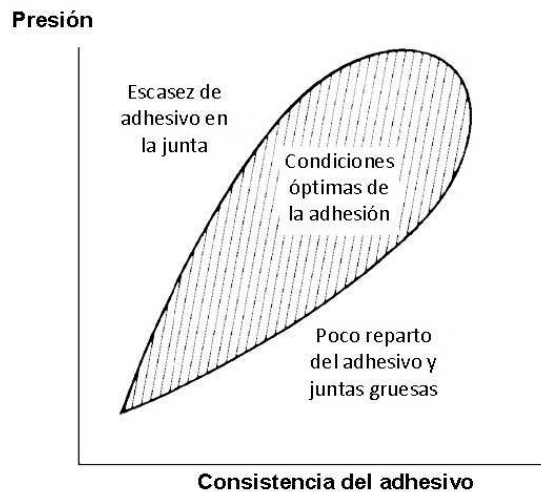


Figura 2.14. Relación entre la consistencia del adhesivo y la presión durante el curado en lo que respecta al resultado de la unión en un adhesivo termoestable

Se ha observado que las líneas de encolado de los adhesivos estructurales que soportan las más altas tensiones de carga mecánica están, generalmente, dentro del rango de 0,076 a 0,152 mm de espesor de línea⁹. Por debajo de estos espesores las líneas de encolado son demasiado delgadas para transferir con efectividad las tensiones de una pieza adherente a otra, especialmente las tensiones debidas a cambios dimensionales inducidos por la humedad. Por encima de ese rango la resistencia se debilita según se va incrementando el espesor de la capa de adhesivo.

3.6. Ensayos de comportamiento de las uniones adhesivas

Hay una gran variedad de métodos disponibles para ensayar uniones adhesivas. Generalmente estos métodos intentan predecir cómo las juntas adhesivas van a trabajar en un modo de carga específico: tracción, cortadura, fluencia, en unas condiciones de temperatura y humedad y durante un tiempo especificado. La mayor parte de los ensayos son de corto plazo, que en ocasiones se añaden a ensayos llevados a cabo en campo en un intento de predecir el comportamiento a largo plazo.

3.6.1. Comportamiento en ausencia de degradación ambiental

En lo que respecta a los ensayos mecánicos estos consisten, fundamentalmente, en la medida de la respuesta de la pieza adherida frente a la carga mecánica en términos de los modos en que se pueden aplicar las tensiones a la juntas. Para asegurar la repetibilidad, se realizan una serie de ensayos utilizando el mismo método, materiales específicos, condiciones, etc. Hay cuatro configuraciones básicas que se utilizan para ensayar las uniones adhesivas: tracción, cortadura, ensayo de cuña y pelado.

- La cortadura resulta de aplicar fuerzas paralelamente a la superficie de adhesivo
- La tracción resulta de aplicar fuerzas en sentido perpendicular a la superficie de adhesivo
- El ensayo de cuña resulta al separar la superficie de adhesivo mediante un elemento cuña que ejerce una fuerza tendente a abrir una grieta
- El pelado es el fenómeno generado por fuerzas aplicadas a la superficie de adhesivo que tienden progresivamente a separar un miembro flexible de un miembro rígido o de otro miembro rígido

Por ejemplo las tensiones inducidas por cambios dimensionales debidos a la humedad son combinaciones de esfuerzos de tracción y de cortante con efectos de grieta actuando en los bordes de la junta⁹.

Estos modos se usan con variaciones para determinar niveles de resistencia durante el impacto, fatiga, fluencia bajo cargas aplicadas durante periodos prolongados de tiempo y sobre la flexión.

En lo que respecta al impacto, fatiga y fluencia, son ensayos que tienen más que ver con el ritmo al que se aplican los modos básicos y con variaciones de los mismos. Las cargas de impacto son súbitas y veloces. La fatiga es la perdida de resistencia debido a cargas repetidas y refleja el deterioro de los enlaces adhesivos debido a cuestiones mecánicas. Las cargas de fluencia se aplican estáticamente pero se prolonga su duración durante periodos grandes de tiempo, usualmente en condiciones extremas ambientales.

En cuanto a la flexión, ésta permite realizar diversos análisis. Se puede flectar una viga laminada o un panel sándwich para generar fuerzas de cortadura en la superficie del adhesivo entre laminados. En otro tipo de juntas se pueden aplicar fuerzas de doblado sobre una junta que puede estar en el centro del vano y cuya superficie puede estar orientada perpendicularmente a la dirección del vano.

Para evaluar el comportamiento de la unión adhesiva se observa, sobre todo, el valor de la resistencia y el modo de fallo. Un comportamiento excelente de la unión adhesiva será aquel en el que la resistencia de la misma fuera mayor que la de la propia madera o material que une.

Es habitual que la resistencia de la unión adhesiva se ensaye en cortadura paralela a las fibras de la madera, y dado que la mayoría de los adhesivos recomendados para este material superan en resistencia a cortadura a la propia madera en esta dirección, en muchas ocasiones no se llega a conocer el máximo potencial del adhesivo porque falla antes el sustrato. Hasta tal punto esto es así, que se da por hecho que esto ocurre, y, simplemente los adhesivos que no alcanzan este comportamiento a cortante no se emplean en elementos de madera de uso estructural. Debido a esto, una alta resistencia a cortadura no resulta un indicador suficiente de la durabilidad de un enlace estructural.

Además de los ensayos mecánicos hay una gran variedad de pruebas relacionadas con la química analítica que se pueden llevar a cabo para evaluar el estado del adhesivo en una unión y de las superficies que une. Primeramente la estructura molecular se puede caracterizar por resonancia magnética nuclear tanto en el estado líquido del adhesivo como en el sólido.

También mediante la cromatografía se puede obtener gran cantidad de información. Las propiedades reológicas del curado se pueden caracterizar por el análisis mecánico dinámico.

Por otra parte, la microscopía permite magnificar y analizar las superficies de los adhesivos y de los adherentes; esto incluye la microscopía electrónica de barrido, la de transmisión electrónica, y la microscopía de fuerza atómica. Se puede obtener mucha información de la medida de las propiedades reológicas y químicas de los polímeros constituyentes de los adhesivos.

3.6.2. Comportamiento en presencia de degradación ambiental

En el diseño de una unión adhesiva no sólo hay que tener en cuenta que ésta debe resistir las cargas de diseño que va a soportar la estructura, sino que además esa unión debe comportarse de forma satisfactoria bajo las acciones del medio que la rodea (temperatura, humedad, agua marina, radiación UV, etc.) y durante toda su vida en servicio.

La acción de los fenómenos atmosféricos degrada el adhesivo reduciendo considerablemente su resistencia mecánica con el paso del tiempo, con lo que una unión que inicialmente era capaz de soportar unas determinadas cargas puede, con el paso de los años, dar lugar a una rotura catastrófica.

Actualmente, los mecanismos de actuación de los fenómenos ambientales sobre los adhesivos no están perfectamente determinados. Además, es difícil cuantificar su efecto sobre la resistencia mecánica del adhesivo a largo plazo por la dificultad que entraña simular, mediante ensayos de laboratorio de corta duración, la vida en servicio de un adhesivo, que puede ser de muchos años.

Para poder acortar la duración del ensayo de simulación en servicio, las condiciones de laboratorio deben ser más extremas que las que vaya a soportar el adhesivo en servicio, pero sin llegar a ser muy distintas de las reales ya que se podrían estar recreando situaciones irreales o incluso podrían modificarse los mecanismos de actuación de un determinado agente climático. Así, por ejemplo, una temperatura excesivamente elevada puede producir una degradación del polímero que nunca se daría en la vida real a temperatura ambiente o incluso se podrían estar cambiando los mecanismos de difusión de un fluido a través del adhesivo.

Por otra parte para que los ensayos de laboratorio sean útiles, tendría que ser posible relacionarlos con la degradación en condiciones ambientales reales del mismo adhesivo, lo que llevaría de nuevo a ensayos de muy larga duración (varios años), no habiéndose encontrado hasta el momento ninguna correlación satisfactoria entre ambas situaciones.

Ensayos de corta duración

Existen algunas normas que describen ensayos cortos de envejecimiento como pueden ser: las normas DIN CEN/TS 14999²³, UNE EN 2243-5²⁴, ASTM D 3632²⁵ o ASTM D 1183²⁶ que son usadas para determinar la durabilidad de uniones adhesivas. Consisten normalmente en almacenar las probetas en condiciones constantes de humedad y temperatura.

Estas normas no siempre producen resultados que corresponden con los fallos observados en servicio. A pesar de ello, se ha desarrollado un gran número de normas para diferentes aplicaciones, además de otras especificaciones especializadas según el tipo de industria.

Comparación entre ensayos de corta y larga duración

En un corto periodo de tiempo las propiedades mecánicas de la madera, adhesivos y productos adheridos varían según lo hace el ambiente en el que se encuentran. En general las propiedades disminuyen cuando la humedad y la temperatura son más altas.

Las propiedades de algunos adhesivos termoestables cambian en menor medida que las propiedades de la misma madera que unen. Sin embargo, las propiedades de los adhesivos termoplásticos disminuyen en mayor proporción que las propiedades de la madera que unen, y por tanto ha de estudiarse su comportamiento en seco, tras inmersión en agua y después de una exposición prolongada a ambientes de alta humedad.

En algunos casos también es interesante el ensayo a altas temperaturas como en el caso de elementos que van a estar fuertemente expuestos a radiación solar directa por ir dispuestos en cubiertas. También es interesante evaluar algunas uniones a cambios cíclicos en la humedad y temperatura.

En cuanto al largo plazo, las uniones adhesivas se deterioran a un ritmo en función de la temperatura, humedad, la tensión y también por la presencia de productos químicos y de microorganismos. Un producto durable sería aquel que no muestre una gran pérdida de propiedades durante su vida en servicio en comparación con la madera.

En general se podría exigir a una junta bien diseñada y bien fabricada que mantenga su resistencia indefinidamente si el contenido en humedad de la madera no supera el 15% y la humedad del ambiente entra dentro del rango del confort del ser humano. Sin embargo algunos adhesivos se deterioran cuando se exponen a temperaturas mayores de 38°C de manera intermitente o continua por largos periodos. Las temperaturas bajas parecen no tener un efecto significativo en la resistencia. En la *figura 2.15* se muestran algunos ejemplos de la evolución de la resistencia de diversos adhesivos en función del tiempo.

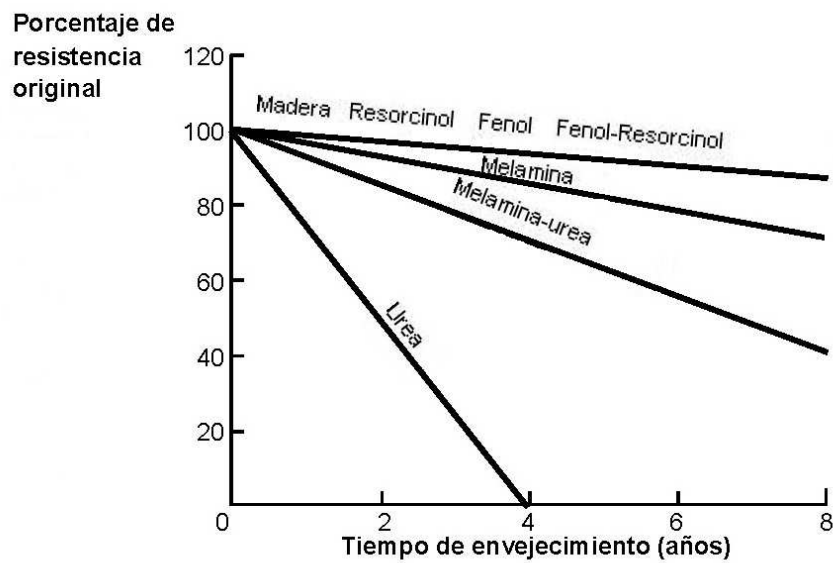


Figura 2.15. Porcentajes relativos de deterioro de la resistencia de la unión en pequeñas probetas expuestas directamente al clima

El poliuretano empleado usualmente en los paneles sándwich de madera con núcleo adherido es suficientemente duradero para ser usado en maderas de las densidades más bajas, incluso en condiciones exteriores, pero limitando su exposición al ambiente exterior.

4. DURABILIDAD DEL PANEL SANDWICH

4.1. Introducción

El tiempo de vida que se le exige a un elemento utilizado en una edificación puede variar de una aplicación a otra. Para edificaciones industriales puede ser suficiente un tiempo de vida de 25 años o menos, ya que se comprende que los cambios en la actividad industrial precisan de frecuentes reconstrucciones. En otros casos el requerimiento puede ser mucho mayor, pudiendo llegar a los 50 años o más.

En un documento²⁷ elevado al CEN para las guías de ETA se trató la propuesta de que el periodo de vida exigible debería ser de 25 años para aquellos productos que se pueden reparar o reemplazar (con cierta laboriosidad) en la mayor parte de las construcciones. Este sería el caso de los paneles sándwich. Para productos que no son reemplazables, el requisito para el producto es el mismo que para el edificio en sí mismo, es decir un rango de 10 a 100 años.

Cuando se desarrollan nuevos materiales estructurales no se pueden esperar 50 años, por ejemplo, para comprobar si tienen un periodo de vida adecuado. Existe una necesidad de encontrar un camino más rápido para estimar ese periodo de vida y por lo tanto resulta necesario predecir la durabilidad en el largo plazo mediante el uso de métodos de envejecimiento acelerado. Es imperativo dar también a los clientes alguna garantía de que la duración de un producto novedoso es la suficiente.

Por lo tanto existe una imperiosa necesidad de disponer de métodos apropiados para predecir y controlar la durabilidad de los elementos estructurales en general y de los paneles sándwich en particular, en especial cuando la experiencia demuestra que en el caso del sándwich la unión adhesiva entre el núcleo y las caras conlleva problemas de durabilidad. Por lo tanto en los últimos años se han desarrollado diversos procedimientos de ensayo o comprobación.

Una aproximación intuitiva a la manera en que se enfoca el problema, ayudándose de los procedimientos de ensayo, se ilustra en la *figura 2.16*.

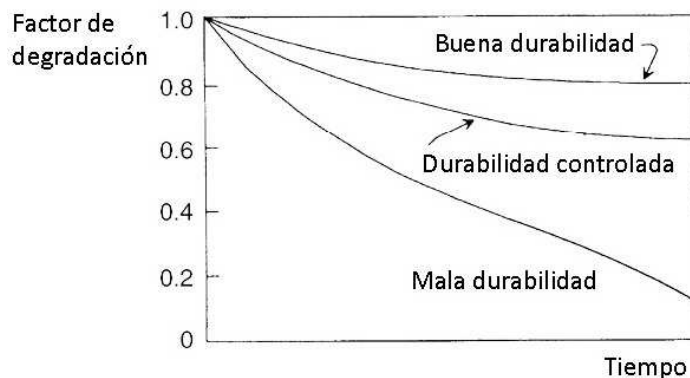


Figura 2.16. Factor de degradación (o factor de durabilidad) y rango de durabilidad en paneles.

El efecto de la degradación progresiva se puede medir mediante la observación de la evolución de la resistencia durante el envejecimiento. La durabilidad, por tanto, se mediría en términos de lo que en ocasiones se denomina *factor de durabilidad*^{28, 29} y en otras ocasiones se llama *factor de degradación*, que se define como la relación entre la resistencia a tracción perpendicular después de envejecimiento con respecto a la resistencia a tracción instantánea sin envejecer.

Ha de resaltarse que entre los paneles de una tipología dada, que se pueden encontrar en el mercado, hay ejemplos de buena durabilidad, durabilidad controlada y también durabilidad mala o inaceptable.

4.2. Predicción del periodo de vida

No existen, en la actualidad, ni métodos ni criterios aceptados que permitan predecir el periodo de vida de un elemento de construcción, pero se pueden hacer ciertos razonamientos teóricos que permiten centrar el problema. En primer lugar podría decirse que un elemento alcanza su límite de durabilidad o por razones mecánicas o no mecánicas.

Límite de durabilidad por razones mecánicas

En un elemento de construcción se plantea una relación antagónica entre su resistencia y la carga que ha de soportar. Sea $S_d(t)$ el valor de diseño de la carga, que será función del tiempo; en el caso del panel sándwich esta carga puede ser una carga permanente o viento, nieve o una combinación de todas ellas. Generalmente los valores de diseño de la nieve o del viento se

estiman considerando un periodo de tiempo de 30 a 50 años, de tal manera que en un tiempo t , la vida que queda al elemento es ese número de años menos t . Entonces, para cargas de origen natural, la carga máxima que se podría esperar que aconteciera decrece según va disminuyendo la vida que le queda al elemento. La carga máxima que se podría esperar es, por lo tanto, menor para un corto periodo de tiempo que para uno largo, de ahí que la curva de S presente un aspecto descendente (ver *figura 2.17*).

Por otra parte sea $R_d(t)$ la resistencia de diseño de la estructura, que será función del tiempo t . Esta resistencia puede verse afectada por el efecto de la carga, por el efecto de factores ambientales como la humedad y la temperatura o por acciones temporales; esto significa que la resistencia también desciende con el tiempo.

Entonces, se alcanzará el límite de durabilidad de un elemento cuando el valor de la acción que sufre el elemento supera a la resistencia, de manera que el elemento ya no es capaz de soportar la carga de diseño, tal como se ilustra en la *figura 2.17*. Matemáticamente este límite se alcanza cuando ya no se cumple la siguiente ecuación

$$Sd(t) \leq Rd(t) \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Si la resistencia R se reduce más rápidamente que la carga S , la vida de la estructura puede llegar a su final por consideraciones de durabilidad mecánica. En la *figura 2.17* el tiempo de vida de la estructura t_l se alcanza cuando $S(t) \geq R(t)$.

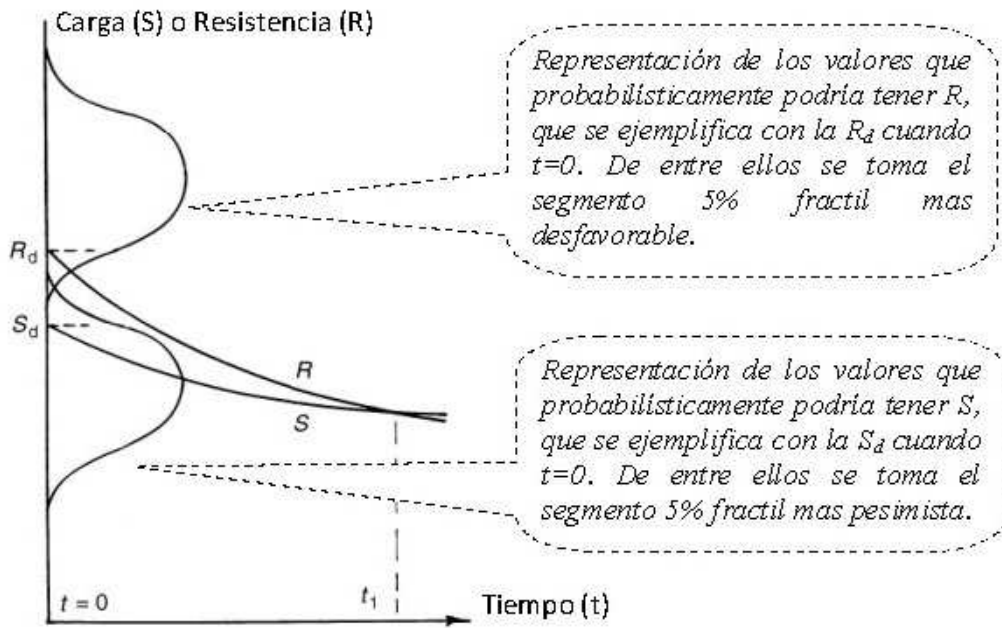


Figura 2.17. Variación de las acciones $S(t)$ y de la resistencia $R(t)$ de un elemento de construcción con el tiempo

Al razonamiento expuesto han de añadirse los pertinentes factores de seguridad; al poner en servicio, en el tiempo $t=0$, el diseño estructural del elemento, hay un estado en el que la resistencia inicial dividida por el factor de seguridad del material γ_M se compara con el valor máximo que se estima que puede alcanzar una acción en un periodo de entre 30 y 50 años.

$$S_d = \gamma_q S_k < R_k / \gamma_M = R_d \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Donde los valores con subíndice k son valores característicos determinados con el 5% valor fractil.

La manera teóricamente correcta de calcular el periodo de vida esperado de una estructura debería ser resolver la ecuación $S_d(t) \leq R_d(t)$, de tal manera que, por ejemplo, una cierta población definida de elementos no cumpla la expresión $S_d = \gamma_q S_k < R_k / \gamma_M = R_d$

Como ejemplo, si esa proporción es del 50% de tal manera que el valor característico es igual a la media, la expresión quedaría así:

$$S_m(t) < R_m(t) \quad (\text{Ec. 2.29})$$

El problema es que no se conoce bien como cambia la resistencia $R(S, t)$ con respecto al tiempo y con respecto a diferentes acciones. Tampoco se conoce con certeza la evolución de las acciones $S(t)$ con respecto al tiempo. Por lo tanto no es posible, actualmente, resolver la ecuación, planteada, de la durabilidad. Lo único que se puede hacer, y así se hace, es tratar de desarrollar y probar métodos de ensayo acelerados de laboratorio y usarlos para estimar una relación entre la resistencia y las acciones de carga.

Los métodos de ensayo acelerado permiten validar elementos de construcción novedosos mediante la comparación con otros elementos tradicionales de reconocido buen funcionamiento de los que hay un conocimiento histórico acumulado. Obviamente estos métodos de ensayo acelerado no deben requerir tiempos excesivamente largos para proporcionar resultados.

Límite de durabilidad por razones no mecánicas

Además de alcanzarse el límite de durabilidad por razones estrictamente mecánicas, no hay que olvidar que también se puede alcanzar ese límite por otras razones: físicas, económicas, culturales u otras: el aislamiento térmico ya no es suficiente, o la protección contra inclemencias del tiempo ya no es adecuada, o el aspecto estético de la estructura se ha vuelto inaceptable.

4.3. Ensayos de envejecimiento acelerado

Envejecimiento acelerado frente a envejecimiento natural

Un ensayo acelerado ideal sería aquel que, evaluando un elemento durante 1 o 2 meses de ensayo, permitiera obtener predicciones de su comportamiento en un ambiente real de servicio a lo largo de los años. Sin embargo, algunos investigadores cuestionan la fiabilidad de los ensayos de envejecimiento acelerado ya que al tratar de imprimir a un material un daño de una manera veloz, éste se ve sometido a acciones que no son realistas. El problema es que no existe alternativa alguna al uso de métodos de envejecimiento acelerado para evaluar la durabilidad que probablemente tenga un elemento de construcción. Ahora bien, lo que si

puede hacerse es estudiar en profundidad los métodos existentes, sus limitaciones, el ámbito en el que pueden aplicarse, y abordar el problema empleando varios métodos de ensayo.

Algunos autores han apuntado varias razones por las cuales un ensayo acelerado no da respuestas plenamente satisfactorias:³⁰

En primer lugar, no hay una descripción, fuera de toda duda, de lo que es un clima ambiente, ya que el clima es algo errático que no se corresponde con un listado de variables, cada una de las cuales quede definida por un valor medio y una desviación típica. Los climas son muy variables y conllevan muchos elementos; piénsese en todas las combinaciones posibles de temperatura, humedad ambiente, condensación sobre superficie, congelación-descongelación del agua, velocidad y dirección del viento, erosión, acción de microorganismos, lluvia, radiación solar, e incluso efectos de tipo climático provocados por la acción del hombre, tales como ataque por contaminantes químicos (la norma ASTM D1828³¹ distingue entre ambiente rural con atmosfera pura y ambiente industrial con presencia de gases sulfurosos, entre otros) etc.

Además esas variables en campo abierto no coinciden con las que pueden darse en un elemento de tejado tal como un panel sándwich, en el que al otro lado del mismo las variables son las del interior de un hogar, completamente distintas o donde en una esquina concreta se tiene un microclima diferente del que hay unas decenas de metros más allá. En relación al contenido real de humedad en el interior de paneles de muro, Paroc Co³² realizó mediciones comparando la humedad relativa entre diversas partes interiores del muro; para ello se instalaron sensores dentro del panel, cerca de la superficie y se tomaron medidas desde febrero a octubre a las 7 horas a.m., lo que significa que el calor del sol no influyó apenas en la temperatura de las superficies. Los resultados (ver *figura 2.18*) mostraron que puede haber una gran diferencia de humedad en función de la orientación de la cara del panel.

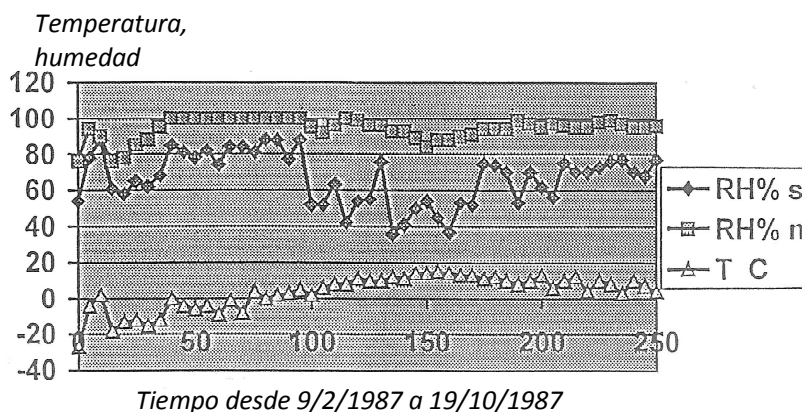


Figura 2.18. Humedad relativa y temperatura en el interior de un panel de muro. Medidas interiores, de febrero a octubre, cerca de la cara orientada al norte y cerca de la cara orientada al sur.

Los esfuerzos simplificadores para correlacionar todas estas variables simplemente no funcionan en muchas ocasiones. Así, por ejemplo, el mantenimiento de una temperatura constante a la par que se provoca un ciclado de humedad es un fenómeno que no se corresponde con un comportamiento real del clima, ya que en la realidad una disminución en la humedad relativa va acompañada usualmente de un incremento en la temperatura y viceversa.

En segundo lugar está la manera en que los materiales se exponen al clima. La mayoría de los ensayos de exposición ambiental se diseñan para acelerar los efectos ambientales, no para aproximarse a estos efectos. Por lo tanto las condiciones seleccionadas no representan ningún ambiente de servicio esperado. Aun cuando la temperatura y las condiciones de humedad seleccionadas están dentro del rango encontrado en ambientes de servicio, los ciclos empleados usualmente tienen lugar a una frecuencia más veloz de lo natural. Otra cuestión es que el efecto de la humedad y temperatura (y otros productos químicos) sobre una junta adhesiva se ve incrementado con la tensión mecánica a la que está sometida, y por tanto habría que añadir ese efecto a la probeta.

Tampoco se consigue el mismo efecto con la exposición completa de un panel sándwich de 2,5 x 0,6 metros a unas condiciones de humedad que con la exposición de las probetas cortadas de tracción, de unos pocos milímetros, que presentan una proporción de junta lateral abierta mucho mayor que la que presentaría el panel completo. Estos conflictos han sido discutidos por Carroll^{33, 34} que sostuvo que no se deberían someter a esfuerzos exagerados a los materiales de construcción cuando se evalúa su durabilidad.

También está la cuestión de que el número finito y limitado de probetas que se pueden ensayar conlleva problemas de evaluación estadística, lo que finalmente hace que como mucho se puedan extraer patrones, tendencias que al desarrollarse en el envejecimiento acelerado, también tengan lugar cuando los mismos materiales se exponen a exposición natural. Por tanto no hay una manera consensuada de exponer un elemento al clima, y por tanto los resultados de los estudios climáticos no pueden trasladarse al comportamiento de ningún ambiente de servicio particular.

En tercer lugar, está la necesidad de establecer correlaciones o extrapolaciones entre el envejecimiento acelerado y el envejecimiento natural; la cuestión es que la pérdida de resistencia para muchos materiales durante el envejecimiento natural no es continua y lineal con el tiempo de exposición. Por ejemplo se puede perder mucha resistencia en invierno y menos en verano. Como ejemplo se tienen los tableros de virutas unidos con fenólicos que presentan un patrón general de pérdida rápida de resistencia y rigidez durante el primer año o dos de exposición, para pasar a tener un ritmo de pérdida de resistencia mucho menor en los años siguientes^{35, 36, 37, 38}. Este mismo efecto se ha observado en la presente investigación en lo que se refiere a la pérdida de resistencia a tracción perpendicular a las caras de las uniones adhesivas de poliuretano monocomponente de curado por humedad, que en condiciones cercanas a la saturación de vapor de agua presentan una brusca caída inicial para luego estabilizarse.

Incluso en otras ocasiones el material varía con las variables del clima, como por ejemplo algunos materiales pasticos que prosiguen su curado tras la fabricación y por lo tanto varían en rigidez y flexibilidad.

Ensayos de durabilidad y ensayos de control de calidad

Ha de tenerse en cuenta que los procedimientos de ensayo diseñados para evaluar la durabilidad de un elemento han de ser, por fuerza, diferentes de aquellos usados para el control de calidad de fabricación. Los mismos procedimientos de ensayo no sirven para ambos propósitos.

Los envejecimientos acelerados de evaluación de la durabilidad tienen como objetivo principal la demostración de si un elemento puede comportarse como se desea durante muchos años en ambiente climático. Son ensayos que llevan tiempo, laboriosos, complicados y que requieren muchas probetas, equipamiento especializado y personas capacitadas. Son ensayos necesarios para chequear, desarrollar, certificar, cualificar un nuevo producto. A veces incluso hay que desarrollar un procedimiento o adaptar un desarrollo existente.

Por el contrario los ensayos de control de calidad han de ser rápidos y baratos, y su objetivo es la detección de un producto mal fabricado, una unión adhesiva incorrecta, etc.

No obstante, a veces hay productos novedosos que ya están en el mercado y para los que no hay procedimientos de ensayo adecuados para el control de calidad, y el ingeniero se ve obligado a tomar procedimientos de evaluación de la durabilidad para el propósito del control de calidad como única forma de dar un nivel de confianza que sea aceptado por el cliente, el comprador u otro agente implicado. Por eso a veces la frontera entre ambos tipos de ensayo puede confundirse.

La durabilidad de los elementos compuestos depende de la durabilidad de todos los componentes que los integran: sustratos, adhesivos, intercaras. Hay ensayos que analizan la durabilidad del adhesivo, otros la del sustrato, otros la de la unión adhesiva y todos aportan información, pero probablemente no es posible encontrar un único ensayo que dé respuesta a todas las cuestiones sobre la durabilidad.

Futuro de los procedimientos de ensayo acelerados

Muchos procedimientos de ensayo acelerado para evaluar la durabilidad de componentes de construcción han demostrado ser erróneos, mal interpretados, aplicados incorrectamente o escasamente aplicables³⁰. Las razones que se han indicado para ello son múltiples; diferentes investigadores tienen diferentes filosofías para aproximarse a la evaluación de la durabilidad. Hay autores que prefieren simular condiciones ambientales que no sobrepasen en intensidad a aquellas que hay en la naturaleza. Por otra parte, otros autores incrementan los parámetros de ensayo mucho más allá de las condiciones naturales.

Gressel^{39, 40, 41} expresó una opinión crítica sobre los problemas asociados con la evaluación de la durabilidad de los tableros de partículas a partir de una experimentación laboriosa que se prolongó durante varios años. En la búsqueda de procedimientos que arrojaran luz sobre los mecanismos de degradación más importantes que actúan sobre los sistemas de madera-adhesivo y que pudieran ser independientes del tipo de adhesivo implicado. Comparó exposiciones ambientales en el exterior de probetas expuestas por periodos de tiempo de nueve años con exposiciones al exterior protegidas. En ambos casos con probetas bajo estados tensionales y con probetas sin tensión.

Concluyó que ni los ensayos de exposición ambiental ni los ensayos acelerados en laboratorio eran suficientes por sí mismos para dar una evaluación correcta de la durabilidad del adhesivo del tablero de partículas. Sugirió abordar el problema con dos tipos de procedimientos de ensayo, cada uno de los cuales daría información sobre la degradación pero no habría un único ensayo que solucionara el interrogante de la durabilidad:

- Ensayos de comportamiento que empleasen deliberadamente condiciones que excedieran considerablemente aquellas encontradas en el ambiente natural esperado y
- Ensayos ajustados a los ambientes climáticos que aproximadamente se dan en las condiciones de servicio.

Existe información acumulada históricamente sobre el desarrollo de procedimientos de envejecimiento. Sin embargo, en muchas ocasiones esta información no está disponible de una manera rápida o el propósito original para ese método de ensayo no está claro. Otras veces el procedimiento de ensayo se aconseja para un producto (por ejemplo para un panel sándwich de caras metálicas) y se utiliza para aplicarlo a otro producto que se cree similar a aquel (un panel sándwich de caras derivadas de la madera, por ejemplo).

Por tanto, sigue habiendo una necesidad de nuevos procedimientos de envejecimiento acelerado para nuevos productos y materiales, y también procedimientos para el control de calidad. Hay una gran necesidad de aplicar nuevos enfoques, de acumular más información, de alcanzar desarrollos matemáticos, teorías que permitan hacer mejores predicciones. Los ensayos de envejecimiento acelerado tienen, aún, mucho territorio por explorar.

4.4. Aspectos generales sobre la degradación en el panel sándwich

Hay diversas acciones que se ha observado que pueden provocar una degradación mecánica en el panel sándwich y que por lo tanto hay que tomar en consideración. Esta degradación puede desembocar en alguno de los modos de fallo relevantes que se sabe, por experiencia, que presenta el panel:

- Fallo por tensión de las caras
- Fallo por adhesión entre núcleo y cara
- Fallo por cortadura del núcleo
- Fallo por aplastamiento del núcleo (y a veces de una de las caras) contra el apoyo
- Fallo por arrugamiento de las caras (debido a tensión de compresión, y casi únicamente en paneles de caras metálicas delgadas)
- Fallo a tensión o cortadura de las fijaciones

Las acciones o fenómenos que degradan el panel pueden darse simultáneamente, no obstante suelen estudiarse de manera separada a través de ensayos que las intentan simular.

4.4.1. Degradación de los adhesivos que unen las caras al núcleo

Entre los requisitos fundamentales para que un panel sándwich mantenga su buen comportamiento está el que se mantenga la resistencia adhesiva de las caras al núcleo; el funcionamiento correcto de una estructura sándwich se basa en este enlace.

Experimentalmente se ha llegado a la conclusión, y así se indica en las correspondientes recomendaciones normativas²⁸, que para que un panel sea durable resulta indispensable que la resistencia a tracción de la unión entre las caras y el núcleo tenga un valor característico mínimo de al menos $0,075 \text{ N/mm}^2$, ya que hay una relación inequívoca entre un panel con una baja resistencia a tracción perpendicular a las caras y un deficiente comportamiento en servicio.

La resistencia de la unión entre las caras y el núcleo resulta especialmente importante en los paneles de caras metálicas, ya que cuando se considera el envejecimiento de un panel sándwich de este tipo, el modo de fallo más usual que se observa en la mayor parte de los casos prácticos es el fallo por arrugamiento (“wrinkling”) de las caras³².

No obstante aunque hay poca información disponible de las propiedades de la unión adhesiva para diferentes combinaciones de materiales, adhesivo y propiedades de la superficie, se sabe que esta degradación está originada fundamentalmente por la humedad, pero puede estarlo también por la temperatura y por otras causas.

La temperatura a la que el adhesivo ablanda debería de ser tan alta como fuera posible para preservar la resistencia a flexión del panel sándwich, y evitar la deslaminación cuando se expone a temperaturas altas, como por ejemplo en la proximidad de un fuego. La mayoría de los adhesivos termoplásticos y termoestables no pueden exponerse a temperaturas superiores a 150° C, como es el caso de los poliuretanos, usados generalmente para adherir núcleos de XPS. Desafortunadamente los adhesivos existentes que poseen alta resistencia a la temperatura no resultan aplicables, ya que son incompatibles con los métodos de producción que se siguen en la fabricación del panel.

4.4.2. Degradación de los tableros que forman las caras

Los tableros que forman las caras que se emplean en aplicaciones en exterior suelen emplear como aglomerantes resinas de fenol-formaldehído. Si se utilizan para usos de interior secos se emplean UF, y para ambientes de alta humedad tales como ambientes de exterior protegidos, se emplean resinas de melanina-urea-formaldehído.

Las exposiciones cíclicas entre dos ambientes húmedos implican cambios dimensionales permanentes, especialmente en el espesor, y también conllevan reducciones en la resistencia y en la rigidez. Para los tableros de partículas de madera unidas con adhesivo, la magnitud de los cambios en las propiedades viene determinada principalmente por el tipo y cantidad de adhesivo usado. Gillespie y River⁴² establecieron que las resinas de fenol-formaldehído eran extremadamente duraderas, mientras que los trabajos de Palmer y Stadhevsky⁴³ sobre la vida en servicio de los adhesivos basados en formaldehído concluyeron que los adhesivos de UF sometidos a exposición húmeda de interior o semiexterior agotarían su vida útil en el periodo de 5 a 10 años, mientras que, por contraste, los adhesivos de fenol-formaldehído sometidos a las mismas condiciones durarían indefinidamente.

McNatt^{44, 45} investigó los efectos de los ciclos de humedad sobre la resistencia a la flexión y sobre la rigidez de los tableros derivados de la madera. Además de constatar que los tableros a

base de resinas de UF se veían más afectados por los cambios cíclicos en la humedad que los fabricados a base de adhesivos fenol-formaldehido, obtuvo estos resultados:

- En los tableros derivados de la madera, las temperaturas altas incrementan el efecto de degradación producido por un ciclado entre humedades.
- Dada una temperatura, el ciclado entre dos estados de humedad, producirá resultados comparables que dependen del tiempo total de exposición más que del número de ciclos cuando el contenido de humedad en equilibrio se consigue después de cada cambio de la humedad.

Los mecanismos responsables de esta pérdida de resistencia del tablero de partículas expuesto a condiciones de exterior son varios. Tal como explica Suchsland⁴⁶ el mecanismo más importante es el hinchado y merma de las partículas debido a las variaciones cíclicas de humedad que sufre cuando está en un ambiente exterior. Las *figuras 2.19* y *2.20* ilustran las consecuencias de estos cambios dimensionales. Tanto el hinchado lateral como el hinchado en el sentido del espesor del tablero propician la aparición de tensiones en la línea de adhesivo particularmente cuando las líneas de adhesivo se han vuelto frágiles no flexibles con el paso del tiempo.

La geometría de la partícula tiene un papel importante en estas tensiones de hinchamiento. Cuanto más pequeñas sean las partículas más uniforme es la distribución de las mismas y más pequeños son los solapamientos entre ellas y por lo tanto menores son las tensiones de hinchamiento.

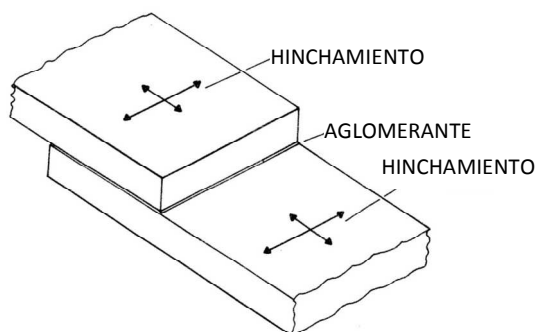


Figura 2.19. Ilustración de las tensiones debidas al hinchamiento y des-hinchamiento en el plano del tablero

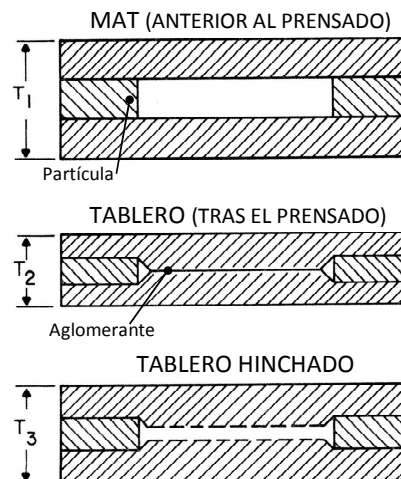


Figura 2.20. Tensiones debidas a hinchamiento y des-hinchamiento en el plano perpendicular al plano del tablero

Varios investigadores^{44, 45} justifican los cambios dimensionales no recuperables en los tableros basados en madera; afirman que el hinchamiento del espesor en el tablero de partículas (y en otros tableros) consiste en dos partes: hinchamiento de la madera en si misma (recuperable) y una liberación de tensiones de compresión introducidas por la compresión de la partícula de madera o “mat” en el prensado (no recuperable)

Por otra parte, en lo que respecta a la vida esperada, no resulta sencillo dar indicaciones generales sobre la expectativa de vida de los tableros de partículas debido a varias razones:

1. Hay una gran variedad de productos y calidades en función de sus densidades, especies forestales empleadas, tipos de resina aglomerante, porcentaje de resina, etc.
2. Hay cambios tecnológicos constantes y desarrollos y diseños novedosos de tableros de partículas y nuevos métodos de fabricación

4.4.3. Cargas permanentes y cargas de larga duración

Son cargas tales como la nieve, y el peso de elementos situados sobre el panel. En cuanto al peso propio en este tipo de paneles es tan pequeño que resulta irrelevante, ya que el panel objeto de estudio rara vez supera los $0,27 \text{ kN/m}^2$.

Las cargas permanentes hacen que se vaya incrementando la flecha inicial. Esta degradación se estudia con cargas estáticas mantenidas durante periodos de tiempo prolongados, de al menos 1000 horas, con montajes que se aproximen lo máximo posible a la situación que se da en la realidad y con paneles completos, especialmente en el caso de paneles que tengan alguna asimetría o no sean iguales a lo largo de toda las secciones transversales y longitudinales del mismo, con el objetivo de evitar anomalías en el funcionamiento originadas por tomar solo una porción del panel.

Dado que las cargas permanentes originan fallos relacionados con la resistencia a cortadura se suelen tomar longitudes de vano cuyo modo crítico de fallo vaya a ser ese. En los ensayos de larga duración se determina el factor de fluencia, para lo cual la carga permanente que se dispone sobre el montaje decidido suele ser de un 30% de la carga de rotura para ese mismo montaje.

En el mejor de los casos se ha constatado que la resistencia a cortadura que tiene el panel cuando se efectúan ensayos de largo plazo es del orden del 80% respecto a la que tiene cuando se hace el ensayo en corto plazo; ya que estos resultados se estiman óptimos. Como valor de seguridad en el diseño se suele tomar como si fuera un 50% en lugar del 80%

Si bien las disposiciones posibles del panel sándwich son variadas, se ha observado experimentalmente que en general las tensiones de cortadura causadas por las cargas de servicio más usuales (y que actúan bien temporal y brevemente o bien las que actúan permanentemente), son bajas y del orden de un 10 a un 30% de la resistencia a cortadura del núcleo. Por lo tanto las tensiones de servicio por si solas no suelen tener un efecto significativo en la resistencia a largo plazo de los paneles sándwich típicos⁸.

4.4.4. Cargas repetidas

Pueden estar causadas por nieve, viento, por movimiento de personas caminando sobre el panel o fuerzas causadas por las variaciones de temperatura cuyas dilataciones correspondientes son frustradas por la existencia de las fijaciones del panel al resto de la

estructura. El efecto de estas acciones se analiza con cargas repetidas en ensayos durante cortos y largos periodos de tiempo.

Dentro de este apartado existen normas de ensayos que simulan el efecto de las personas caminando. A este respecto cabe indicar que la caminabilidad se puede ensayar tanto con cargas cuasi-estáticas no repetitivas, como con ciclos de carga⁸.

4.4.5. Gradiente de humedad en el panel

Las variaciones en la humedad interna del panel causadas por la diferencia de temperaturas en el mismo, puede causar condensación en las partes internas de las caras del panel. Esto puede ser perjudicial para la unión adhesiva. Asimismo una combinación de humedad alta y cambios de temperatura pueden causar degradación del material del núcleo.

4.4.6. Altas temperaturas actuando sobre el núcleo de espuma

Las temperaturas elevadas tienen diversos efectos sobre los componentes del panel y sobre el conjunto completo. Se pueden alcanzar altas temperaturas en aquellos paneles cuya cara externa está expuesta a la radiación exterior y resulta ser de un color oscuro, y también por la proximidad de un fuego

En el caso del núcleo de espuma el factor degradante es la temperatura alta, mientras que, por ejemplo, en el caso de los núcleos hechos de lana mineral ocurre al revés y es la humedad alta el factor degradante. Cuando se sospecha que se pueden alcanzar temperaturas elevadas, hay que tener en cuenta que la resistencia y el modulo de elasticidad de las espumas plásticas decrece con el incremento de la temperatura. Esto puede hacer más propicios los modos de fallo relacionados con estas propiedades, tales como el fallo a cortadura en el núcleo y en el caso de pieles metálicas, el fallo por arrugamiento de la cara más exterior por las tensiones causadas por las altas temperaturas bajo intensa radiación solar.

Con las espumas existe, adicionalmente, el fenómeno de que el proceso de endurecimiento de las espumas formadas recientemente continúa bajo temperaturas elevadas y esto puede tener un efecto de degradación muy largo a plazo⁸.

En lo que respecta al panel en su conjunto, el efecto más relevante que tiene la temperatura sobre el panel completo es el de generar tensiones de origen térmico debidas a la diferencia de temperatura entre las caras interna y externa del panel

4.4.7. Degradación de los sellantes

Los sellantes que cierran las juntas entre paneles al paso de polvo, aire y humedad pueden sufrir degradación. Esto conlleva que también sea más fácil el filtrado del agua de lluvia, lo que trae consigo más riesgos para algunos de los demás fenómenos degradatorios aquí discutidos.

Por último indicar que la radiación solar no suele causar más que de decoloración, que si bien no afecta a la durabilidad mecánica, puede resultar en un aspecto estético inaceptable si se trata de paneles de importancia estética.

4.5. Ensayos de durabilidad condicionada por la humedad y la temperatura

4.5.1. Clases de servicio

La clase de servicio es un concepto que permite que un producto quede ser clasificado en función de su aptitud para trabajar en un ambiente climático determinado. Esta clasificación permite que el producto y sus materiales componentes se puedan seleccionar de entre los más económicos que cumplan los requisitos ambientales correspondientes a la clase de servicio. Así, por ejemplo, no debería usarse un adhesivo resistente al agua y de alto precio para un producto destinado a un ambiente protegido de interior, ya que no solo se incrementa el coste sino que incluso podría argumentarse que inhibe el desarrollo de adhesivos alternativos que pudieran ser satisfactorios y cumplir las expectativas necesarias para ese ambiente protegido de interior.

Hay diversos conceptos que se entremezclan cuando se habla de las clases de servicio; así, diversos autores desarrollan los conceptos de: clases de servicio, clases de durabilidad, clases

de uso o clases de riesgo. Ha habido, históricamente, diversas propuestas de división de los ambientes en categorías. Así por ejemplo Oliver⁴⁷ sugirió cuatro clases diferentes de durabilidad: ambiente interior seco, ambiente interior húmedo, ambiente exterior protegido y ambiente exterior abierto.

Posteriormente se trató de aunar las clases de comportamiento basadas únicamente en el ambiente de servicio con las clases basadas en el uso final del producto, que, en ocasiones, son más fáciles de comprender por el diseñador. Un concepto de comportamiento que combinaba características funcionales con ambientes de servicio fue desarrollado por la Asociación Americana del Plywood para productos de paneles estructurales aplicables a muros, suelos y tejados⁴⁸. Las características de comportamiento atribuidas a los tableros fueron identificadas como: capacidad estructural, estabilidad dimensional y durabilidad de la unión. Se recomendaron una serie de ensayos para medir las propiedades mecánicas importantes relativas a estas tres características. La durabilidad de la unión se planteó a tres niveles: exterior, intermedio e interior que tendrían sus ensayos acelerados de envejecimiento específicos.

En 2009 el documento relativo a las estructuras de madera del Código Técnico de la Edificación⁴⁹, fijó que a cada elemento estructural debería corresponderle una clase de servicio en función de las condiciones ambientales previstas:

1. *Clase de servicio 1.* Caracterizada por un contenido en humedad en la madera correspondiente a una temperatura de 20 ± 2 °C y una humedad relativa del aire que solo exceda del 65% unas pocas semanas al año. En esta clase suelen encontrarse las estructuras de madera expuesta a un ambiente interior.
2. *Clase de servicio 2.* Caracterizada por un contenido en humedad en la madera correspondiente a una temperatura de 20 ± 2 °C y una humedad relativa del aire que solo exceda del 85% unas pocas semanas al año. En esta clase suelen encontrarse las estructuras de madera a cubierto, pero abiertas y expuestas al ambiente exterior. Una piscina cubierta, debido a su ambiente húmedo, encajaría en esta clase de servicio.

3. *Clase de servicio 3*. Condiciones ambientales que conduzcan a un contenido de humedad superior al de la clase de servicio 2. En esta clase se encontrarían las estructuras de madera expuesta a un ambiente exterior sin cubrir.

Por otra parte se encuentran las clases de uso, antiguamente denominadas *clases de riesgo*, descritas en la norma EN 335-1⁵⁰ y basadas en una clasificación preexistente de 1981 del Comité Europeo de Homologación. Tras los últimos cambios han quedado un total de 5 clases de uso definidas en Europa, que no coinciden con otras clases utilizadas fuera de ella. Se estudió la posibilidad de armonización entre las tres categorías de humedad del entonces existente Eurocódigo 5⁵¹ y las cinco clases de la norma EN 335 del año 1996 tratando de ajustarlas al máximo. No obstante los dos sistemas tienen criterios diferentes para llegar a objetivos diferentes.

Un usuario identificaría la clase de uso de una situación de servicio y localización geográfica determinada, determinando los agentes biológicos que pueden atacar al producto de madera. El usuario evaluaría el tipo y duración de la prestación requerida, seleccionando un nivel apropiado de durabilidad y asegurándose que el producto candidato ofrece esa durabilidad.

Han quedado estas cinco clases generales para madera y productos derivados de la misma, si bien hay particularizaciones y matices de las mismas para productos específicos⁵².

1. *Clase de uso 1*: situación en la cual el producto derivado de la madera está bajo cubierta, no expuesto a la intemperie ni a la humectación
2. *Clase de uso 2*: situación en la cual el producto está bajo cubierta y no expuesto a la intemperie, pero en la que se puede dar ocasionalmente una humedad ambiental elevada que puede conducir a una humectación ocasional pero no persistente
3. *Clase de uso 3*: Situación en la cual el producto no está bajo cubierta ni en contacto con el suelo. Puede estar permanentemente expuesto a la intemperie, o bien protegido de la intemperie, pero sometido a humectación.

4. *Clase de uso 4*: En esta situación el producto está en contacto con el suelo o con agua dulce y expuesto a una humectación permanente.
5. *Clase de uso 5*: En esta situación el producto está permanentemente en contacto con agua salada.

A partir de aquí se puede estudiar la información disponible sobre la aparición de agentes biológicos en función de la clase de uso, y otras cuestiones que quedan fuera del alcance de esta investigación.

4.5.2. Estudio de la durabilidad a través del ensayo de tracción perpendicular a las caras

Con el objetivo de analizar cómo envejece el panel sándwich se han venido desarrollando métodos de laboratorio de envejecimiento acelerado consistentes en mantener muestras de panel en diferentes situaciones de humedad y temperatura (fijas o variables). Estas situaciones dependerán fundamentalmente de cuales sean los materiales componentes de ese panel sándwich.

En primer lugar se estudian qué variables, susceptibles de degradar el panel, se pueden dar en la realidad. Después se someten las probetas a esas situaciones pero a un nivel más severo o intenso que el que se da en las situaciones reales. Se ha de tener en cuenta también que para estudiar correctamente la durabilidad se probarán varios de estos estados, situaciones o combinaciones climáticas, de manera que el panel se pruebe en varios escenarios. Esto sería lo que se consideraría una correcta caracterización de la durabilidad.

El efecto que tienen estos envejecimientos se manifiesta, sobre todo, en la variación de las propiedades de la unión adhesiva entre núcleo y caras, pero también en otras propiedades mecánicas como por ejemplo en la respuesta del material del núcleo a compresión o a cortadura (es el caso de núcleos de lana mineral o de espumas de muy bajas densidades).

El factor de degradación se suele evaluar únicamente con los ensayos de tracción perpendicular porque se ha observado que una merma en esta propiedad se corresponde con

una merma del resto de propiedades mecánicas relacionadas con ella, por tanto resulta representativo de la verdadera degradación de la resistencia del panel, y además es un ensayo sencillo de llevar a cabo.

Además de que la experiencia ha demostrado que una buena unión núcleo-caras es esencial para que un panel sea durable, este procedimiento resulta conservador en comparación con la degradación real del panel. Hay una buena correlación entre la degradación de la resistencia a tracción perpendicular y la resistencia a cortante, y una correlación más débil (del orden de la mitad) en relación a otras propiedades mecánicas, como por ejemplo la resistencia al arrugamiento o pandeo local (en paneles de pieles metálicas delgadas).

En general las probetas de ensayo son obtenidas con el espesor completo y por tanto llevan todas las capas del mismo, incluso la capa protectora del material de las caras si existe, si bien pudiera estudiarse una unión adhesiva entre dos capas en concreto eliminando el resto de ellas.

En todos los métodos, tras el ensayo acelerado, las muestras son re-aclimatadas a las condiciones de humedad y temperatura de laboratorio durante el tiempo necesario para que alcancen el equilibrio higrotérmico. Esto asegura que el ensayo mida el daño irreversible producido por el envejecimiento y no la resistencia que tiene el panel en esas condiciones. En general es deseable que el modo de fallo tenga lugar en el material del núcleo y no en el adhesivo o en la unión adhesivo-capa del sándwich.

No se podría dar aquí una relación exhaustiva de todos los métodos de ensayo que han ido surgiendo durante décadas, pero sí que se indicarán, a modo de ejemplo, algunos de ellos, desde los más simples hasta los más elaborados que contemplan ataques por varios fenómenos climáticos.

1. Ensayos bajo condiciones ambientales fijas

Un ejemplo de estos ensayos sería el mantenimiento de muestras durante 24 horas bajo condiciones constantes de 70°C / 100% HR, que son unas condiciones que se sabe son dañinas para la lana de roca que se emplea en algunos paneles²⁹.

Son ensayos rápidos, utilizados con fines de desarrollo o para control de calidad. Tienen la ventaja de que se obtienen resultados en muy pocos días y pueden llevarse a cabo con unas mínimas instalaciones de laboratorio, pero tienen el inconveniente de que suponen una simplificación excesiva de lo que puede ocurrir en la realidad.

2. Ensayo propuesto por Kerckanen

Como resultado de las investigaciones llevadas a cabo en la década de 1990 en la Universidad de Tampere (Finlandia), se determinó un procedimiento general para la determinación del factor de degradación en paneles sandwich³². El procedimiento consiste en someter a probetas de 100 x 100 mm² y todo el espesor a las siguientes condiciones:

- Ciclo 1: 5 días a +70°C / 90% HR; después 1 día a -20 °C; después 1 día a +90 °C en condiciones secas.
- Ciclo 2: 28 días a +65 °C / 100% HR

Estas condiciones no son completamente rígidas, ya que por ejemplo la temperatura más alta de 90°C va destinada a probar las caras externas, de colores oscuros, que están expuestas a radiación solar, por lo tanto se puede sustituir esa temperatura por otra menor de entre 70 a 90°C, cuando las condiciones reales son otras.

Para determinar las características de durabilidad, se ensayan, a tracción perpendicular, a tres periodos de tiempo. El primero corresponde con el estado inicial sin envejecer, el segundo corresponde con el final de un envejecimiento de Ciclo 1 y el tercero es la medición después de haber repetido cinco veces el Ciclo 1. El factor de degradación es el resultado de dividir el valor medio de la resistencia envejecida entre el de la resistencia sin envejecer. El factor de degradación no debe ser menor de 0,6 después de un ciclo de C1, ni menor de 0,4 para cinco ciclos de C1. El factor de durabilidad después del ciclo C2 no debe ser menor de 0,4.

Se ha demostrado que aquellos paneles que superan estos criterios alcanzan una vida de 50 años^{32, 53}. Una vez se ha constatado que la combinación de materiales y método de preparación de los mismos supera los criterios anteriormente expuestos, en producción solo

habrían de realizarse controles de calidad sobre el procedimiento de realización de la unión adhesiva y sobre la calidad del material del núcleo.

3. Ensayo propuesto en la norma ASTM C481⁵⁴

En este procedimiento se establece un ciclo que se repite seis veces. La probeta se somete sucesivamente a seis condiciones de envejecimiento diferentes. Hay dos procedimientos, el A y el B con diferentes condiciones tal y como se especifica en la *tabla 2.9*. Debe seleccionarse la más crítica o una combinación de ambos tipos.

Procedimiento tipo A			Procedimiento tipo B		
Condición	Temp. (°C)	Tiempo (h)	Condición	Temp. (°C)	Tiempo (h)
Agua	49	1	Agua	49	1
Pulverización con vapor	93	3	Pulverización con vapor	71	3
Aire frío	-12	20	Aire frío	-40	20
Aire seco caliente	99	3	Aire seco	71	3
Pulverización con vapor	93	3	Pulverización con vapor	71	3
Aire seco caliente	99	18	Aire seco	71	18

Tabla 2.9. Condiciones de envejecimiento propuestas en la norma ASTM C481.

Después de someter las probetas al régimen de envejecimiento acelerado apropiado se aclimatan a temperatura y humedad ambiente y se ensayan a tracción perpendicular a las caras (comprobar). El factor de durabilidad es el cociente entre la resistencia después del envejecimiento y la resistencia sin envejecer.

A estos tres ejemplos de ensayos de envejecimiento se podrían añadir muchos otros, algunos de los cuales incluyen acciones tan agresivas sobre las muestras como la inmersión en agua líquida muy caliente, o inmersión de la muestra en agua seguida de ciclos de congelación y descongelación a la misma. Las acciones climáticas inducidas sobre las probetas también se efectúan a veces sobre la unión adhesiva bajo tensión, bien en muestras pequeñas o bien en montajes que incluyen todo el panel. La degradación de la unión adhesiva es mayor, en general, bajo tensión.

4.5.3. Estudio de la durabilidad a través de otras propiedades

En los procedimientos de ensayo vistos en el apartado anterior, uno de los criterios para considerar como buena una unión adhesiva es que el fallo ocurra en el material del núcleo y no en la unión adhesiva en sí misma. Por tanto, aun ocurriendo esto así, pudiera resultar interesante forzar la rotura por el adhesivo y/o estudiar otras formas de rotura del mismo.

Por eso el ensayo de tracción perpendicular no es suficiente y existen otros métodos para estudiar las propiedades de la unión adhesiva. Estos métodos pueden ser aplicables o no al panel sándwich de madera, ya que muchos de ellos han sido desarrollados, en principio, para ser aplicados al panel sándwich de caras metálicas, que es un panel estudiado en mayor profundidad y amplitud que el de madera o para ser aplicados a las uniones encoladas madera-madera. Entre estos métodos destacan los siguientes:

- Ensayo de resistencia a cortadura según UNE-EN 392⁵⁵. En la *figura 2.21* se muestra el accesorio para el esfuerzo cortante. La pieza semicilíndrica transmite la carga a la probeta y está articulada de forma que la carga actúe sobre la superficie transversal de la probeta con una distribución uniforme de la presión en todo el ancho de la misma
- Ensayo de resistencia a cortadura según ASTM D3165⁵⁶ (ver *figura 2.22*)
- Ensayo de cuña según UNE-EN 14509⁶¹ o ASTM D3762⁵⁷ (ver *figura 2.23*)

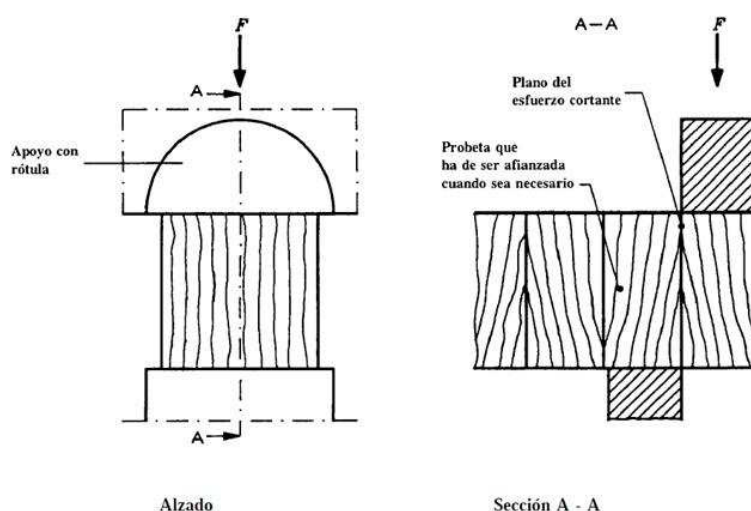


Figura 2.21. Ensayo de resistencia a cortadura según UNE-EN 392. Esquema del accesorio para esfuerzo cortante con una probeta colocada

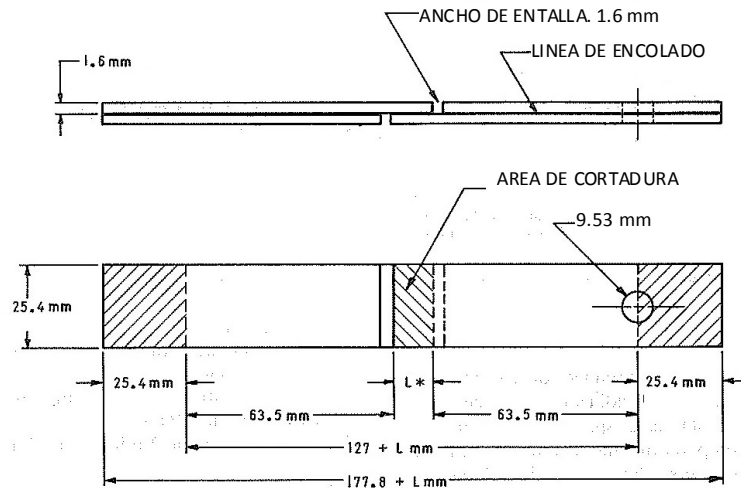


Figura 2.22. Ensayo de resistencia a cortadura según ASTM D3165

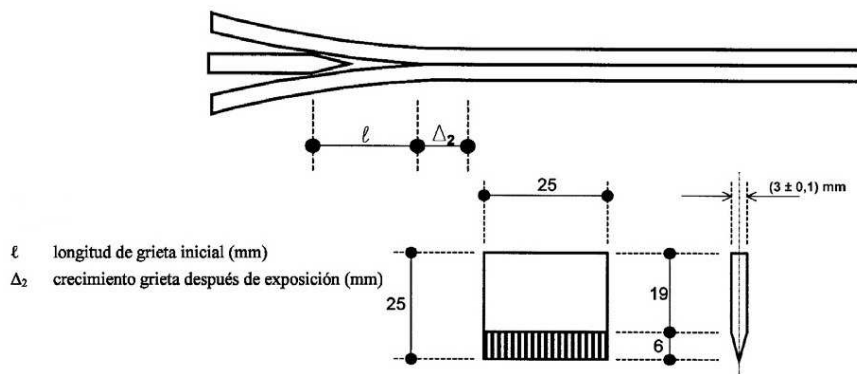


Figura 2.23. Ensayo de cuña según UNE-EN 14509 o ASTM D3762

4.6. Efectos de la humedad sobre el panel sándwich

El contenido en humedad de la madera es la cantidad de agua contenida en la misma e incluye tanto el agua absorbida en la pared de la célula de la madera como el agua libre dentro de la oquedad central de la célula, y se expresa en porcentaje en peso. La cantidad de agua que la madera puede absorber (esto es que puede ser sustentada en la pared celular) aunque depende de la especie de la madera suele ser de un 30%. El límite en la cantidad de agua que puede ser contenida por la pared celular se denomina punto de saturación de la fibra, y ese estado se puede alcanzar tanto a base de absorber agua líquida como a base de absorber agua en fase vapor.

La cantidad de vapor de agua que puede ser absorbida depende de la humedad relativa del aire que rodea a la madera. Si la madera se almacena con una humedad relativa de 0%, el contenido en humedad llegará a ser del 0%, y si la madera se almacena al 100% de humedad relativa, alcanzará el punto de saturación de la fibra (alrededor del 30% como se ha indicado anteriormente). Por lo tanto, si entre esos dos valores climáticos extremos se mantiene la madera en una humedad relativa constante, la madera alcanzará un contenido de entre el 0 y el 30%.

Sin embargo rara vez se alcanza una cantidad estable de humedad ya que el contenido de agua en el aire está variando constantemente. Esta cantidad varía diariamente y con los ciclos estacionales y por ello el contenido en humedad de la madera varía diariamente y también con las estaciones.

El contenido de humedad en el equilibrio no puede ser cambiado mediante la aplicación de acabados a la madera. Estos acabados únicamente afectan a la velocidad a la cual ocurre la absorción de agua.

Aunque depende del tipo de clima en el que se encuentra, normalmente cuando la madera está expuesta al ambiente exterior la variación en contenido ronda la cifra del 12% (siendo algo menor en verano y algo mayor en invierno). Incluso en zonas climáticas muy húmedas, el contenido de humedad relativa raramente es lo suficientemente alto durante periodos de tiempo largos para llegar a un contenido de humedad de la madera por encima del 20%.

4.6.1. Mecanismos de absorción de la humedad en la madera y sus derivados

Cuando la madera incorpora agua, la velocidad de absorción cuando se trata de vapor es significativamente más lenta que cuando se trata de agua líquida. El agua líquida puede causar que la madera alcance rápidamente el punto de saturación de la fibra y es la única manera de llevar el contenido de humedad de la madera por encima de ese punto. El agua líquida puede llegar a la madera por medio de la lluvia, por fugas, por fenómenos de condensación o de rocío, al derretirse la nieve o el hielo y por otros métodos. Cuando la madera continúa absorbiendo agua más allá del punto de saturación de la fibra, esa agua se almacena en la

oquedad central de la célula de la madera, que inicialmente se encuentra llena de aire. Cuando todo el aire en esa oquedad central ha sido reemplazado por agua, la madera puede llegar a alcanzar un contenido de agua de hasta el 200%. Aunque son muchos los caminos por los cuales la madera puede llegar a alcanzar ese punto, el resultado siempre es el mismo: mal comportamiento de la madera. Por otra parte los problemas asociados con los cambios en el contenido en humedad deberían minimizarse si el contenido en humedad está entre el 9% y el 14%.

Para controlar el agua uno de las vías es el tratamiento de la madera. Se trata con repelentes del agua, que es una denominación genérica para una amplia variedad de sellantes y tratamientos sobre la madera que cambian las propiedades de la superficie de la misma de manera que la madera expulse el agua líquida, pero no tienen apenas efecto sobre la transmisión del vapor de agua. Tampoco detienen la absorción de agua líquida completamente, sino que la retardan. Resulta un tratamiento muy bueno para la madera utilizada en exterior ya que la protegen contra la lluvia.

Como referencia acerca del efecto de la humedad, los tableros de partículas experimentan una deformación debida a la variación de humedad de un 0,004% por cada 1% de cambio en la humedad relativa, en el plano del tablero; y de entre un 0,2 a un 0,3% por cada 1% de cambio en la humedad relativa en la dirección del espesor⁸.

En cuanto a los tableros de madera-no madera, también su durabilidad se ve afectada por el efecto de la humedad, especialmente por los ciclos de secado-humectación, siendo el movimiento del agua un poderoso agente de degradación. La comparación entre elementos envejecidos y elementos sin envejecer suele hacerse a través de ensayos de flexión sobre el tablero¹².

4.6.2. Estabilidad dimensional de los paneles sándwich

En un panel sándwich, cualquier movimiento dimensional de una cara con respecto a la otra, como consecuencia de una variación en el contenido de humedad y en menor medida de la temperatura, origina el arqueado del panel. Por tanto, aunque el uso de caras disimilares resulta deseable desde el punto de vista económico y estético, la inestabilidad dimensional de

las caras durante la fabricación del panel o en su vida útil, puede traer graves consecuencias. Si la variación dimensional en ambas caras fuera igual, la longitud y anchura del panel se incrementaría o disminuiría pero no se produciría el arqueado del mismo.

Este problema de la estabilidad dimensional está relacionado con las caras ya que el núcleo no suele ser lo suficientemente rígido como para causar el arqueado del panel o para causar que el panel se quede plano, sin embargo la magnitud del efecto de arqueado sí que está influenciado por el espesor del núcleo⁹.

De la misma manera que en las construcciones se han venido disponiendo barreras de vapor para evitar la migración de la humedad hacia la parte fría, también en el panel sándwich se han dispuesto en ocasiones láminas de metal o de plástico, dentro de las capas, para reducir el paso del vapor entre las mismas.

En una serie de evaluaciones sobre el fenómeno del arqueado y sobre el comportamiento general de los paneles, llevados a cabo entre 1947 y 1978 por parte del Laboratorio de Productos Forestales del Departamento de Agricultura de USA, se dispusieron paneles sándwich de todo tipo para generar diversas soluciones constructivas. Una fotografía del montaje experimental puede verse en la *figura 2.24*. Los paneles consistían en una variedad de materiales para las caras, incluyendo tablero contrachapado, aluminio, tablero de partículas, tableros compuestos de cemento, y núcleos de panel de abeja, poliuretano o poliestireno extruido. Algunas de las conclusiones entonces alcanzadas fueron las siguientes:

- El arqueado mínimo ocurría en los paneles de caras de aluminio
- El arqueado fue mayor en los paneles de caras de tablero contrachapado con núcleos de papel
- Procediendo cuidadosamente durante la fabricación, y con una combinación adecuada de cara, núcleo y adhesivo, se pueden obtener paneles sándwich que ofrecen un comportamiento altamente satisfactorio Las combinaciones apropiadas de cara, núcleo y adhesivos y con una técnica cuidadosa de fabricación, se pueden obtener paneles sándwich que ofrecen unos resultados y comportamiento altamente satisfactorio⁹

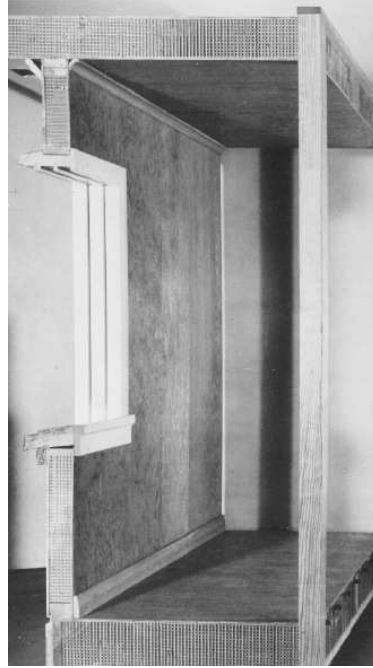


Figura 2.24. Sección en la que se pueden ver los detalles de la estructura experimental hecha a base de diversos paneles sándwich.

4.7. Efecto de la temperatura sobre el panel sándwich

La temperatura elevada tiene efectos relevantes en:

- Los núcleos de espuma de plástico (esta cuestión se trató en el *apartado 4.4.6*)
- La unión adhesiva (esta cuestión se ha tratado anteriormente en el *apartado 3.3.2*)
- El panel completo; a este respecto el efecto más considerable son las tensiones causadas por la diferencia de temperaturas entre las caras interna y externa del panel sándwich.

5. ASPECTOS GENERALES DE LA HUMEDAD EN LA EDIFICACIÓN.

La humedad se puede definir como agua en cualquiera de sus fases (vapor, líquido o hielo). La humedad existe en todas partes y no es peligrosa como tal, excepto cuando aparece en cantidad demasiado grande o en lugares diseñados para que no aparezca, lo que conlleva problemas relacionados con el mantenimiento del edificio, con su durabilidad, con el comportamiento energético de la edificación, y con el confort y salud humanos.

El daño por causado por la humedad es el mayor factor limitador de la vida útil de un edificio y puede presentarse de una manera visible o invisible y en una gran variedad de manifestaciones. La degradación invisible incluye la degradación de la resistencia mecánica, de la rigidez y de la resistencia térmica de los materiales de edificación. La degradación visible se presenta en forma de:

- Ataque de organismos vegetales tales como moho y hongos
- Podredumbre de los materiales derivados de la madera
- Roturas y agrietamientos causados por ciclos de congelación-descongelación
- Hidratación de los materiales plásticos
- Corrosión de los metales
- Daño causado por la expansión de materiales debida a la humedad
- Daños estéticos: manchas, etc.

5.1. Fuentes de humedad

Las diversas partes de un edificio pueden recibir humedad de varias fuentes. En muros, tejados y techos, donde se emplea frecuentemente todo tipo de panel sándwich, destacan las siguientes fuentes de humedad:

Lluvia: Bajo una lluvia intensa se forma una capa de agua sobre la superficie más exterior de una cubierta, que cierra temporalmente las juntas al paso del aire. Si entonces el viento sopla contra la fachada, la diferencia de presión a ambos lados de la junta puede forzar al agua hacia dentro. Además de este fenómeno, y dependiendo de la estructura de la junta puede haber

succión capilar. Por lo tanto en una construcción sándwich los detalles de la junta resultan de gran importancia para el funcionamiento satisfactorio del muro o del tejado.

Las soluciones constructivas se completan frecuentemente con sellado de juntas (entre paneles) que puede presentarse en forma de lengüetas y/o sustancias sellantes, que a veces se aplican en la superficie interna del panel y a veces en la externa, según donde quede la zona de mayor humedad. En edificios expuestos frecuentemente a lluvia intensa (por ejemplo en zonas costeras) es imperativo sellar siempre la junta externa.

Se refuerza la protección contra la lluvia mediante la aplicación de recubrimientos sobre el panel para crear un nivel de protección adicional.

Humedad ambiente: El aire contiene vapor y su contenido se expresa como contenido de vapor en g/m^3 . En la *figura 2.25* se muestra el contenido de vapor de saturación, que es la máxima cantidad de humedad que el aire puede contener a una temperatura dada. La que resulta de interés en los cálculos técnicos es la humedad relativa, que se define como la relación entre el contenido de vapor efectivo y el contenido de vapor de saturación y se expresa generalmente como un porcentaje. La temperatura a la cual el contenido de vapor efectivo iguala al contenido de vapor de saturación se llama punto de rocío. Es importante no alcanzar el punto de rocío dentro de la construcción.

Cuando la temperatura sobre una superficie es más baja que el punto de rocío del aire que la rodea, se produce condensación sobre esa superficie; la temperatura a la que esto tiene lugar se puede calcular de una manera sencilla. En muchos casos la condensación superficial es de naturaleza local, por ejemplo en sitios con pobre aislamiento, estructuras no herméticas, o esquinas o donde el material ha sido almacenado contra un muro y se ha creado una resistencia térmica adicional y por lo tanto ha descendido la temperatura de la superficie.

El contenido en humedad del aire exterior varía durante el año y con las condiciones del tiempo. El contenido de humedad interior queda determinado por el contenido de vapor exterior, la generación de humedad interior (gente, procesos, etc.) y la cantidad de ventilación. En ambientes interiores normales y con espesores de aislamiento corrientes no hay, normalmente, ningún problema de condensación asociado al panel sandwich⁸

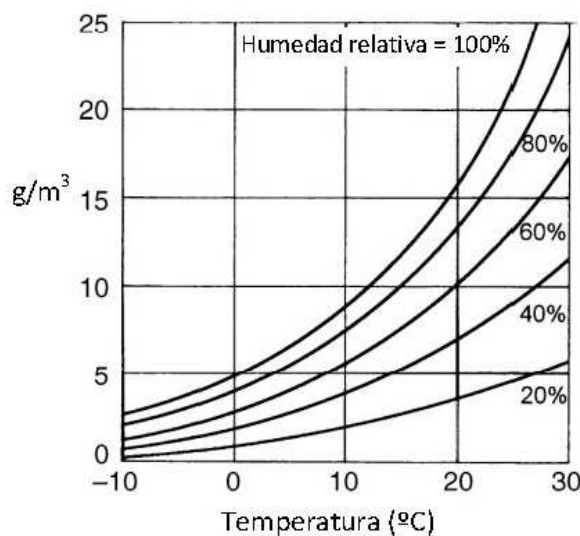


Figura 2.25. Variación del contenido de vapor con la temperatura y la humedad

Humedad residual de la edificación: La humedad residual de la edificación es aquella que queda en los materiales de construcción como consecuencia del proceso de fabricación o de la lluvia o nieve durante la fase de construcción. En los paneles sándwich, siendo productos prefabricados, el contenido en humedad como consecuencia de la fabricación no es de consideración, máxime cuando los materiales del núcleo son repelentes del agua y solamente son partes abiertas en el panel los bordes. No obstante es una buena práctica proteger las superficies abiertas del panel durante la fase de construcción para evitar completamente la penetración de la humedad en la estructura.

5.2. Transporte de la humedad y su control en la edificación

La humedad se controla, paralelamente, por dos vías:

1. Minimizando la entrada de humedad en el recinto.
2. Sacando del recinto la humedad que haya entrado.

Aunque no es posible evitar la entrada de humedad completamente existen sistemas eficientes para su control, tales como sistemas de drenado, ventilación, sistemas de extracción por

capilaridad u otros que eliminen la humedad indeseada. Pero ante todo hay que comprender los mecanismos básicos de transporte del agua, que son, en orden de importancia, los siguientes:

- a) El movimiento de agua líquida, incluyendo el movimiento capilar
- b) La convección o transporte de vapor de agua por movimiento del aire
- c) La difusión del vapor de agua

Transporte de humedad por movimiento de líquido

Aparte del transporte directo de la lluvia, analizado en apartados anteriores, se produce movimiento de líquido en las filtraciones y en la humedad por capilaridad.

Las entradas de agua por filtraciones se producen generalmente por falta de impermeabilización, lo que permite el paso del agua. Se suele producir en los encuentros de muros con forjados, en las juntas entre elementos, en elementos rotos, en orificios para el paso de instalaciones, etc.

La humedad por capilaridad se debe a la ascensión capilar del agua a través de los materiales porosos y depende mucho de la cantidad de agua contenida en el subsuelo debida al nivel freático. Aparece en la parte bajo de los muros y posteriormente asciende.

Transporte de humedad por convección

La convección de humedad tiene lugar cuando las diferencias de presión del aire entre las diferentes partes de la edificación causan el movimiento del aire húmedo. Los factores relevantes en este fenómeno serían

- La hermeticidad, al aire, de la estructura
- La diferencias de presión en distintas partes de la edificación
- El contenido de vapor de aire

Hay riesgo cierto de condensación cuando hay una sobrepresión interior en un edificio. En tal caso el aire húmedo cálido puede ser forzado a través de las partes no herméticas de la

construcción y condensar sobre las superficies más frías. Esta sobrepresión puede tener su origen en un efecto chimenea o en sistemas de ventilación.

La *figura 2.26* muestra la importancia de las estructuras herméticas al aire para reducir la convección indeseable. Las estructuras sándwich dan estructuras mucho mas herméticas comparadas con la construcción in situ⁸.

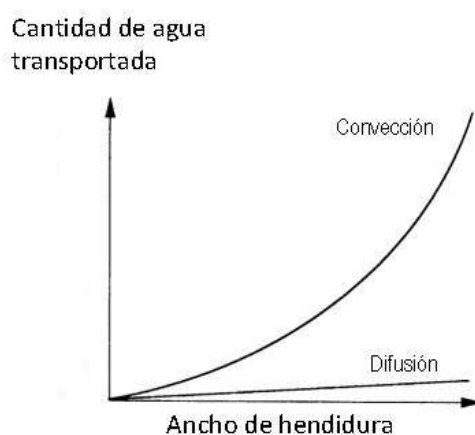


Figura 2.26. Transferencia de humedad por convección y difusión

Esto ha desembocado en que los paneles sándwich han sido especificados frecuentemente para construcciones donde esta cuestión resulta de gran importancia, tales como salas frías, hornos de secado, edificaciones usadas en la industria de la alimentación, etc. Las fugas eventuales que acontecen en las estructuras sándwich son fácilmente detectables, lo que las hace fáciles de corregir; no presentan oquedades o zonas ocultas y las partes potencialmente problemáticas están concentradas en las juntas entre paneles, en los recortes para intersecciones con otros elementos y en las conexiones con otras partes del edificio.

Transporte de humedad por difusión

Dos de los principales mecanismos de transferencia de humedad en la fase vapor son la difusión y la convección. En general el proceso de difusión es lento y transfiere solo pequeñas cantidades de agua, mientras que en el caso de la convección las cantidades son considerablemente mayores como se muestra en la *figura 2.26*.

La difusión de la humedad se produce por una tendencia a nivelar las diferencias en el contenido de vapor en el aire en diferentes ubicaciones. El flujo de humedad tiene lugar desde un área con un mayor contenido en vapor a otro con más bajo contenido. Para conservar energía las casas se construyen más herméticas, esto hace que se reduzcan las pérdidas de aire pero implica un incremento de la presión de vapor. Se deben tomar medidas para disipar el vapor desde dentro del edificio.

Para prevenir esta transferencia, se pueden usar en las edificaciones barreras de vapor. Estas barreras de vapor deben ser puestas siempre en el lado cálido de la estructura, que normalmente es el de la parte interior de los muros y también en techos, si bien existe controversia acerca de si debe o no instalarse barreras de vapor en los techos, sin embargo dado que la presión de vapor migra a áreas de menos presión, sin estas barreras de vapor el vapor migraría al ático⁵⁸.

En paneles sándwich la difusión puede actuar tanto a través de las capas como a través de la junta del panel. Hay paneles en los que esto puede tener mayor o menor importancia, como por ejemplo en aquellos casos en los que por la naturaleza de los materiales que forman las capas éstas actúan con cierta capacidad como barreras de vapor y simultáneamente la difusión por las juntas resulte muy pequeña.

Control de la humedad en la edificación

Hace años la atención se focalizaba en el limitado movimiento por difusión empleando barreras de vapor, aun cuando la difusión del vapor es el menos importante de todos los mecanismos de transporte⁹. Sin embargo el control de la entrada de agua debería ejecutarse de acuerdo con la importancia del mecanismo de transporte:

- a. Control de la entrada de líquido por medio de un adecuado sistema de canalones, desagües y vertederos para el edificio, incluyendo vierteaguas en ventanas, puertas, chimeneas y otros elementos abiertos en la fachada y tejado.
- b. Control de las grietas o aberturas donde se pueda filtrar el aire, y su minimización mediante la instalación de elementos sellantes.

- c. Control de la difusión del vapor instalando barreras de vapor en la parte cálida de entre las dos que separa un muro.

Las soluciones para el control de la humedad bajo condiciones calurosas con frecuencia difieren de aquellas bajo condiciones frías, aun cuando los principios básicos del movimiento de la humedad son los mismos. Por tanto se aplicarán soluciones adaptadas en función de si el clima local es predominantemente caluroso o frío. En climas calurosos las estrategias más efectivas son la ventilación mediante aire exterior y la limitación de las fuentes de entrada de la humedad (humidificadores, secadores sin ventilar, chimeneas que quemen madera etc.). En climas fríos el control de la humedad efectivo pasa por una apropiada deshumidificación.

6. NORMATIVA RELATIVA AL PANEL SANDWICH Y A SU DURABILIDAD

6.1. Directiva 89/106/EEC sobre productos de construcción

La Directiva 89/106/EEC⁵⁹ del Consejo, de 21 de diciembre de 1988 sobre productos de construcción tiene por objeto garantizar la libre circulación de todos los productos de construcción en la UE mediante la armonización de las legislaciones nacionales relativas a los requisitos esenciales de estos productos en materia de salud, seguridad y bienestar. Esta Directiva fue traspuesta a la legislación española en la forma del Real Decreto 1630/1992⁶⁰.

Por tanto, en los productos de construcción, son los Requisitos Esenciales (en adelante RE) el criterio a satisfacer. Estos requisitos, son la base para la preparación de las normas armonizadas y otras especificaciones técnicas a nivel europeo, y para la concesión a un producto de un ETA (European Technical Approval), denominado en la legislación española como DITE (Documento de Idoneidad Técnica Europeo).

Con el avance en el proceso de unificación del mercado interno único, habría un acceso al mercado de más fabricantes, un mayor grado de transparencia y a la creación de las condiciones para un sistema armonizado de reglas generales en la construcción.

Los RE se precisan en primera instancia en documentos interpretativos elaborados por comités técnicos y posteriormente desarrollados mediante especificaciones técnicas. Estas pueden consistir en:

- Normas armonizadas europeas adoptadas por los organismos europeos de normalización (CEN o CENELEC) con arreglo a mandatos de la Comisión y previa consulta al Comité Permanente de la Construcción
- Documentos de idoneidad técnica europeos DITE (o en siglas inglesas European Technical Approval Guideline-ETAG) que valoren la adecuación de un producto para el uso previsto. Estos documentos se aplican cuando no existe norma armonizada, norma nacional reconocida ni mandato de norma europea, y la Comisión considera, previa consulta a los Estados miembros en el seno del Comité Permanente de la Construcción,

que aún no se puede elaborar una norma. Estos documentos son redactados por alguno de los organismos autorizados por EOTA (European Organisation for Technical Approvals) en el que se indica el procedimiento para evaluar las prestaciones de una familia de productos de construcción.

- En tanto no se disponga de una norma europea o de un documento de idoneidad técnica (o guía de ETA), los productos podrán seguir evaluándose y comercializándose según las disposiciones existentes y de conformidad con los RE.

6.1.1. ETA, European Technical Approval

Una ETA, European Technical Approval, denominada en la legislación española como DITE, es una evaluación técnica favorable hecha por una entidad independiente y facultada para hacer esa evaluación, que indica que un producto es adecuado para el uso para el que el fabricante lo ha puesto en el mercado. Esta ETA se emite si tras un proceso de examen al producto se demuestra que se cumplen los Requisitos Esenciales en las obras de edificación para los cuales el producto es utilizado. Cabe resaltar que la ETA se concede, tras la evaluación favorable pertinente, a un producto concreto hecho por un fabricante y obviamente no afecta al resto de productos similares hechos por otros fabricantes, ni siquiera a las variantes del producto que impliquen cambios significativos, que posteriormente ese mismo fabricante cree.

Un fabricante podrá solicitar que un producto de construcción sea evaluado para la concesión de una ETA, si se da alguna de las siguientes circunstancias:

- a. Se trata de un producto para el cual no hay norma armonizada, ni una norma nacional reconocida, ni un mandato de la Comisión Europea para realizar una norma armonizada.
- b. Se trata de un producto cuyas características no entran dentro de una norma armonizada o de una norma nacional reconocida que ya existan; incluso en el caso donde ya la Comisión haya emitido un mandato para que se realice una norma armonizada. En ese caso se puede conceder una ETA para aquel producto para el cual

existe una guía de ETA hasta el momento en que entrase en vigor esa norma armonizada en elaboración.

Una ETA emitida sobre un producto a petición del fabricante es válida en todos los países de la UE. Se emite generalmente por un periodo de cinco años. Pasado este tiempo, puede renovarse. La evaluación se basa en exámenes, ensayos y en una evaluación en base a los documentos interpretativos y las guías existentes para ese producto o familia de productos.

La Comisión es la responsable de emitir mandatos para que se establezcan guías de ETA para un producto o familia de productos. Estas guías contendrán en particular:

- a. Una lista de documentos interpretativos relevantes
- b. Requisitos específicos para los productos, que concreten los generales RE
- c. Procedimientos de ensayo
- d. Métodos de evaluación y criterios para juzgar los resultados de esos ensayos
- e. Los procedimientos de inspección y para dar la conformidad
- f. El periodo de validez de la ETA

6.1.2. Conformidad para el uso de un producto de construcción

Los productos considerados aptos para su uso, serán reconocidos de una manera fácil por el mercado CE, que les permitirá la libre circulación y empleo en toda la Comunidad y que facilita a los Estados Miembros verificar si el producto satisface los preceptivos RE.

La declaración de conformidad del fabricante, o el certificado de conformidad, expedido por un Organismo Notificado, autorizarán al fabricante a imprimir la marca CE correspondiente.

El proceso incluirá procedimientos de control de la producción que hace el fabricante y supervisión, evaluación por ensayos y certificación por terceras partes cualificadas e independientes o por el fabricante mismo.

6.2. La Guía Técnica ETAG 016 para paneles autoportantes

En este apartado se hace un repaso de la información más relevante a efectos de la presente investigación, que puede extraerse del análisis de documento ETAG 016. Parte 1², y ETAG 016. Parte 2³.

Tomando un documento ETAG como referencia, si se satisfacen sus indicaciones a través de los pertinentes exámenes y métodos de evaluación, se llegaría a un ETA (European Technical Approval), o evaluación técnica favorable sobre un producto de construcción.

Esta evaluación favorable se produce, principalmente, cuando ese producto cumple los RE en las obras de construcción en las cuales el producto se instala, que son:

1. Resistencia mecánica y estabilidad
2. Seguridad en caso de incendio
3. Higiene, salud y medio ambiente
4. Seguridad de utilización
5. Protección contra el ruido
6. Ahorro de energía y aislamiento térmico.

El documento ETA permite, junto con el procedimiento de garantía de conformidad, poner el marcado CE en el producto. El procedimiento de garantía de conformidad tiene como objetivo asegurar que las especificaciones del producto indicadas en el documento ETA siguen cumpliéndose por parte del fabricante.

Aunque, como se ha dicho anteriormente, un ETA para un producto debe emitirse en base a los principios de evaluación expuestos en una guía (ETAG) que trate sobre el producto, hay casos en que también sería posible emitir un ETA mediante un procedimiento de evaluación que sea aceptado por los miembros de EOTA, conforme al artículo 9.2 de la Directiva del Consejo 89/106/EEC⁵⁹

Finalmente indicar que en octubre de 2004, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio resuelve la entrada en vigor del marcado CE conforme al DITE para los paneles objeto de la ETAG 016, Partes 1 y 2.

6.2.1. Requisitos Esenciales (RE)

Antes de entrar en detalle sobre cada uno de los RE, cabe señalar que una propiedad o característica de un producto de construcción puede ser relevante solamente para uno de los RE o puede serlo para varios de ellos. Esto tiene su importancia ya que a veces una característica no ha sido analizada o estudiada porque se pensaba en ella solamente bajo el punto de vista de un RE, cuando resulta importante también para otro de ellos. Esto ocurre con las características o propiedades del panel relativas a la durabilidad, que tienen relación con varios de los RE, como se verá más adelante.

Los RE en lo que respecta al panel compuesto ligero autoportante son los siguientes:

Requisito Esencial 1. Resistencia mecánica y estabilidad. En el caso de los paneles que no soportan cargas estructurales, como es el caso del panel compuesto ligero autoportante, la resistencia mecánica se considera bajo el RE4, seguridad al uso.

Requisito Esencial 2. Seguridad en caso de incendio y limitación de la generación y difusión de fuego y humo. En la Directiva del Consejo 89/106/EEC se indica que las obras de construcción deben diseñarse y construirse de tal manera que en caso de incendio se cumpla lo siguiente:

- La capacidad portante de carga debe mantenerse durante un periodo de tiempo a especificar
- La generación y difusión de fuego y humo dentro del recinto estará limitada
- La difusión del fuego a construcciones vecinas estará limitada
- Se considerará que los ocupantes puedan abandonar el edificio o ser rescatados por otros medios
- La seguridad de los equipos de rescate será tenida en cuenta.

Por lo tanto las características relevantes bajo este requisito son las siguientes:

- Reacción al fuego
- Resistencia al fuego
- Comportamiento respecto a fuegos externos

El comportamiento del panel y de sus componentes frente a estos requisitos será conforme a la legislación, regulaciones y disposiciones administrativas aplicables al uso pretendido del panel. El comportamiento del panel se expresará en forma de una clasificación específica según norma.

Requisito Esencial 3. Higiene, salud y medio ambiente. Se exige al panel que tenga unas prestaciones en referencia a los siguientes fenómenos:

- a. Permeabilidad al agua: los paneles se diseñarán para resistir el paso de agua de manera que se eviten los efectos perniciosos sobre la edificación o sobre la salud de los ocupantes con la excepción de aquellas ocasiones en que se hayan previsto otros elementos que tengan la misión de evitar esta problemática.
- b. Permeabilidad al vapor. El panel, incluyendo sus juntas, se diseñará para minimizar el riesgo de niveles dañinos de condensación superficial o intersticial debido a la permeabilidad al vapor de los materiales. Se evitará que pueda darse el fenómeno de puente térmico que cause condensación de vapor de agua con el consiguiente efecto sobre higiene, salud y medio ambiente.
- c. Liberación de sustancias peligrosas. El panel será tal que su instalación no cause emisiones dañinas de gases tóxicos, partículas peligrosas o radiación al medio ambiente interior al edificio, ni contaminación en el ambiente exterior, en el aire, en la tierra o en el agua.
- d. Variación dimensional (relativa a la penetración por agua). Los paneles deben tener una adecuada resistencia a sufrir deformaciones inadmisibles, como por ejemplo el arqueado, la merma dimensional, la formación de oquedades. Todo ello puede ser causado por la temperatura y/o la humedad, y la razón por la que no debe producirse es la de evitar la penetración del agua.

Requisito Esencial 4. Resistencia mecánica y estabilidad. Se cumplirá la resistencia mecánica, la resistencia al impacto y la resistencia de las fijaciones. Las características a verificar para cumplir con la obligación de la seguridad al uso son las siguientes:

- a. Resistencia mecánica: el panel compuesto ligero autoportante tendrá una adecuada resistencia a cargas estáticas y dinámicas y estará de acuerdo con los requisitos de seguridad para las acciones especificadas en las regulaciones sobre construcción de relevancia nacional. Las acciones relevantes a ser consideradas son el peso propio, la carga de viento, la carga de nieve y los gradientes de temperatura.
- b. Resistencia al impacto: los paneles tendrán la suficiente resistencia para soportar cargas dinámicas procedentes de objetos o personas que accidentalmente caen sobre el panel o contra él.
- c. Resistencia a las fijaciones. Se tiene por una parte la resistencia del panel en su unión a los elementos de fijación y a las juntas entre paneles. A este respecto se le exige que tenga una resistencia adecuada a cargas estáticas y dinámicas en los puntos donde se une a los elementos de fijación y en las juntas. Por otra parte también se le exige que resista las cargas excéntricas debidas a objetos fijados al panel, es decir que tenga suficiente resistencia mecánica y estabilidad para resistir cargas excéntricas procedentes de la acción de objetos pesados tales como mobiliario, sin poner en peligro la seguridad de los ocupantes del edificio.
- d. Caminabilidad: los paneles para tejados o para techos tendrán la resistencia adecuada para soportar el tráfico ocasional debido a accesos por labores de mantenimiento, sin que esto resulte en deformaciones permanentes residuales.

Requisito Esencial 5. Se le pide al panel un nivel de protección acústica que se traduce en el comportamiento frente a dos fenómenos acústicos:

- a. Aislamiento a sonido directo transmitido por vía aérea: el panel, incluyendo sus juntas, tendrá el necesario nivel de aislamiento acústico aplicable al uso pretendido de la construcción, por ejemplo ruido procedente de carreteras, industrias o tráfico aéreo.

- b. Absorción sonora: las superficies internas de los paneles tendrán que cumplir con unas mínimas prestaciones de comportamiento a absorción sonora.

Requisito Esencial 6. Ahorro energético y conservación del calor. Este requisito se comprueba según dos características a verificar:

- a. Propiedades de aislamiento térmico: los paneles usados como cerramiento externo o en muros internos, en ambientes separados a diferentes temperaturas, tendrán el necesario aislamiento térmico para satisfacer las regulaciones nacionales. Las características relevantes a considerar son la transmitancia térmica o la resistencia térmica. Se evitarán los puentes térmicos, causantes de pérdidas relevantes de energía.
- b. Permeabilidad del aire: el paso del aire, a través de la disposición del panel (incluidas sus juntas), desde el ambiente externo al interno o entre ambientes a diferentes temperaturas quedará limitado. Habrán de cumplirse las normas nacionales de edificación. Esta es una característica también conectada con el RE3.

Además de estos requisitos esenciales se exige al panel diversos aspectos relacionados con la durabilidad y con la capacidad de cumplir con el uso esperado.

En lo que respecta a la durabilidad, habrá de asegurarse que el deterioro de los materiales y componentes no afecta al comportamiento del panel en relación con los RE durante toda la vida esperada de trabajo del panel. Los materiales constituyentes del panel serán química y físicamente compatibles entre sí.

En lo referente a la capacidad para cumplir con el servicio que se espera de él, éste tendrá la suficiente rigidez como para evitar deflexiones inaceptables, vibraciones y deformaciones causadas por un uso normal, de manera que se cumplan las exigencias existentes en las respectivas regulaciones nacionales sobre construcción.

Determinados los RE y concretadas las características a tener en cuenta para cumplir cada uno de ellos, el siguiente paso es el estudio de los métodos de verificación de los mismos; estos métodos pueden consistir en ensayos, cálculos u otros conocimientos provenientes de la

experiencia; incluso existe la posibilidad de trabajar con datos disponibles procedentes de ensayos realizados con anterioridad o bajo otras normas nacionales.

6.2.2. El panel compuesto ligero autoportante y sus usos

El panel compuesto ligero autoportante de que trata este documento ETAG 016, es un panel prefabricado que no soporta cargas de importancia estructural para el edificio y que las cargas que soporta las transmite a los soportes estructurales. Se utiliza en tejados, muros externos, muros internos y techos o recubrimientos de muros, como un elemento que actúa cubriendo el edificio

Es usual que se especifique su uso acompañado de elementos flexibles tales como lengüetas o similares para ser adicionadas en las ranuras de separación entre unidades colocadas. También se suelen especificar materiales sellantes para hermetizar aun más estas juntas. Estos elementos evitarían el paso del polvo, humedad y gases o al menos lo limitarían.

En cuanto al ámbito de aplicación, esta guía cubre los paneles compuestos ligeros autoportantes con una o dos pieles hechas con una gran variedad de materiales, orgánicos, minerales o metálicos, ensamblados, con o sin armazón interno y con un núcleo que puede actuar como aislante térmico y unido a una de las pieles al menos. Esta ETAG no cubre los paneles sándwich con doble piel de metal que están cubiertos por la EN 14509⁶¹, ni los productos de vidrio que están cubiertos por la CEN/TC 129, como tampoco algún otro producto denominado usualmente como panel.

La guía está dividida en cuatro partes; la primera de las cuales trata de aspectos generales, mientras que las demás tratan de aspectos específicos relativos a diferentes campos o aplicaciones:

- Parte 1: General
- Parte 2: Paneles compuestos ligeros autoportantes para uso en cubiertas
- Parte 3: Paneles compuestos ligeros autoportantes para uso en muros externos y paneles externos empleados como revestimientos.

- Parte 4: Paneles compuestos ligeros autoportantes para uso en muros internos y techos.

Aquellos paneles compuestos que tienen función de resistencia mecánica o de estabilidad para las acciones principales que operan sobre un edificio, debido a que soporta otros elementos estructurales o porque tienen influencia significativa en la resistencia de las cargas principales del edificio (bien las horizontales o bien las verticales), no están cubiertos por esta guía. En tal caso y si el panel compuesto está basado en elementos de madera, aplicaría la guía ETA ETAG 019⁶².

En cuanto al panel para uso en tejados, éste puede colocarse tanto en cubiertas horizontales como en cubiertas inclinadas, no considerándose ya como tales aquellos que tengan una inclinación de más de 70 grados con respecto a la horizontal, en cuyo caso ya se consideran paredes o muros. Un tejado ha de clasificarse conforme a una de estas cuatro categorías de uso:

- a. Categoría de uso A1. Es un tejado no accesible ni siquiera para el propio proceso de su instalación. Los paneles colocados en estos tejados se dispondrán inclinados y llevarán algún elemento adicional que los cubra, como por ejemplo teja o pizarra.
- b. Categoría de uso A2. Se trata de un tejado accesible para acciones de instalación del mismo y para su mantenimiento únicamente; y esto con medidas de protección. Como de accesible es el panel de cubierta dependerá de la resistencia al impacto del conjunto de paneles dispuestos sobre el mismo y de sus características de caminabilidad. Este último concepto se analiza detalladamente más adelante. No obstante el acceso estará limitado a una única persona cada vez, y con las debidas precauciones. Se considera además que el acceso no será de una frecuencia mayor de una vez al mes.
- c. Categoría de uso A3. Tejado accesible con medidas de protección. Como en el caso de la categoría anterior, la accesibilidad del panel de tejado dependerá de la resistencia al impacto del conjunto de paneles dispuestos sobre el mismo y de sus características de caminabilidad. El acceso a los paneles dispuestos en el tejado se hará con medidas de protección y estará limitado a una única persona cada vez, que se asegurará de tomar

las debidas precauciones. No está específicamente limitada la frecuencia de acceso a estos tejados.

- d. Categoría de uso A4. Tejado accesible sin medidas de protección. También en este caso la accesibilidad del panel de tejado dependerá de la resistencia al impacto del conjunto de paneles dispuestos sobre el mismo y de sus características de caminabilidad. Si no se disponen medidas de protección, los paneles de tejado deben haber superado una evaluación favorable en lo que respecta a sus propiedades de caminabilidad. Sin embargo el acceso a los paneles dispuestos en el tejado también estará limitada a una única persona y tomando las debidas precauciones.

Cabe indicar que las precauciones de seguridad a tener en cuenta consistirán en tableros de madera o planchas dispuestas sobre los paneles de manera que distribuyan la carga uniformemente sobre la superficie de los paneles, y de esta manera se eviten los esfuerzos locales concentrados excesivos

6.2.3. Verificación de los Requisitos Esenciales en el panel compuesto

Como se ha visto, el panel ha de cumplir con aquellos aspectos del comportamiento que satisfagan los Requisitos Esenciales. En el caso de la valoración de la durabilidad, ésta conecta transversalmente con todos los RE, como se verá más adelante.

En lo que respecta a la presente investigación se ha considerado de mayor importancia algunos de los aspectos vinculados al RE4 que otros aspectos vinculados con otros RE, y por lo tanto han quedado fuera del estudio o de la valoración.

Por lo tanto no se considera relevante el estudio de la variación con el envejecimiento de las características vinculadas al RE2, referido a la limitación de la emisión y dispersión del fuego y humo; al RE3, referido a la emisión por parte del panel de componentes volátiles orgánicos u otros contaminantes al aire; al RE5 que versa sobre propiedades acústicas del panel, ni al RE6 sobre el aislamiento térmico y consumo de energía ahorrada por el panel.

Sin embargo sí se considerará la relación entre el envejecimiento y el RE1 que trata sobre la resistencia mecánica y la estabilidad y el RE4 que trata sobre la seguridad de utilización. No

obstante, dado que este panel no es un elemento portante de cargas estructurales, la resistencia mecánica se considera bajo el RE4, seguridad al uso, que específicamente trata de la resistencia mecánica, la resistencia al impacto y la resistencia de los elementos que fijan el panel al resto del edificio, como por ejemplo los tornillos que lo unen a las correas.

Cabe destacar que para algunos de los aspectos particulares del panel, la ETAG 016 admite que el estado actual del arte no asegura la existencia de métodos de verificación detallados ni sus correspondientes criterios técnicos de aceptación de los resultados de estos procesos de verificación.

En el ámbito de la presente investigación, los RE exigibles al panel compuesto ligero autoportante que han de entrar a formar parte de la evaluación del estado del panel sometido a envejecimiento, implican que se verifiquen las siguientes cuestiones:

- a. Seguridad al uso: resistencia mecánica
- b. Seguridad al uso: resistencia al impacto
- c. Seguridad al uso: resistencia de las fijaciones
- d. Seguridad al uso: caminabilidad
- e. Comprobación de diversos aspectos relativos a la durabilidad y a la capacidad para cumplir con el servicio que se espera de él.

Hay que indicar que la evaluación de los paneles compuestos ligeros autoportantes, se hace bajo la presunción de que el sustrato, soporte o estructura sobre la que se instala no pone en riesgo ninguno de los RE cuando se tiene una disposición de paneles.

6.2.4. Verificación de la resistencia mecánica

En la ETAG 016 se indica que los paneles compuestos ligeros autoportantes tendrán una adecuada resistencia a cargas dinámicas y estáticas y que cumplirán los requisitos de seguridad de obras especificadas en las regulaciones nacionales sobre construcción. También se indica que las cargas relevantes a ser consideradas serán normalmente las cargas de peso propio, las cargas de viento, las cargas de nieve y los gradientes de temperatura.

En cuanto al método para comprobar o verificar la resistencia mecánica, esto se hará bien a través de cálculos o bien a través de ensayos, que seguirán normas europeas EN. En el caso de los ensayos, éstos abarcarán los valores extremos de todos los parámetros, permitiéndose el uso de la interpolación cuadrática entre resultados de test. Los parámetros a considerar son:

- Configuración estática: uno o dos vanos o cualquier configuración particular definida por el fabricante
- Dirección de la carga: positiva o negativa
- Espesor y propiedades del material de las caras y del núcleo
- Tipo y disposición de los elementos de fijación del panel

Los ensayos indicados son:

- Ensayo para determinar la resistencia mecánica de un panel simplemente apoyado sometido a carga positiva.
- Ensayo para determinar la resistencia mecánica de un panel instalado y fijado, sometido a carga negativa
- Ensayo para determinar el efecto de la temperatura en un panel.

6.2.5. Verificación de la resistencia al impacto

La guía ETAG 016 indica que los paneles han de ser capaces de resistir las cargas dinámicas de objetos o personas que accidentalmente caigan sobre ellos; los ensayos indicados para la comprobación de esta característica son los siguientes:

- Ensayo de resistencia al impacto por cuerpo duro
- Ensayo de resistencia al impacto por cuerpo blando

6.2.6. Verificación de la resistencia de las fijaciones

En este caso se tienen que cumplir dos exigencias:

- La resistencia del panel a los elementos de fijación y juntas. El panel resistirá cargas estáticas y dinámicas en los puntos donde estén los elementos de fijación y las juntas. Las acciones a considerar serán el peso propio, el viento, la nieve y los gradientes de temperatura.

- La resistencia por cargas excéntricas causadas por objetos fijados al panel. El panel tendrá la suficiente resistencia mecánica y estabilidad para resistir estas cargas causadas por objetos pesados, tales como objetos de mobiliario, y esto sin poner en peligro la seguridad de los ocupantes.

Los ensayos indicados para la comprobación de esta característica son los siguientes:

- Ensayo de resistencia del panel a los elementos de fijación y juntas
- Ensayo de resistencia por cargas excéntricas causadas por objetos fijados al panel.

6.2.7. Verificación de la caminabilidad

Los paneles para tejados o techos presentarán la necesaria resistencia para soportar el tráfico ocasional causado por personas que acceden para llevar a cabo acciones de mantenimiento sobre las cubiertas, y esto sin deformaciones permanentes.

El ensayo de caminabilidad da información acerca de la seguridad al uso de paneles de tejado con respecto al hecho de que una persona pueda caminar sobre ellos. El ensayo se realizará con la mayor longitud de vano que se especifique para una disposición real.

6.2.8. Verificación de la durabilidad y de la capacidad de servicio

En cuanto a la durabilidad, los paneles habrán de asegurar que el deterioro de los materiales y componentes no afecta al rendimiento del panel en relación a los RE, durante la vida de trabajo que se le supone.

La durabilidad del panel debe evaluarse como una merma de las características existentes tras los ensayos de envejecimiento indicados en las normas ISO 15686, partes 1 y 2. Asimismo la

durabilidad de los materiales del panel será evaluada de acuerdo a normas reconocidas para cada producto y material. Los agentes relevantes que han de considerarse son:

- Agentes mecánicos tales como la gravedad o vibraciones
- Agentes electromecánicos, tales como radiación o electricidad
- Agentes térmicos tales como congelación/descongelación o choque térmico
- Agentes químicos tales como disolventes, ácidos, sales o bases.
- Agentes biológicos.

En lo que respecta a la durabilidad cabe aclarar previamente algunos conceptos:

Vida de la edificación: Es el periodo de tiempo durante el cual se mantiene el correcto comportamiento de la edificación a un nivel compatible con el cumplimiento pleno de los Requisitos Esenciales.

Vida del producto: Es el periodo de tiempo durante el cual se mantiene el correcto comportamiento del producto, bajo las correspondientes condiciones de servicio, a un nivel compatible con las condiciones de uso que se le suponen.

Mantenimiento: son las medidas preventivas y de otro tipo que se aplican a la edificación con el objetivo de capacitarla para cumplir sus funciones durante la vida de la edificación. Estas medidas incluyen limpieza, repintado, reparación, reemplazar partes de la obra que así lo necesiten, etc.

Mantenimiento normal: el mantenimiento incluye normalmente inspecciones, que serán tales que el coste de la intervención que tiene que hacerse no es desproporcionada respecto al valor de la parte de la edificación de la que se trate.

Durabilidad de un producto: es la capacidad de un producto para contribuir a la vida de la edificación en base a que mantiene su comportamiento bajo las correspondientes condiciones de servicio a un nivel compatible con el cumplimiento de los RE del edificio.

En la guía ETAG 016 se asume que la vida de trabajo que se le supone a un panel es de 10 años para aquellos paneles que son fácilmente reemplazables, y de 25 años para el resto. Esto siempre que se usen adecuadamente y se haga el mantenimiento apropiado. No obstante en la guía misma se indica que se espera que cuando ese tiempo haya transcurrido, la vida real de trabajo en condiciones normales de uso sea considerablemente mayor sin que se produzca una degradación que afecte a los RE.

Se subraya que los RE deben satisfacerse para toda la vida en servicio, siempre que se cumpla el mantenimiento normal que haya de hacerse. Los RE siempre se comprenden en el marco de la concurrencia de acciones predecible.

Respecto a la capacidad para cumplir las especificaciones supuestas, el panel tendrá la suficiente rigidez para evitar flexiones inaceptablemente altas, vibraciones y deformaciones en general. Habrán de cumplirse las exigencias que aparecen en la normativa nacional existente. Más concretamente, los paneles habrán de resistir a lo largo del tiempo las cargas excéntricas debidas a objetos ligeros tales como cuadros o pinturas, lámparas o pequeños elementos de mobiliario.

Los ensayos que se llevan a cabo para evaluar la durabilidad son:

- Ensayo de fluencia.
- Ensayo de agentes biológicos
- Ensayos de acabados.
- Ensayo de agentes térmicos. Que a su vez se realiza a través de dos tipos de ensayos diferenciados:
 - Los ensayos de ciclos climáticos
 - El ensayo de impacto térmico

Ensayos de ciclos climáticos y sus criterios de valoración

Por su relevancia en este trabajo se detallarán estos ensayos. Este método de evaluación del envejecimiento del panel y de los materiales que lo constituyen, consiste en la medición de los cambios que se producen en la resistencia a tracción perpendicular a las caras en los diferentes

juegos de probetas que han sido sometidos a distintos ciclos climáticos. Los ciclos climáticos propuestos son tres y son independientes entre sí; se denominan respectivamente Ciclo 1, Ciclo 2 y Ciclo 3.

Todas las probetas necesarias para el ensayo de durabilidad se tomarán del mismo panel, tanto si se realizan los ensayos empleando solamente uno de los ciclos propuestos o si se realizan para los tres ciclos. En lo que se refiere al ensayo de resistencia a la tracción perpendicular a las caras, éste se lleva a cabo en probetas de 100 mm x 100 mm tomadas de la zona central del panel y tras cuatro semanas de la fabricación del mismo. El espesor es el de todo el panel.

Antes de la realización de los ensayos, las probetas han de almacenarse durante 24 horas a 23 °C en condiciones normales de laboratorio. El ensayo de tracción perpendicular a las caras se realiza inicialmente sobre el juego de probetas que no ha sufrido envejecimiento; el valor de la resistencia así obtenida se denomina R_0 y se calcula como la resistencia media del juego de probetas ensayado. También se inspeccionará y registrará visualmente la probeta tras la rotura prestando especial atención al tipo de fallo, como por ejemplo fallo cohesivo del núcleo, fallo por unión adhesiva en alguna de las superficies encoladas, proporción de área de fallo del adhesivo, etc.

El ensayo de tracción perpendicular se hará bajo condiciones normales de laboratorio (23 ± 2) °C, (50 ± 5) % de humedad. La tensión de rotura se determinará con ambas caras del panel en su ubicación.

Ciclo 1

El Ciclo 1, también denominado ensayo de temperatura, necesita de un número de probetas consistente en un grupo inicial de 5 probetas más otros 5 juegos de 5 probetas cada juego.

La parte de ensayo climático se lleva a cabo en una cámara mantenida a una temperatura constante de (90 ± 2) °C y condiciones de ambiente seco, es decir humedad relativa menor del 15%.

Se ensaya a tracción perpendicular el primer grupo de probetas tomadas tras la fabricación y mantenidas durante una semana almacenadas bajo condiciones normales de laboratorio. El segundo juego de probetas se ensaya a tracción perpendicular tras haber sido mantenido

durante 1 semana en la cámara climática. El tercer juego de probetas se ensaya a tracción perpendicular tras permanecer 3 semanas en cámara climática. El cuarto juego a las 6 semanas. El quinto juego a las 12 semanas. El sexto juego a las 24 semanas.

A la mínima de todas las tensiones de rotura obtenidas se la denomina $R_{CICLO 1}$. Este valor mínimo suele darse en uno de los ensayos tras 24 semanas en cámara climática, pero hay ocasiones en que se da en otro de los juegos que ha permanecido menos tiempo en cámara. Por lo tanto es necesario llevar a cabo los ensayos intermedios a 3, 6 y 12 semanas para registrar los cambios en la tensión de rotura.

Ciclo 2

El Ciclo 2, también denominado ensayo de humedad, necesita de un número de probetas consistente en un grupo inicial de 5 probetas y 3 juegos de 5 probetas cada uno.

Se emplea una cámara que mantenga condiciones constantes de temperatura del aire (65 ± 3) °C y humedad relativa del 100%. Estas condiciones se consiguen con agua en ebullición en el fondo de la cámara.

Se ensaya a tracción perpendicular el primer grupo de probetas tomadas tras la fabricación, sin que hayan sufrido el Ciclo 2. El valor de tensión de rotura obtenido se nombra como R_0 .

Otro de los juegos de probetas se expone al Ciclo 2 durante 7 días. Después de este envejecimiento las muestras se almacenan hasta que la masa se estabiliza bajo condiciones ambientales de laboratorio, lo que se considera alcanzado, para el propósito de este ensayo, cuando el cambio en la masa, entre dos pesadas consecutivas llevadas a cabo con un intervalo de 24 horas, es menor del 1% de la masa total. El valor de tensión de rotura obtenido se nombra como R_7 .

Un segundo juego de probetas se expone al Ciclo 2 durante 28 días. Estas probetas se ensayarán de la misma manera que el juego anterior. El valor de tensión de rotura obtenido se denota como R_{28} . Si los resultados del ensayo muestran un continuo declinar de la tensión de rotura según avanza el tiempo, se expone al Ciclo 2 otro grupo de probetas durante 56 días, denominándose R_{56} al valor de rotura obtenido.

Ciclo 3

El Ciclo 3, también denominado ensayo de temperatura y humedad, precisa de un grupo inicial de 5 probetas y de otros 5 juegos de 5 probetas.

Se necesita disponer de una cámara con condiciones constantes de temperatura de (70 ± 2) °C y humedad relativa mayor del 90%; de una segunda cámara con condiciones de temperatura de (90 ± 2) °C y condiciones de secado, es decir humedad relativa menor del 15%; y de una tercera cámara a la temperatura constante de (-20 ± 2) °C. El ensayo consiste en la repetición del ciclo consistente en esta sucesión de condiciones climáticas:

- 5 días a (70 ± 2) °C y 90% de humedad relativa
- 1 día a (-20 ± 2) °C
- 1 día a (90 ± 2) °C bajo condiciones secas

El tiempo en transferir el juego de probetas desde una de las condiciones climáticas a la siguiente, no será mayor de 5 minutos. No obstante se permite la utilización de una misma cámara climática que proporcione la sucesión de los diferentes estados climáticos. En tal caso el cambio de un estado climático a otro se realizará en un lapso de una hora cuando se trata de ir a temperatura superior, y en un lapso de dos horas cuando se trata de ir a una temperatura inferior.

El ensayo se realiza de la siguiente manera: se expone un juego de probetas al ciclo anteriormente explicado (consistente a su vez en tres estados climáticos); tras ello, las probetas se almacenan hasta que la masa se estabiliza bajo condiciones ambientales de laboratorio, lo cual se considera alcanzado cuando la variación de la masa entre dos pesadas consecutivas, realizadas con un intervalo de 24 horas, es menor del 1% de la masa total. Se determina la tensión de rotura y el valor así obtenido se denota como R_J .

Un segundo grupo de probetas se expone a 5 ciclos de tres estados climáticos cada uno. Estas probetas serán acondicionadas y posteriormente medido su valor de rotura, que se denotará como R_5

Si los resultados del ensayo muestran un continuo declinar en la tensión de rotura conforme avanza la exposición climática, otro grupo más de probetas se expondrán a ensayo de 10 ciclos. Estas probetas entonces se acondicionaran y ensayarán, denotándose el valor de rotura como R_{10} .

En cuanto a la elección del ciclo más apropiado de entre los tres para someter a estudio un panel compuesto, habrá de seleccionarse el ensayo apropiado en función del tipo de material del núcleo. Se aconseja que se actúe de la siguiente manera:

- Si el material del núcleo es XPS, EPS o MW, se ensayará conforme al Ciclo 2.
- Si el material del núcleo es PUR, se ensayará conforme al Ciclo 1
- Si el material del núcleo es de otro tipo no especificado en los apartados anteriores, pero se trata de un material aislante, se ensayará conforme al Ciclo 1, al Ciclo 2 y al Ciclo 3
- Si el material del núcleo es de otro tipo no especificado anteriormente, y no se trata de un material aislante, se ensayará según la norma EN 29142.

En cuanto a la manera de realizar el ensayo perpendicular a las caras para obtener el valor de la carga de rotura para las probetas sometidas a envejecimiento conforme a los ciclos climáticos, éste se puede llevar a cabo de una de estas dos maneras:

- Manteniendo en las probetas las caras del panel para así determinar la resistencia a tracción de la unión entre las caras y el núcleo, para confirmar la correcta fuerza adhesiva.
- Antes de que las caras estén unidas y así determinar la resistencia a tracción del núcleo.

En general resulta de gran importancia el análisis de la unión del núcleo con las caras, y por lo tanto el ensayo debería ser llevado a cabo manteniendo las caras intactas y observando que el fallo no tenga lugar en la capa adhesiva. Las probetas de sección transversal cuadrada se prepararán y unirán a unos platos rígidos mediante un adhesivo de ensayo adecuado para asegurar la tensión a tracción uniforme sobre el área de la probeta.

La experiencia dice que los mejores resultados se obtienen con probetas grandes, y se recomienda que, al menos, el ancho de la probeta sea de 100 mm, si es posible. En la *figura 2.27* se puede ver un esquema del ensayo.

El ensayo se lleva a cabo cargando la probeta e incrementando el esfuerzo de tracción de manera adecuada. El ratio de deformación tendrá un valor mínimo del 1% por minuto, y un máximo del 3% por minuto. La tensión de rotura se obtendrá como la carga dividida entre la sección. Del desarrollo del ensayo y el posterior análisis de la probeta ensayada, se concluirá si el fallo ha ocurrido por rotura de material o por fallo de la unión adhesiva.

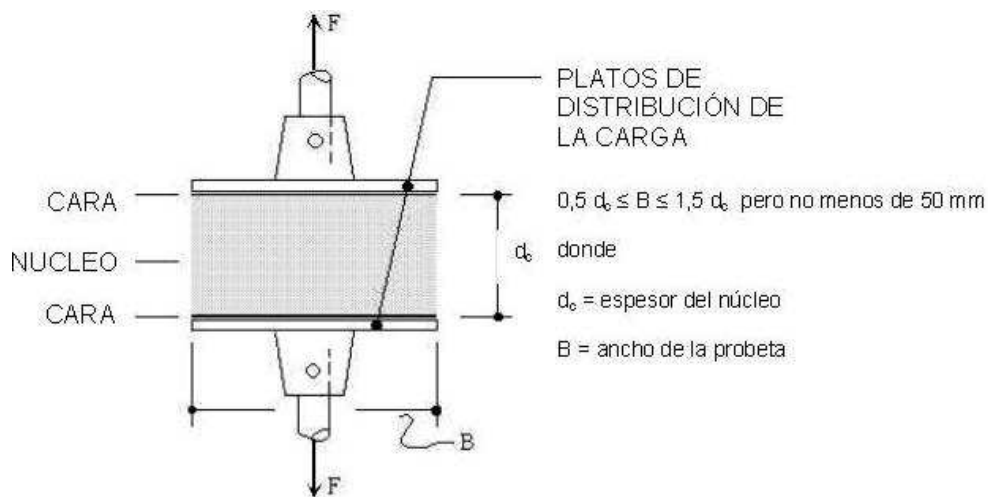


Figura 2.27. Disposición del ensayo de resistencia a tracción.

Respecto a la valoración global de los ensayos de ciclos climáticos, los criterios de superación de los mismos, propuestos por la ETAG 016, son los siguientes:

Ciclo 1:

- $R_{CICLO 1}$, que es el valor mínimo de entre todos los ensayos de tracción perpendicular realizados, ha de ser mayor o igual que el 50% de la resistencia a tracción perpendicular para el caso del juego de probetas no envejecido, R_0 .
- El valor característico al 5% de la resistencia a tracción para R_{24} no será inferior a 0,04 MPa.

- Tanto en la zona central de las probetas, como en los bordes, el cambio en el espesor de las secciones no será mayor del 5%

Ciclo 2:

- Ha de cumplirse, para las diferencia entre las resistencias de los ensayos a tracción perpendicular, los siguientes resultados:

$$R_7 - R_{28} \leq 3 \cdot (R_0 - R_7)$$

$$R_{28} \geq 0,4 \cdot R_0$$

- En caso de no cumplirse estas dos indicaciones, el ensayo continuará hasta los 56 días, siendo entonces esos dos criterios de aceptación sustituidos por los siguientes:

$$R_{28} - R_{56} < R_7 - R_{28}$$

$$R_{56} \geq 0,4 \cdot R_0$$

Ciclo 3:

- Ha de cumplirse, para las diferencia entre las resistencias de los ensayos a tracción perpendicular, los siguientes resultados:

$$R_1 - R_5 \leq 4 \cdot (R_0 - R_1)$$

$$R_5 > 0,4 \cdot R_0$$

- En caso de no cumplirse estas dos indicaciones, el ensayo continuará durante 10 ciclos mas, siendo entonces estos dos criterios de aceptación sustituidos por los siguientes:

$$R_5 - R_{10} < R_1 - R_5$$

$$R_{10} > 0,4 \cdot R_0$$

6.3. La Norma UNE-EN 14509 de paneles sándwich de caras metálicas.

6.3.1. Introducción

La norma UNE-EN 14509⁶¹ especifica los requisitos exigibles a los paneles sándwich aislantes de doble cara metálica y autoportantes, destinados a las siguientes aplicaciones:

- a. Cubiertas y revestimientos de techos

- b. Paredes exteriores y revestimientos de paredes
- c. Paredes (incluyendo tabiques) y techos en el interior de edificios

Se incluyen en el objeto de esta norma los paneles cuyo núcleo aislante sea poliestireno expandido, espuma de poliestireno extrusionado (XPS), poliuretano rígido, espuma fenólica, vidrio celular o lana mineral. Cabe indicar la importancia que se da, en esta norma, a la adhesión entre el núcleo y las caras del panel, y su papel fundamental para que el panel se comporte de forma satisfactoria. Para ello es importante la preparación de la superficie del material de las caras, que será la apropiada para el adhesivo o método de adhesión utilizados.

6.3.2. Resistencia a la tracción perpendicular a las caras del panel

La resistencia a tracción perpendicular a las caras del panel deberá obtenerse mediante ensayo según la norma EN 1607⁶³. Si el valor de resistencia es bajo, el panel puede fallar prematuramente según el modo de fallo denominado “wrinkling” (arrugamiento). No obstante, la norma indica que este modo de fallo solamente es relevante, en el caso de los paneles de caras metálicas, cuando se trata de caras planas o ligeramente perfiladas.

6.3.3. Durabilidad por reducción de la resistencia a la tracción debida a envejecimiento

En lo que respecta a la durabilidad y al comportamiento a largo plazo, se estudian los dos fenómenos siguientes:

- a. La resistencia a cargas puntuales y de tránsito, en paneles de cubierta
- b. La reducción de la resistencia a la tracción debida al envejecimiento

La influencia del envejecimiento en los paneles sándwich o en sus materiales constituyentes se ensaya midiendo como cambia la tracción perpendicular a las caras en el panel, ensayada según la EN 1607. Se define la durabilidad como ese cambio de la resistencia a la tracción en probetas sometidas a ciclos climáticos.

Los ensayos de durabilidad se deben aplicar a paneles diseñados para aplicaciones exteriores, aunque pudieran utilizarse para evaluar el comportamiento de paneles sándwich para usos interiores.

Estos ensayos se basan en el efecto de envejecimiento acelerado debido a la temperatura o la humedad críticas para cada material de núcleo a partir de la experiencia a largo plazo. En el caso de los paneles con núcleo de poliestireno (bien EPS o bien XPS), se aconseja restringir su uso a aquellas aplicaciones donde las temperaturas no superen los 80 °C.

Los paneles se ensayarán según el método de ensayo de durabilidad adecuado, bien el denominado DUR1 o bien el denominado DUR2, descritos en el anexo B de la norma. Tras el ensayo correspondiente habrán de satisfacerse los criterios de aceptación de la reducción de la resistencia a la tracción. Así, por ejemplo, si el núcleo es de poliestireno (XPS o EPS) el método de ensayo será DUR1. En el caso de que el material del núcleo fuera lana mineral (MW) el método de ensayo sería el DUR2, y para panel con núcleo de poliuretano el ensayo adecuado sería el DUR1.

Se tiene además el ensayo denominado ensayo de la cuña que estudia la adhesión entre los adhesivos y el recubrimiento superficial de la parte interna de las caras. Este ensayo de la cuña no resulta de aplicación para la investigación que aquí se trata.

Las probetas para ensayo se extraerán todas de un mismo panel y tras cuatro semanas después de haber sido fabricado éste. El ensayo de tracción perpendicular se lleva a cabo a una velocidad de extensión de 10 mm/min.

Tras la realización del ensayo se indicará cualquier observación visual interesante, especialmente el tipo de fallo: fallo de cohesión en el núcleo, fallo de la unión adhesiva entre las caras y el núcleo, fallo entre la cara y su recubrimiento, etc.

1. Ensayo DUR1

El ensayo DUR1 se realizaría sobre paneles en los que se sabe que la causa principal del envejecimiento es el efecto de la temperatura, y se realiza a una temperatura determinada que

está relacionada con la que el panel puede alcanzar en su ubicación. Esto es, si la cara expuesta al exterior es de un color oscuro, la temperatura de ensayo será de 90°C. Si es de un color claro, será de 75 °C, y si es de un color muy claro, será de 65 °C.

Este ensayo guarda mucha similitud con el denominado ensayo de Ciclo 1 recomendado por la ETAG 016, excepto en que el valor de la temperatura no es de 90°C, sino que depende del color de la cara externa del panel tal como se ha indicado anteriormente. Se utiliza una cámara de ensayo con una temperatura constante de $(T \pm 2)$ °C y un ambiente seco, es decir con una humedad relativa por debajo del 15%.

Se ensayan a tracción un juego de probetas que no ha sufrido el envejecimiento climático descrito y que habría permanecido estabilizado durante 1 semana en condiciones normales de laboratorio. También se ensayaría a tracción perpendicular un segundo juego que habría sufrido las condiciones climáticas durante 6 semanas; de la misma manera se actuaría con un último juego que habría permanecido 24 semanas en las condiciones climáticas del ensayo.

El criterio para considerar superado exitosamente el ensayo de durabilidad consiste en que se cumplan las siguientes relaciones:

- $\text{MIN}(f_{C16}, f_{C24}) \geq 0,5 * f_{C10}$
- $\text{MIN}(f_{C16}, f_{C24}) \geq 0,02 \text{ MPa}$
- El cambio de espesor de las secciones a T °C en el procedimiento de ensayo DUR1 no será mayor del 5% en la zona central y en los bordes.

Donde f_{C10} es el valor de resistencia obtenido para el juego de probetas que no ha sufrido las condiciones climáticas y $\text{MIN}(f_{C16}, f_{C24})$ es el mínimo de entre el valor medio de resistencia a la tracción perpendicular a las caras obtenido tras condiciones climáticas durante 6 semanas y tras condiciones climáticas tras 24 semanas.

2. Ensayo DUR2

Este ensayo se realizaría sobre paneles en los que se conoce que el efecto de la humedad es la causa principal del envejecimiento. Este ensayo es prácticamente igual al denominado Ciclo 2 de la ETAG 016. Las condiciones climáticas que habrán de mantenerse en la cámara climática

de ensayo serían las siguientes: temperatura del aire (65 ± 3) °C y una humedad relativa del 100%, conseguida mediante el calentamiento del agua en el fondo de la cámara.

Se ensayan seis probetas para la determinación de la resistencia a la tracción inicial; el valor medio de la resistencia a la tracción obtenida a partir de esas muestras iniciales se denomina f_{C10} . Después se ensayarían otras cinco probetas que hubieran permanecido en las condiciones climáticas descritas durante 7 días; el valor medio de resistencia a la tracción se denominará f_{C17} . Posteriormente se procedería de igual manera con otras cinco probetas que hubieran permanecido 28 días; el valor medio de resistencia a la tracción se denominará f_{C28} . Finalmente se haría lo mismo con otro grupo de cinco que hubieran permanecido 56 días; el valor medio de resistencia a la tracción se denominará f_{C56} .

Antes de cada ensayo de resistencia a tracción perpendicular, la probetas habrá de pasar un tiempo estabilizando hasta que la variación en la masa entre dos pesadas consecutivas de la probeta, con un intervalo de 24 horas entre cada pesada, no supere el 1% de la masa total. El criterio para considerar superado exitosamente el ensayo de durabilidad consiste en que se cumplan las siguientes relaciones:

- $(f_{C17} - f_{C28}) \leq 3 * (f_{C10} - f_{C17})$
- $f_{C28} \geq 0,4 * f_{C10}$

Si esto no se cumple, alternativamente debería cumplirse lo siguiente, con los valores obtenidos del ensayo tras la permanencia durante 56 días:

- $(f_{C28} - f_{C56}) < (f_{C17} - f_{C28})$
- $f_{C56} \geq 0,4 * f_{C10}$

CAPÍTULO 3.

MATERIALES EMPLEADOS Y DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

1. MATERIALES

Se seleccionaron dos variantes del panel de cubierta empleadas habitualmente en nuestro país, denominadas como **PANEL DE FRISO** y **PANEL DE YESO**. Ambas variantes tienen marcado CE y Documento de Idoneidad Técnica Europeo DITE, obtenido mediante un proceso de evaluación según la guía ETAG 016-1 y 2. La Asociación Española de fabricantes de Paneles sándwich de Madera con núcleo aislante, AEPAM, integra a varios de los fabricantes españoles de este tipo de panel.

Se trata de paneles sándwich o compuestos, ligeros, autoportantes, de caras no metálicas destinados al cerramiento de cubiertas inclinadas, no transitables, que cumplen las siguientes funciones principales:

- Soportar las acciones propias de un sistema de cerramiento: peso propio, peso de la cobertura, sobrecargas de nieve, acciones del viento y sobrecargas de uso relacionadas con operaciones de mantenimiento.
- Aislar térmicamente la cubierta.
- Proporcionar soporte continuo a la solución de cobertura.
- Contribuir al aislamiento acústico de la cubierta.
- Proporcionar el acabado interior de la cubierta.
- No cumple funciones estructurales del edificio, ni del arriostramiento de la cubierta, ni tampoco funciones de impermeabilidad frente al agua de lluvia.

El panel se apoya sobre el armazón de la cubierta (vigas, viguetas, cabrios, etc.), con un mínimo de 3 apoyos por panel, y se fija a estos apoyos mediante tornillos. Los paneles se colocan a tresbolillo tal como puede verse en la *figura 3.1*.

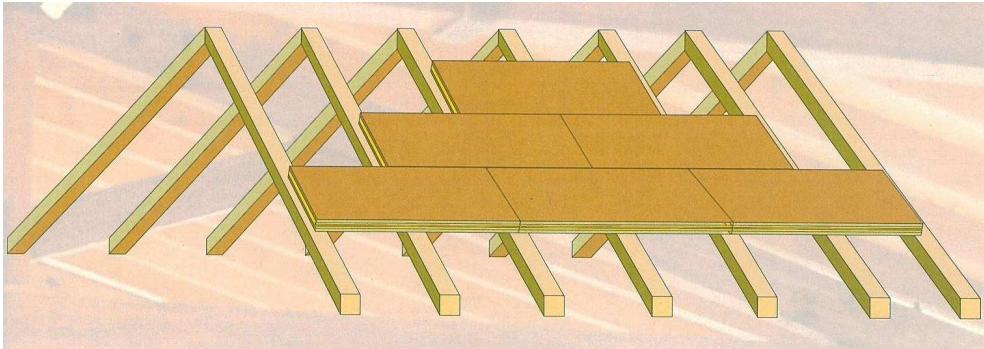


Figura 3.1. Ejemplo de una de las posibles disposiciones del panel en la cubierta

Para la fijación del panel sobre subestructuras de madera, los fabricantes recomiendan el uso de tornillos autorroscantes de acero al carbono de diámetro de, al menos, 6 mm y de una longitud tal que permita una penetración en la estructura de 30 mm como mínimo.

Las prestaciones mecánicas, y de resistencia frente a impactos dependen de la acción compuesta de todas las capas constituyentes del panel: tanto de los tableros exteriores como de la plancha de aislante interior, así como de la calidad de la adhesión entre las capas. La resistencia frente a impactos queda cuantificada y clasificada a través del concepto de categoría de uso, que se corresponde con el nivel de accesibilidad. Por otra parte el aislamiento térmico depende fundamentalmente de la plancha aislante de XPS. En la *figura 3.2* puede verse una solución constructiva de cubierta que emplea este panel sándwich.

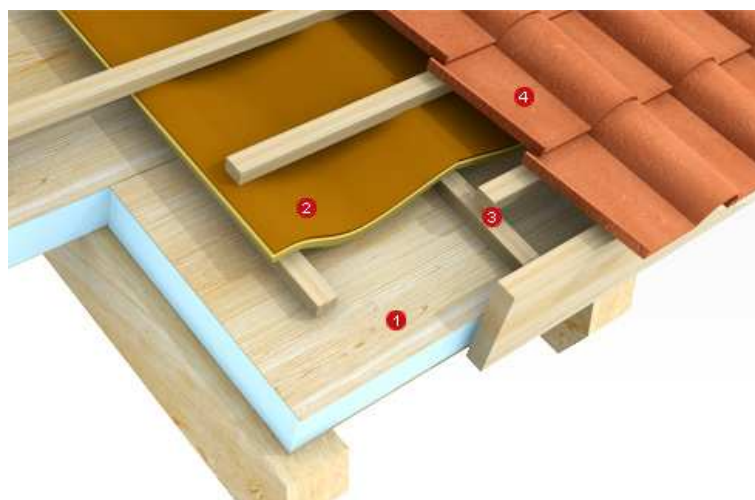


Figura 3.2. Panel sándwich conformando una cubierta inclinada. (1) Panel sándwich; (2) Aislamiento acústico; (3) Enrastelado; (4) Teja mixta

1.1. Descripción de la tipología de panel estudiada

Se describen a continuación los dos tipos de panel sándwich estudiados, con indicación de las denominaciones adoptadas para la presente investigación.

* **PANEL DE FRISO.** Es un panel sándwich compuesto por las siguientes tres capas unidas con un adhesivo, citadas en orden ascendente según quedan dispuestas en la cubierta, (ver *figura 3.3*):

1. Tablero FRI. Tablero de friso (o tablillas) machihembrado, de abeto. Es el tablero de acabado, denominado así por ser el tablero que se ve desde el interior del habitáculo que cubre y por lo tanto es la capa que tiene más importancia estética. FRI hace referencia al término friso
2. Plancha XPS. Plancha de poliestireno extruido (XPS); es el núcleo del panel sándwich, con función aislante térmica y acústica.
3. Tablero PAR. Tablero de partículas resistente a la humedad. PAR hace referencia al término partículas.

* **PANEL DE YESO.** Es un panel sándwich compuesto por las mismas capas que el panel anteriormente descrito, con la única diferencia del tablero inferior de acabado (ver *figura 3.4*):

1. Placa YES. Placa de yeso laminado. Es el tablero de acabado.
2. Plancha XPS. Plancha de poliestireno extruido (XPS).
3. Tablero PAR. Tablero de partículas resistente a la humedad.

1.1.1. Características de las capas constituyentes de los paneles

Tablero FRI. Es un tablero machihembrado de madera maciza de abeto y densidad 460 kg/m^3 . El tablero está constituido por 7 tablillas tal como se puede ver en la *figura 3.3*. Cada tablilla tiene la longitud del panel completo. Las tablillas centrales encajan por machihembrado mientras que las tablillas extremas encajan según una junta a media madera. Tiene un espesor nominal de 9,5 mm.

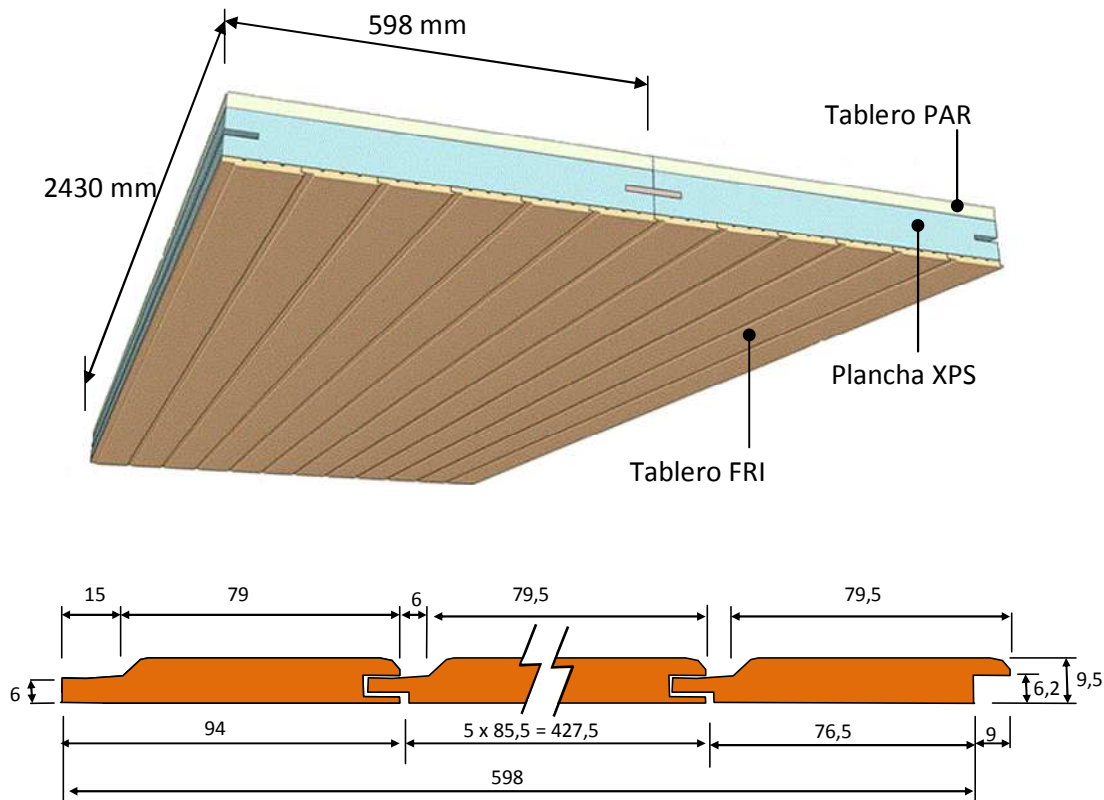


Figura 3.3. Representación de dos unidades de PANEL DE FRISO en su posición de montaje. En la parte inferior, la sección transversal del tablero FRI, que consta de 5 tablillas interiores y 2 exteriores con solapes que facilitan y sellan el montaje con el panel contiguo. La dimensión de 598 mm es la zona adherida a la plancha de XPS

Placa YES. Es una placa de yeso (YES) laminado según UNE-EN 520⁶⁴, con alma de yeso y sendas caras de celulosa (ver *figura 3.4*), de resistencia nominal a flexión 550 N (longitudinal) y 210 N (transversal). Tiene un espesor nominal de 12 mm.

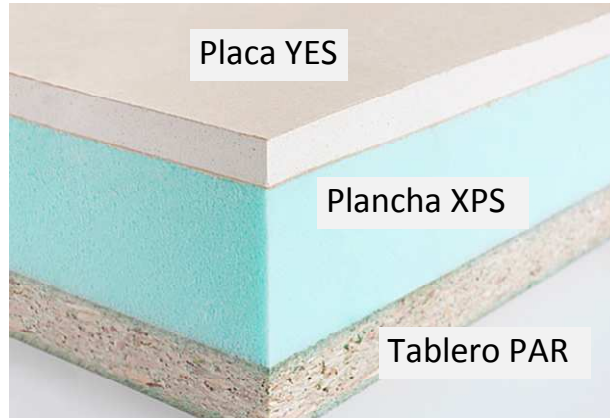


Figura 3.4. Esquema del PANEL DE YESO

Plancha XPS. Plancha de espuma de poliestireno extruido (XPS) que se suministra exenta de piel, eliminada por lijado. Tiene una conductividad térmica declarada por el fabricante de $\lambda_D=0.029$ W/m·K y un espesor nominal de 60 mm. Se midió la densidad del producto, en este trabajo, resultando de un valor de 42 kg/m³. Por su relevancia, se recogen en la *tabla 3.1* las especificaciones técnicas suministradas por el fabricante.

Características técnicas:			
Propiedad	Valor	Unidad	Norma
Espesor	20 – 120	mm	EN 823
Resistencia a la compresión (10 % deformación)	300 ~	kPa	EN 826
Módulo de compresión	14.000	kPa	EN 826
Conductividad térmica (10 °C / 90 días)	0.027	W/(m·K)	EN 12667 EN 12939
Conductividad térmica declarada λ_D	0.029	W/(m·K)	EN 13164
Densidad nominal	35	kg/m ³	EN 1602
Resistencia al vapor de agua	1.2 – 3.5	ng / Pa m s	EN 12086
Absorción de agua	<1,5	% Volumen	EN 12087
Resistencia a la tracción	500	kPa	EN 1607
Módulo de tracción	12.000	kPa	EN 1607
Resistencia a la cizalladura	200 – 250	kPa	EN 12090
Módulo de cizalladura	4.000 – 5.000	kPa	EN 12090
Reacción al fuego	E	Euroclase	EN 13501-1
Escuadra	< 2	mm	EN 824
Temperatura límite de aplicación	-50 / +75	°C	
Capilaridad	ninguno		
Acabado de la superficie	sin piel		
Coefficiente térmico de expansión lineal	0.07	mm/(m·K)	
Dimensiones (largo x ancho)	2.500 x 600/2.500 x 1.200	mm	EN 822
Tolerancia de espesor	+0.5 / -0.5	mm	
Tolerancia de ancho	+3 / -0	mm	EN 822
Tolerancia de largo	+10 / -0	mm	EN 822
Acabado lateral	canto recto		

Tabla 3.1. Especificaciones de la plancha de XPS (URSA INDUSTRY, CT-300)

Tablero PAR. Tablero de partículas de madera, resistente a la humedad, y con un espesor nominal de 19 mm.. Está clasificado como Euroclase D-s2, d0. Es resistente a la humedad tipo P3 según la norma UNE-EN 312⁶⁵, es decir tablero no estructural para aplicación en ambiente húmedo, que es aquel ambiente definido por la clase de servicio 2, caracterizado por un contenido en humedad en el material correspondiente a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del aire que solo sobrepasa el 85% durante algunas semanas al año según la norma EN 1995-1-1: 2006⁵¹.

En este trabajo se midió la densidad del tablero PAR, que resultó ser de 679 kg/m³. También se caracterizó mecánicamente el tablero sin envejecer, siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 789⁶⁶ en la medida de lo posible, debido a la limitación de las dimensiones del tablero. En los ensayos de tracción y compresión se emplearon extensómetros de pinza para la determinación del modulo elástico, y captadores de desplazamiento tipo LVDT para los ensayos de flexión. En la *tabla 3.2* se muestran los resultados obtenidos.

	Modulo elástico (MPa)	Tensión de rotura (MPa)
Tracción longitudinal	1865	6,13
Tracción transversal	1756	5,33
Flexión longitudinal	2501	11,78
Flexión transversal	2295	10,74
Compresión longitudinal	1771	12,35
Compresión transversal	1777	11,71

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del tablero PAR a la recepción del mismo, sin envejecer.

Adhesivo. El adhesivo empleado en la unión de las distintas capas es un poliuretano monocomponente de curado por humedad, adecuado para la unión de estos paneles sándwich. Este adhesivo, fabricado por HENKEL ADHESIVOS, se comercializa como MACROPLAST UR 7226. El producto utilizado para la realización de los lotes de ensayo se suministró con una hoja de características firmada por el fabricante, que se resume en la *figura 3.5*. El gramaje aplicado en cada unión adhesiva, en los lotes estudiados, fue de 135 ± 8 g/cm²

Hoja de características de Macroplast UR 7226. Version 08/09/1998

Producto: Adhesivo poliuretano monocomponente de curado por presencia de humedad y exento de disolventes. Es adecuado para la adhesión de los componentes habituales de los paneles sándwich de madera: madera, poliestireno, poliuretano, metales, PVC y otros.

Características fisicoquímicas: A 20 °C su viscosidad nominal es de 5500 a 10500 mPa·s y su densidad de 1,1 a 1,2 g/ml. Su tiempo abierto es de 25 a 35 minutos a 20°C en las uniones madera – madera,

En cuanto al tiempo de prensado es de 1 a 1,5 horas a 20°C (uniones madera-madera), alcanzándose el curado o reticulado final a las 24 horas, si bien el tiempo de prensado puede disminuirse si se efectúa utilizando prensa de platos calientes.

El adhesivo una vez curado tiene la siguiente resistencia a la tracción madera-madera:

Temperatura (°C)	-40	+20	+80
Resistencia a la tracción (madera-madera) (N/mm ²)	> 6	> 7	> 3

Resistencia a agentes agresivos: Las uniones efectuadas con *Macroplast UR* son resistentes a la intemperie, al agua y a los derivados del petróleo; son menos resistentes a ácidos y álcalis y no son resistentes a los hidrocarburos clorados.

Modo de aplicación: Puede aplicarse mediante pulverización, rodillos o de forma manual. Las superficies a unir deben estar secas y limpias de polvo y grasa. Durante la reticulación preliminar es necesario asegurar el contacto entre los materiales a unir mediante una buena presión y no mover el ensamblado. Las superficies metálicas deben tratarse previamente con un wash-primer adecuado. Los adhesivos de poliuretano no reticulan a temperaturas inferiores a 10°C.

Estabilidad al almacenaje: El producto mantiene sus propiedades durante 9 meses. Ha de mantenerse en envases cerrados y en lugares secos, dado que es un producto muy sensible a la humedad. Se recomienda almacenarlo entre 15 y 25 °C. Evitar las heladas.

Figura 3.5. Especificaciones del adhesivo empleado en la unión de las caras.

1.2. Proceso de fabricación

Para la realización de este trabajo se emplearon varios lotes de paneles, siendo uno de ellos el lote principal (denominado Lote 1). Todos ellos fueron fabricados siguiendo la metodología habitual de fabricación y la misma fue controlada y registrada en todas sus fases en el ámbito de esta investigación.

El proceso de fabricación consiste en el montaje del panel a partir de sus tres capas componentes por medio de encolado y prensado. Este montaje se lleva a cabo en orden inverso respecto a la disposición final del panel en la edificación. Las dimensiones nominales de los paneles objetos de estudio son de 2430 mm de longitud x 598 mm de anchura.

En el caso particular del panel de acabado de friso, y antes del proceso de encolado, se ensamblan las tablillas mediante grapas sobre la madera.

El adhesivo se aplica sobre la superficie a adherir, del tablero, en forma de hilos que, tras caer verticalmente en forma de cascada, quedan dispuestos longitudinalmente sobre el tablero debido a que éste es arrastrado por unos rodillos (ver *figuras 3.6 y 3.7*). El número de orificios a través de los cuales se riegan las caras a adherir fue de 114, dándose la circunstancia de que eventualmente algunos grupos de orificios se obturan durante el proceso de fabricación de un lote y por lo tanto en todo el ancho del panel pueden quedar discontinuidades en el regado del adhesivo que deberían quedar solventadas con el reparto del mismo en el prensado posterior. Los hilos de adhesivo son pulverizados con una niebla de agua para iniciar el curado.

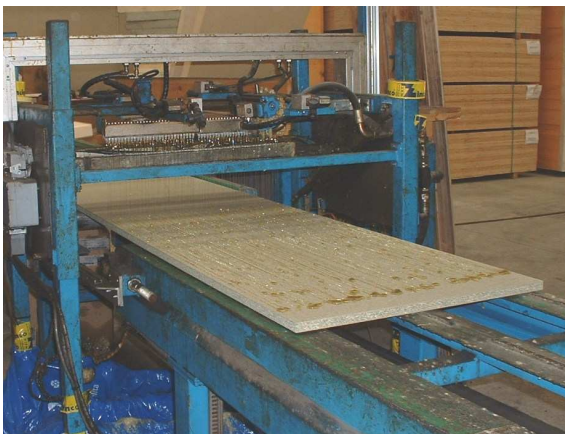


Figura 3.6. Encolado del tablero PAR. Los hilos de adhesivo caen en cascada desde arriba



Figura 3.7. Encolado de la plancha XPS

La primera capa de adhesivo se aplica sobre el tablero PAR; después sobre la plancha XPS, y finalmente sobre el tablero de acabado. Tras esto se monta el panel uniendo las tres capas. Los paneles así montados se apilan hasta que se completa la capacidad de la prensa, tras lo cual se aplica el prensado sobre dicha pila de paneles (ver *figuras 3.8 y 3.9*). Este proceso se realiza mediante prensa de platos fríos y se prolonga hasta completar el curado del adhesivo. En el caso de los lotes de ensayo se mantuvo la presión durante unas 3 horas a una temperatura aproximada de entre 14 y 18 °C. Finalmente se descargan los paneles de la prensa y se procede al mecanizado final del panel: rectificado de la anchura, escuadrado, rectificado de su longitud y mecanizado de las ranuras longitudinales donde se alojan las lengüetas de junta.



Figura 3.8. Paneles montados a punto de ser prensados



Figura 3.9. Detalle de PANELES DE FRISO durante el proceso del prensado

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO

La idea de llevar a cabo una investigación más profunda sobre el comportamiento en servicio a largo plazo del panel surgió de la experiencia de haber trabajado con el panel sándwich de uso en cubierta. Estos trabajos anteriores consistieron en proyectos de I+D, asistencias técnicas y peritaciones, así como ensayos de comportamiento mecánico varios, todo ello en colaboración con distintos fabricantes de paneles.

Como se comentó en apartados anteriores, no existen ensayos de envejecimiento acelerado en la bibliografía científica que garanticen una correlación con el envejecimiento natural. Para caracterizar la degradación en los materiales objeto de estudio se han realizado tres tipos de ensayos de envejecimiento denominados: envejecimiento de referencia, envejecimiento acelerado y envejecimiento natural, comparándose entre sí los resultados obtenidos.

El diseño de los tipos de envejecimiento más idóneos a someter al panel se llevó a cabo en base a un exhaustivo análisis de artículos técnicos, normativa y especificaciones, contando además con la experiencia de los fabricantes, así como con la ayuda de diversas entidades públicas como la Agencia Estatal de Meteorología o la Consejería de Fomento, Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Principado de Asturias, para recabar datos históricos e información sobre el clima.

Esto llevaría, finalmente, a la decisión de analizar los efectos producidos por la humedad en colaboración con la temperatura, descartándose otros efectos como el de las heladas o el de los organismos vivos, como se explicará más adelante.

Definido el envejecimiento que habría de imprimirse al panel, se planteó cómo estudiar la degradación producida. Para ello, con el conocimiento adquirido con las máquinas de ensayo disponibles, se estudiaron todos los ensayos propuestos en la evaluación de un panel en la guía ETAG 016. Se estudió cada uno de estos ensayos para decidir si eran útiles en el estudio del avance de la degradación producida por el envejecimiento. Finalmente la selección de los ensayos a utilizar se realizó en función de lo sensibles e importantes que eran.

Algunos de los ensayos mecánicos necesarios para esta caracterización resultan ser de gran complejidad. Por tanto, tras el diseño y fabricación de los útiles necesarios para llevarlos a cabo, fue necesario recogerlos en procedimientos escritos que facilitaran la tarea de ejecución de los mismos.

Para la realización de algunos de los ensayos que no se podían realizar en las propias instalaciones de Fundación ITMA se contactó y acordó colaboración con las siguientes entidades:

- Centro Tecnológico de la Madera, CTM
- Instituto Tecnológico de la Construcción de Cataluña, ITEC
- CIDEMCO, Centro Tecnológico.

Para evaluar el comportamiento de los paneles frente a los diferentes ciclos de envejecimiento a los que fueron sometidos, se realizaron ensayos mecánicos antes y después del envejecimiento. Los resultados obtenidos en los paneles antes del envejecimiento se contrastaron, además, con datos bibliográficos, lo que sirvió como validación de los métodos de ensayo puestos a punto.

Para llevar a cabo los ensayos se emplearon 5 lotes:

- Lote 1: Panel de Friso. Sobre este lote se hacen la mayoría de ensayos
- Lote 2: Panel de Yeso
- Lote 3 y 4: Panel de Friso; y Lote 5: Panel de yeso. Los lotes 3, 4 y 5 se fabricaron con anterioridad y se emplearon únicamente en el envejecimiento de referencia

Todos los lotes fueron seleccionados y controlados con los mismos estrictos controles: los componentes empleados en todos los lotes pertenecían a los mismos fabricantes, todos los elementos se fabricaron en las mismas instalaciones y bajo el mismo control de calidad. Además en todos los casos la selección y vigilancia de las muestras seleccionadas corrió a cargo de la misma persona.

Por otro lado, los ensayos se realizaron en el mismo laboratorio de Fundación ITMA y con el mismo personal y equipamiento: la cámara climática utilizada para el envejecimiento fue la misma, al igual que la máquina universal de ensayos mecánicos, célula de carga, procedimientos empleados y operario que ha realizado los ensayos.

Por tanto, los resultados obtenidos tras realizar los ensayos de envejecimiento y su posterior evaluación mediante la caracterización mecánica en todas las probetas pueden ser comparados entre sí, pudiéndose asegurar que no se inducen errores en dichos resultados debidos a variabilidades durante el proceso de fabricación de los diferentes lotes.

A continuación se expondrá el análisis llevado a cabo, así como la descripción de los envejecimientos que finalmente se aplicaron en el presente trabajo y también algunos de los que se han descartado y las razones de ello. Se ha considerado interesante incluir un tipo de envejecimiento, como referencia, extraído de la bibliografía manejada.

2.1. Selección del ensayo de envejecimiento de referencia o de control

En el documento ETAG 016-2, anexo C7, se propone el estudio del envejecimiento sobre los paneles a través de la medición de los cambios en la tensión de rotura a tracción perpendicular a las caras. Este estudio se hace sobre juegos de probetas sometidas a ensayos climáticos. Dicho documento propone tres ciclos climáticos diferentes, denominados Ciclo 1, Ciclo 2, y Ciclo 3 tal y como se comentó en el *apartado 6.2.8 del capítulo 2*. Para la realización del presente trabajo se seleccionó el Ciclo 2 como ciclo de control o referencia. A continuación se describen los tres ensayos de ciclos climáticos y los criterios adoptados para seleccionar el C2 como el ciclo más adecuado.

- Ciclo 1, o ensayo de temperatura, consiste en el mantenimiento a temperatura muy alta (90°C) y humedad muy baja de secado (menor de 15 % HR), (ver representación gráfica *figura 3.10*). Periódicamente se extrae un grupo de probetas que se ensayan a tracción perpendicular. El último grupo de probetas completa un tiempo total de permanencia en esas condiciones, de 24 semanas (168 días). En el ámbito de este trabajo no se ha considerado adecuada la aplicación de este ciclo como ciclo de referencia ya que las probetas se someten a una temperatura demasiado alta, que nunca se dará en la

ubicación real del panel y que puede producir efectos que no se dan en un envejecimiento natural. Además está el hecho de que no se considera presencia de humedad elevada.

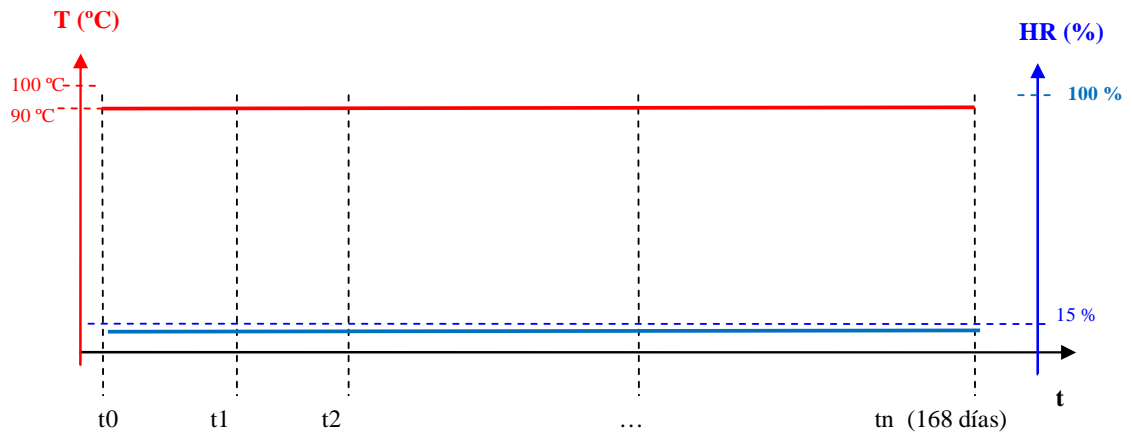


Figura 3.10. Esquematización del Ciclo 1 o test de temperatura. El color rojo corresponde a la temperatura y el azul a la humedad relativa. No se llevó a cabo.

- Ciclo 3, o ensayo de ciclo de humedad y temperatura. Se realiza en una cámara mantenida inicialmente a una temperatura de 70°C y una humedad relativa de al menos 90% durante 5 días, (ver representación gráfica *figura 3.11*). Posteriormente las probetas se someten a una temperatura de -20°C durante 1 día, y finalmente se someten a una temperatura de 90°C y una humedad relativa no superior al 15%. Este conjunto de 7 días forman un único ciclo, transcurrido el cual, se ensaya un grupo de probetas. Un segundo grupo de probetas se somete a 5 ciclos como el anteriormente descrito, siendo posteriormente ensayado. Finalmente, en función de los resultados obtenidos, habría un tercer grupo de probetas que serían ensayadas tras haber superado 10 de los ciclos descritos. En este trabajo se ha estimado que este envejecimiento introduce un daño excesivo en el panel, ya que se producen heladas, lo que podría enmascarar otros mecanismos de degradación.

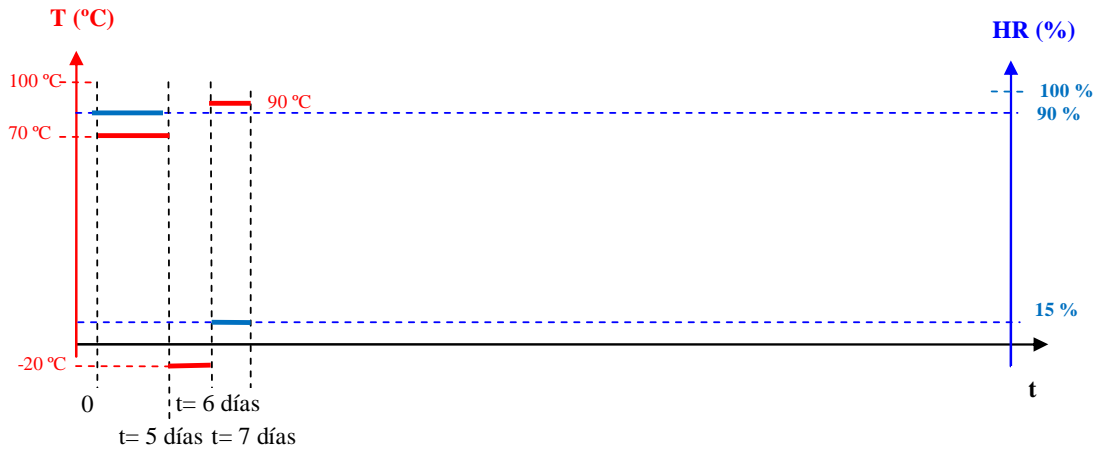


Figura 3.11. Esquematización del Ciclo 3 o test de humedad y temperatura. Se representa un único ciclo de los cinco de los que consta (ampliables hasta diez). El color rojo corresponde a la temperatura y el azul a la humedad relativa. No se llevó a cabo.

- Ciclo 2, o ensayo de humedad. Las probetas se mantienen a una temperatura de 65 °C y a una humedad relativa del 100%, (ver representación gráfica figura 3.12). Periódicamente se extrae un grupo de probetas que se ensaya a tracción perpendicular. La duración del ensayo es de 28 días, si bien, en función de los resultados, el ensayo podría extenderse hasta los 56 días. En este trabajo se ha tomado este envejecimiento como control o referencia. Este ciclo presenta cierta semejanza, en el valor de la temperatura, con la temperatura máxima ambiente a la que puede estar sometido un panel durante su vida en servicio, manteniendo la humedad en un estado alto. A diferencia del envejecimiento acelerado diseñado en este trabajo (que se explicará más adelante), no realiza un ciclado de la humedad, con lo que se espera que sea menos agresivo con las probetas.

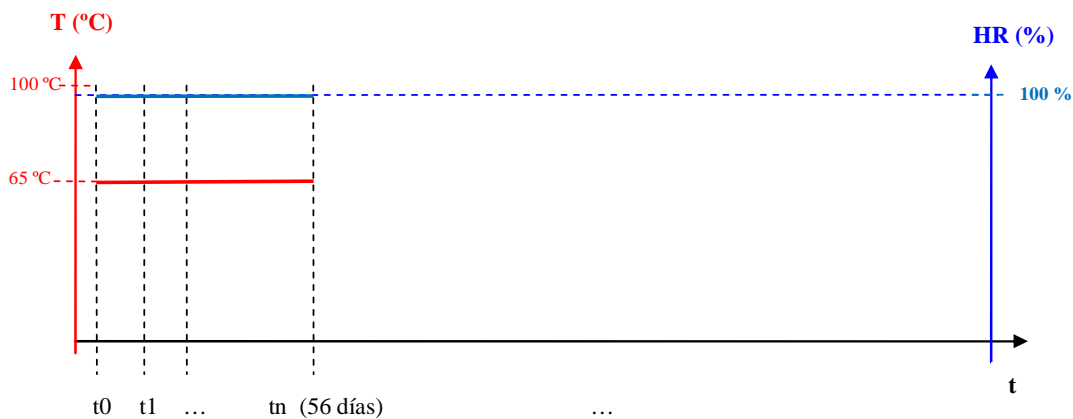


Figura 3.12. Esquematización del Ciclo 2 o test de humedad. El color rojo corresponde a la temperatura y el azul a la humedad relativa. Se tomó como el envejecimiento de referencia

Procedimiento de ensayo

Para realizar el envejecimiento de referencia previamente se mecanizaron probetas de los lotes 3 y 4 (panel de friso) y 5 (panel de yeso) de dimensiones 100x100 mm en todo el espesor del panel, (requeridas para realizar los posteriores ensayos mecánicos).

Las probetas fueron envejecidas en las instalaciones de Fundación ITMA, utilizando una cámara climática marca DYCOMETAL, modelo CCM -25/180 y rango de trabajo -25°C a 150°C y 15 % HR a 98 % HR. Como se explicó anteriormente, el ciclo programado, que es el denominado Ciclo 2 especificado en la ETAG 016, ha consistido en el mantenimiento a una temperatura de 65°C y a una humedad relativa del 100%.

2.2. Diseño de un nuevo ciclo de envejecimiento acelerado

A continuación se define el tipo de envejecimiento más idóneo diseñado en base al estudio bibliográfico previo y a la experiencia propia en este ámbito y a la de los fabricantes. Consiste en someter las probetas, cíclicamente, a los siguientes estados climáticos:

- a. Temperatura de envejecimiento acelerado, $T_{ea} = 60^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa, $HR_{ea1} = 30\%$. Tiempo de mantenimiento en esas condiciones: 4 días
- b. Temperatura de envejecimiento acelerado, $T_{ea} = 60^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa, $HR_{ea2} = 85\%$. Tiempo de mantenimiento en esas condiciones: 4 días

La transición entre ambos ciclos se realiza en 6 horas.

Se seleccionó una temperatura de 60° C debido a que es suficientemente alta para acelerar el envejecimiento y a la vez es suficientemente moderada para no inducir mecanismos de degradación que no son susceptibles de producirse en el envejecimiento natural.

En lo que se refiere a la elección de los límites entre los que osciló la humedad relativa, la elección de estos valores obedece a que las humedades relativas del 30% y 85% son valores extremos habituales que se dan en el clima del norte de España, y concretamente son las que

cabría esperar en el caso de la ciudad de Gijón donde se almacenaron las probetas para el envejecimiento natural. El valor de 85% HR es alto sin ser excesivamente húmedo, como se verá más adelante.

En cuanto al tiempo de mantenimiento en cada situación ambiental, cuatro días es un tiempo suficiente para permitir que los componentes absorban una cantidad de agua razonablemente alta en situación de humedad del 85% y también para que sequen en gran medida, en la situación de humedad del 30%. Además es lógico pensar que un estado de clima en una zona confinada tenga una cierta estabilidad, y se mantenga en unas condiciones de humedad relativamente permanentes, ya que el panel en su disposición, está rodeado de otros elementos y no está expuesto directamente al clima exterior.

Este ensayo acelerado, así diseñado, se aproxima bastante al denominado Ciclo D1 de la norma, UNE EN ISO 9142⁶⁷. Sin embargo el ciclo descrito en esa norma resulta algo más agresivo en lo que a la velocidad del ciclado se refiere (ver representación gráfica *figura 3.13*).

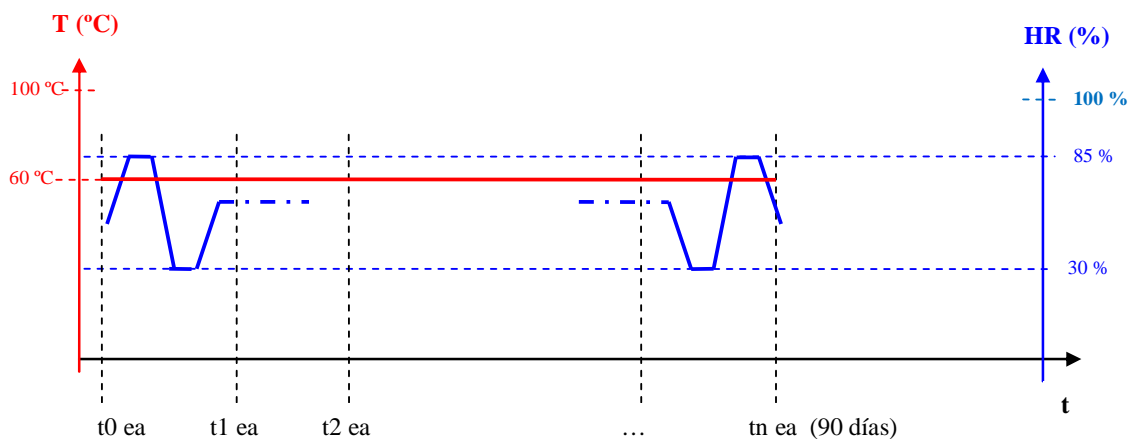


Figura 3.13. Esquematización del envejecimiento acelerado (ea) diseñado en este trabajo. El color rojo corresponde a la temperatura y el azul a la humedad relativa.

Los tiempos inicialmente previstos para extraer probetas de control del envejecimiento acelerado fueron los siguientes: $t_{1\text{ea}}= 15$ días; $t_{2\text{ea}}= 30$ días; $t_{3\text{ea}}= 45$ días; $t_{4\text{ea}}= 60$ días; $t_{5\text{ea}}= 75$ días; $t_{6\text{ea}}= 90$ días.

Procedimiento de ensayo

Se realizaron ensayos de envejecimiento acelerado en probetas mecanizadas previamente a partir de paneles completos de los lotes 1 y 2 con las dimensiones requeridas, (probetas de 100x100mm y de 200x100 mm en todo el espesor), para llevar a cabo los posteriores ensayos mecánicos programados tanto sobre probetas completas como sobre los diferentes componentes de las mismas por separado:

- Probetas cortadas de panel completo: cortes realizados según el plano X-Y del panel, y que por tanto conservan la disposición de todas las capas del mismo, y de dimensiones previstas para la realización de los ensayos de tracción perpendicular a las caras o tracción en el eje Z del panel y ensayos de cortadura. En la *figura 3.14* puede verse la disposición de estas probetas en el interior de la cámara climática.

- Probetas cortadas de cada una de las tres capas que componen el panel: probetas para la evaluación del tablero PAR, probetas para la evaluación del tablero FRI, y finalmente probetas para la evaluación de la plancha de XPS.

Estos ensayos se realizaron en la misma cámara climática DYCOMETAL, descrita en el apartado anterior. Se programó con ciclos climáticos de 60°C /30% HR /4 días y 60°C / 85% HR /4 días, y con una transición entre cada estado de ¼ de día.



Figura 3.14. Disposición de las probetas en el interior de la cámara climática

Cada 15 días se extrajo el grupo de probetas correspondiente. Las probetas extraídas se almacenan en condiciones ambientales de laboratorio hasta que su masa se estabiliza, lo que se considera alcanzado cuando el cambio en la masa, entre dos pesadas consecutivas llevadas a cabo con un intervalo de 24 horas, es menor del 1% de la masa total. Tras esto, son sometidas a los ensayos correspondientes.

En la *figura 3.15* puede verse el registro de temperatura y humedad de uno de los ciclos dentro de la cámara climática. Se puede apreciar que el mantenimiento de las condiciones de humedad está dentro de los límites habituales de trabajo de estos equipos ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\pm 5\%$ HR).

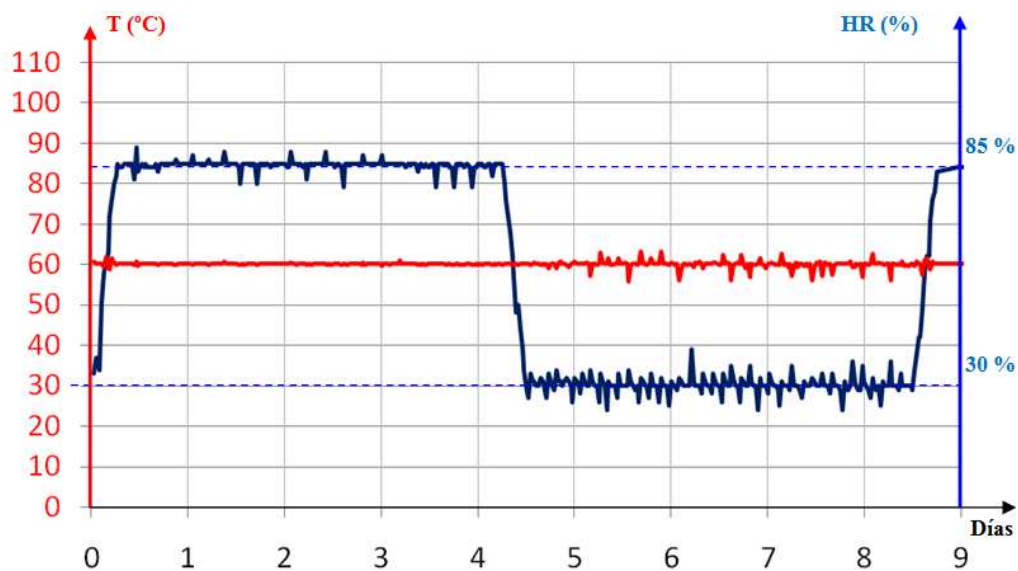


Figura 3.15. Registro de temperatura y humedad durante uno de los ciclos de envejecimiento acelerado. Un registro de valores cada hora.

Por otro lado, también se llevaron a cabo ensayos de envejecimiento acelerado sobre paneles completos: PANEL DE FRISO y PANEL DE YESO de dimensiones 2430 x 598 mm y sobre medios paneles de 1215 x 598 mm.

Se envejecieron de manera acelerada en una cámara climática de grandes dimensiones marca DYCOMETAL, modelo CCK-25 para probetas de gran tamaño y de rangos de trabajo -25°C a 75°C y 30 % HR a 85 % HR en las instalaciones del CTM, Centro Tecnológico de la Madera, en Toledo. Se programó con el envejecimiento acelerado diseñado en el presente trabajo: ciclos alternativos de $60^{\circ}\text{C}/30\%$ HR y $60^{\circ}\text{C}/85\%$ HR La duración de cada ciclo fue de 4 días

aproximadamente, pero a diferencia de las cámaras pequeñas, no fue posible establecer un tiempo definido para la transición entre ciclos.

Cada 30 días se extrajo un grupo de probetas para ser ensayado. En las *figuras 3.16 y 3.17* pueden verse dos detalles de la disposición de las probetas en el interior de la cámara climática.

Las probetas se ensayaron en Fundación ITMA al finalizar dicho envejecimiento. Sobre los paneles completos se realizaron ensayos de flexión positiva y sobre los medios paneles se llevaron a cabo ensayos de impacto de cuerpo blando.



Figura 3.16. Detalle del controlador de humedad y temperatura de la cámara climática



Figura 3.17. Disposición de las probetas en el interior de la cámara climática.

A continuación se indica la cronología llevada a cabo:

1. El 29 de febrero de 2008, se introducen en la cámara climática: 6 medios PANELES DE YESO, 8 PANELES DE YESO completos, 8 medios PANELES DE FRISO, y 8 PANELES DE FRISO completo. La razón de que no se hayan introducido 9 paneles (3 + 3 + 3) se debe a que uno de ellos se empleó para extraer las probetas de dimensiones 100 x 100 mm y 200 x 100 mm antes especificadas.
2. El 28 de marzo de 2008, se sacan de la cámara climática las probetas destinadas a ser ensayadas mecánicamente tras 29 días de envejecimiento.

3. El 8 de mayo de 2008, se sacan de la cámara climática las probetas destinadas a ser ensayadas mecánicamente tras 69 días de envejecimiento.
4. El 6 de junio de 2008, se sacan de la cámara climática las probetas destinadas a ser ensayadas mecánicamente tras 98 días de envejecimiento.

En la *figura 3.18* puede verse la gráfica real llevada a cabo por la cámara climática:

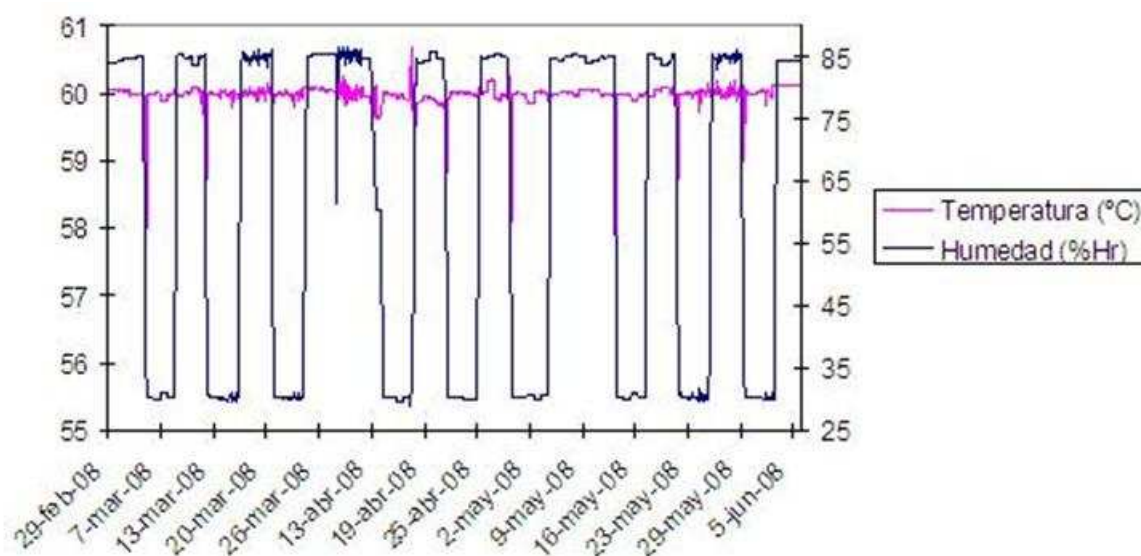


Figura 3.18. Registro de temperatura y humedad completo, durante los 90 días de envejecimiento

2.3. Envejecimiento natural

Este ensayo consiste en someter los paneles a las condiciones de servicio reales durante un periodo de tiempo determinado. Para ello, se colocaron las probetas en un almacén abierto. De esta forma, los paneles no estaban expuestos directamente a la acción de la lluvia y otros agentes atmosféricos, pero sí a la temperatura y humedad ambientales. Esta situación es similar a la que se ven sometidos los paneles durante su vida en servicio. Los paneles se envejecieron durante 4 años, registrando periódicamente las condiciones de humedad y temperatura (ver representación gráfica *figura 3.19*).

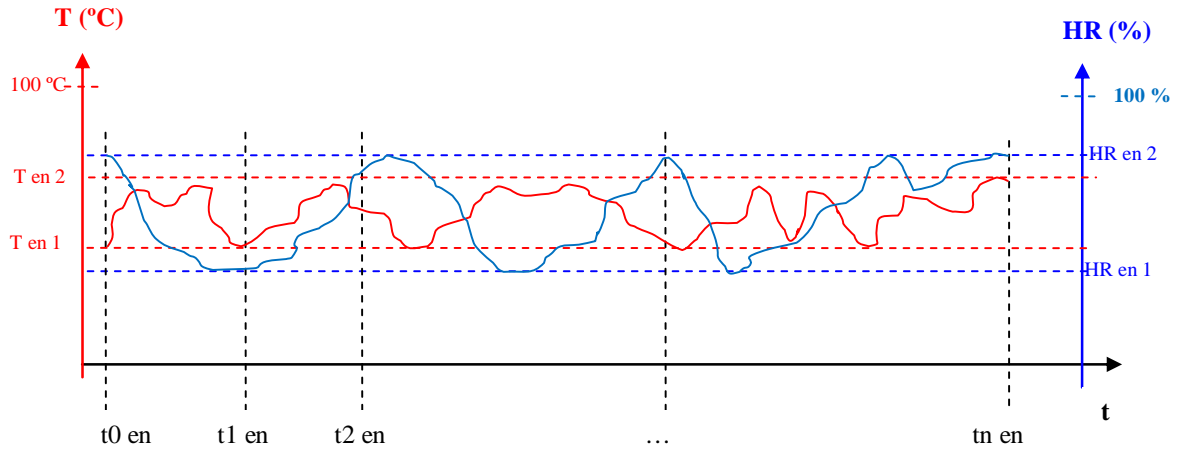


Figura 3.19. Esquematización del envejecimiento natural (en). El color rojo corresponde a la temperatura y el azul a la humedad relativa.

Los tiempos inicialmente previstos para extraer probetas de control del envejecimiento fueron los siguientes: t_{1en} = 6 meses; t_{2en} = 12 meses; t_{3en} = 18 meses; t_{4en} = 24 meses; t_{5en} = 30 meses; t_{6en} = 36 meses.

Para llevar a cabo el envejecimiento natural se mecanizaron probetas del lote 1 de dimensiones 100 x 100 mm y 200 x 100 en todo el espesor y se almacenaron en un almacén abierto, sometidas al clima costero de Gijón. Se registraron periódicamente los valores de humedad y de temperatura. Las probetas no sufrieron heladas ni lluvia y permanecieron separadas unas de otras por una distancia aproximada de 1 cm, con el objetivo de permitir el paso del aire entre las mismas y la adecuada transmisión de temperatura y humedad ambiental. En la *figura 3.20* se muestra la vista exterior del almacenamiento de las probetas, y en la *figura 3.21* puede verse la disposición de las mismas, cercana a la abertura al exterior, pero a salvo de la lluvia.



Figura 3.20. En la zona central puede verse la abertura al exterior del almacenamiento abierto utilizado. Al fondo de la imagen la Campa de Torres de la ciudad de Gijón.



Figura 3.21. Disposición de las probetas durante el almacenamiento abierto.

Como se indica en la bibliografía estudiada, los cambios experimentados por el clima exterior no coinciden ni con los experimentados en las inmediaciones de un elemento de cobertura dispuesto en una edificación ni con los experimentados dentro del propio elemento. Hay diversos factores que influyen en ello, como la hermeticidad de los otros elementos de la edificación que rodean al elemento en cuestión, el clima del interior del edificio, etc. Durante los cuatros años de estudio, se registraron las condiciones de temperatura y humedad exteriores al almacenamiento, y las existentes entre las probetas. En la *figura 3.22* se muestran las mediciones obtenidas durante un periodo de 20 días, que resulta representativo ya que se alcanzaron valores altos y valores bajos de humedad relativa.

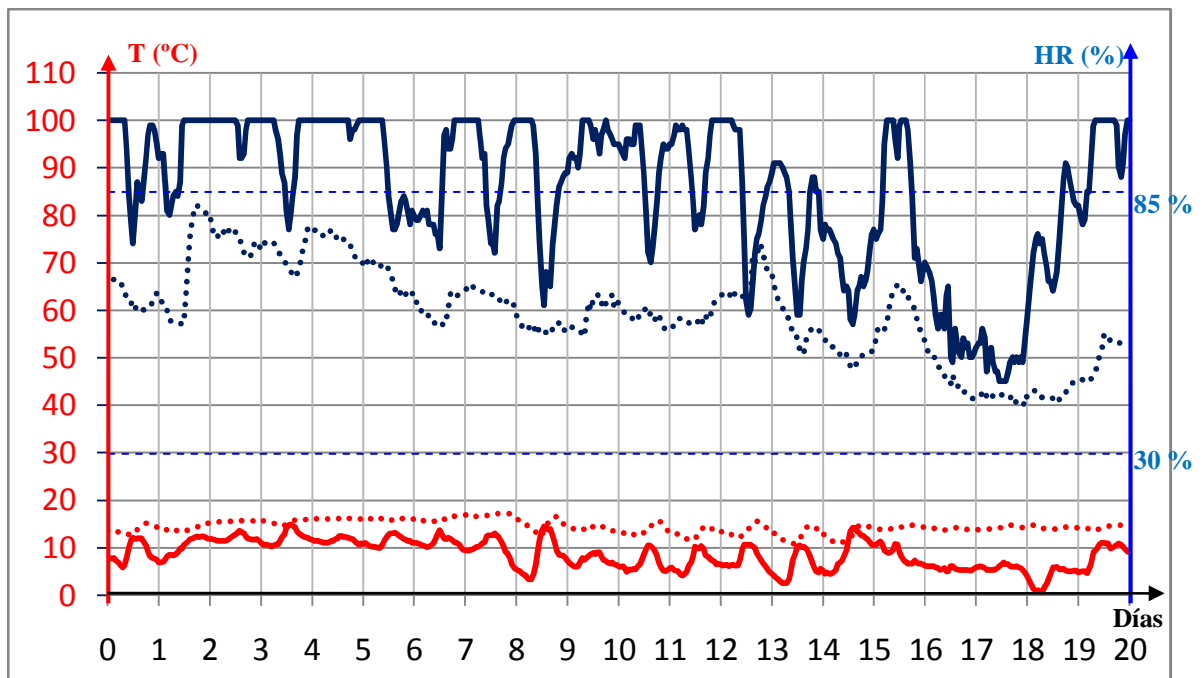


Figura 3.22. Registro de temperatura y humedad, durante un periodo de 20 días. En color rojo la temperatura, en color azul la humedad relativa. Las líneas en trazo continuo proceden de un termohigrómetro situado en el exterior del almacenamiento, mientras que las líneas de trazo discontinuo proceden de un termohigrómetro situado entre las probetas.

Tal como se muestra en la *figura 3.22*, el valor de humedad relativa que hay en el exterior no es el mismo que el que hay entre las probetas. Existe un efecto de amortiguación, tanto de los valores más altos alcanzados por la humedad relativa exterior, como de las oscilaciones de la misma, de manera que entre las probetas estos efectos son menores. Ello se debe a las paredes del almacenamiento, que rodean a las probetas y también a la protección que se dan unas probetas a las otras.

No obstante esta amortiguación de la humedad relativa exterior también ocurriría en un panel en su disposición real, ya que está rodeado y protegido por otros elementos que forman parte del tejado y que actúan amortiguando las variaciones de humedad y temperatura experimentadas por el ambiente exterior libre. Estos elementos pueden verse representados en la *figura 3.2*.

Las probetas almacenadas estaban ya mecanizadas a las dimensiones necesarias para efectuar los ensayos de tracción perpendicular y cortante. Esto supone que estas probetas, con respecto a un panel completo, presentan más borde lateral expuesto. Por todo ello se concluye que el envejecimiento natural sufrido por las probetas ha sido similar o más agresivo que el experimentado por un panel en condiciones reales. En la *tabla 3.3* se muestran los valores extremos registrados en un ciclo de un año.

	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Humedad relativa mínima (%)	Humedad relativa máxima (%)
Ambiente exterior	-1.5	30,5	33	100
Ambiente entre las probetas	7,3	32,3	34	87

Tabla 3.3. Valores extremos registrados en un ciclo de un año

En las *figuras 3.23* a *3.26* se muestran algunos registros de las condiciones ambientales exteriores durante el periodo de envejecimiento natural llevado a cabo entre febrero de 2008 y febrero de 2012. En la *figura 3.23* se muestra el registro de un mes en el que se dieron las temperaturas más altas, mientras que en la *figura 3.24* se muestra el periodo en el que se dieron las temperaturas más bajas.

Las *figuras 3.25* y *3.26* muestran en detalle la evolución de temperatura y humedad en un periodo de tiempo más pequeño, para poder, de esa manera, efectuar una comparación con la evolución de estas variables durante el ensayo acelerado. En la *figura 3.25* puede verse una sucesión de 4 días en los que los registros mostraron una humedad relativa alta a lo largo de varias medidas, mientras que en la *figura 3.26* se muestra una sucesión de 4 días de humedad significativamente baja. El equipo de medida utilizado estaba programado para tomar una medición de la temperatura y la humedad cada hora.

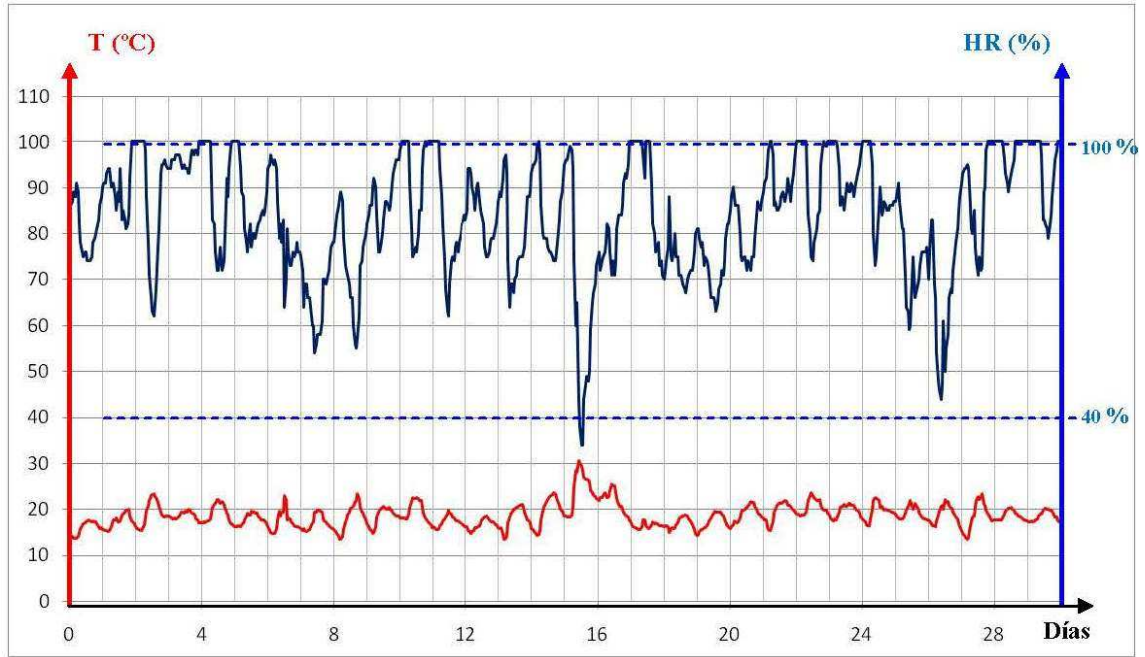


Figura 3.23. Registro de temperatura y humedad, durante uno de los periodos de 30 días de más altas temperaturas. Un registro de valores cada hora.

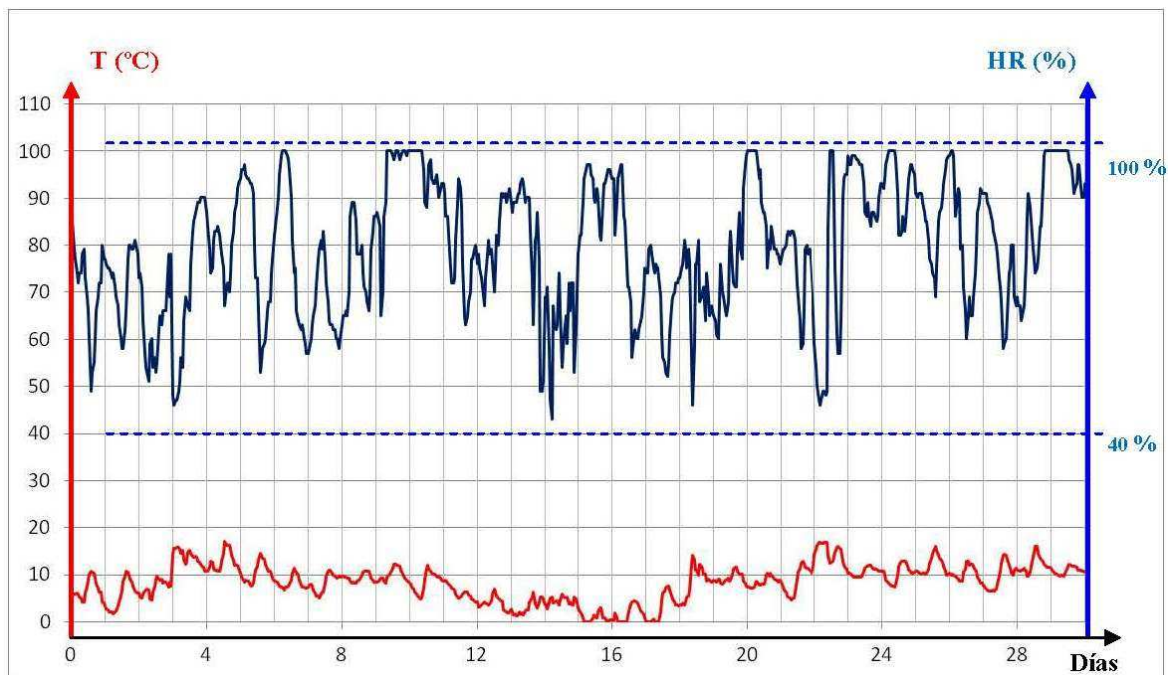


Figura 3.24. Registro de temperatura y humedad, durante uno de los periodos de 30 días de más bajas temperaturas. Un registro de valores cada hora.

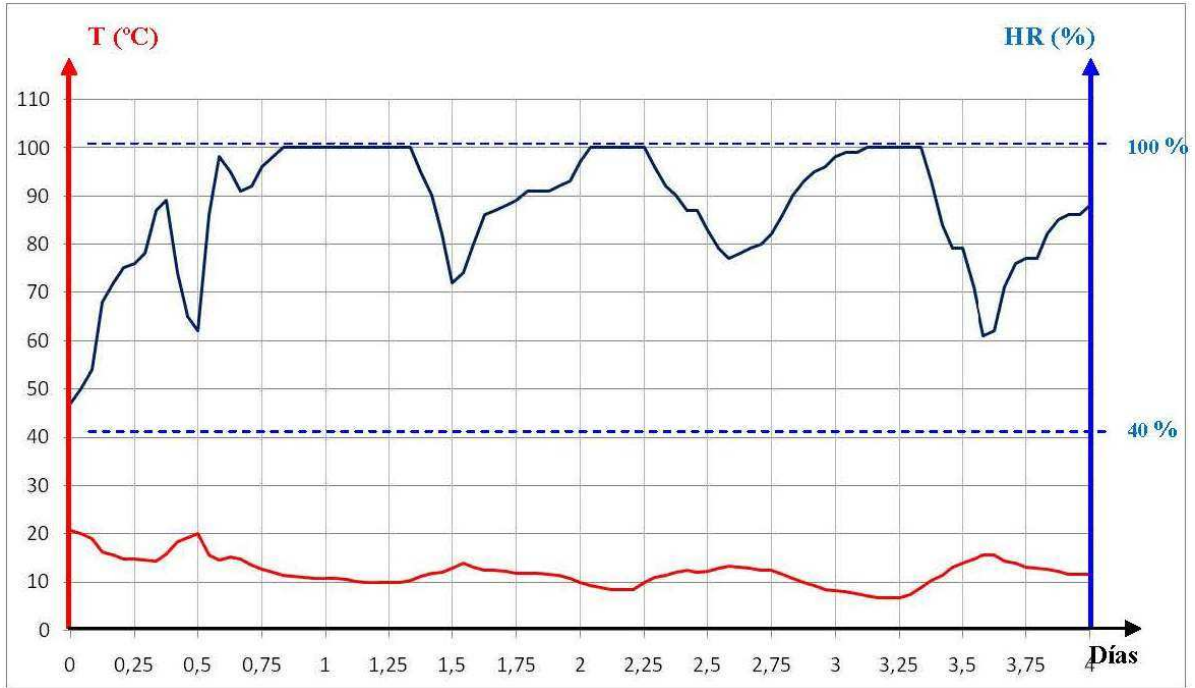


Figura 3.25. Registro de temperatura y humedad, durante un periodo de 4 días especialmente húmedo. Un registro de valores cada hora.

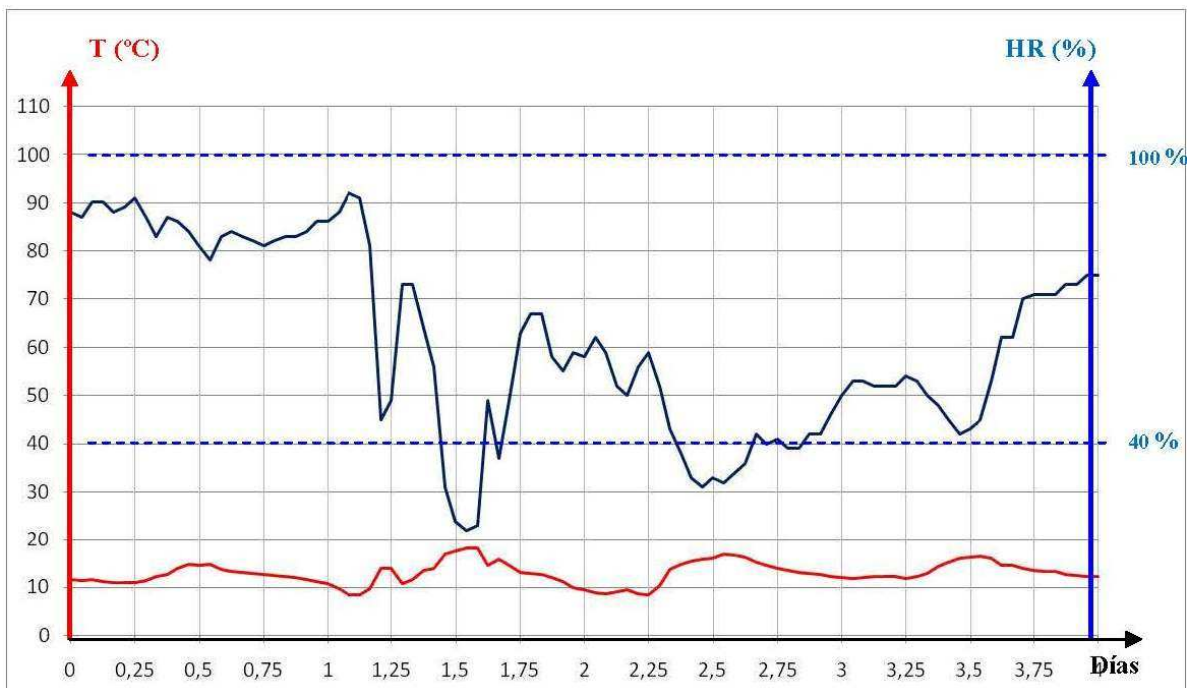


Figura 3.26. Registro de temperatura y humedad, durante un periodo de 4 días especialmente seco. Un registro de valores cada hora.

Una vez finalizado el ensayo de envejecimiento natural y el posterior acondicionamiento de las probetas a las condiciones ambientales del laboratorio, éstas fueron sometidas a los ensayos de caracterización mecánica previstos.

2.4. Tablas-resumen de los envejecimientos aplicados

En la *tabla 3.4* se resumen todos los ensayos llevados a cabo en probetas con los distintos tipos de envejecimiento empleados, mientras que en la *tabla 3.5* se han ordenado estos mismos ensayos en función del tipo de probeta ensayada. En la forma de denominar las probetas se hace referencia a si la misma se extrae de una de las capas componentes (tablero, plancha, etc.) o si es una probeta con todo el espesor del panel (que incluye todas las capas); e incluso si la probeta es un panel completo.

Se debe destacar que todas las probetas fueron ensayadas mecánicamente antes y después de los envejecimientos al objeto de evaluar el comportamiento de los paneles.

TIPO DE ENVEJECIM.	TIPO DE PROBETAS ENVEJECIDAS	LOTE DE LAS PROBETAS
Envejecimiento de referencia (ciclo 2-ETAG 016)	PANEL DE FRISO. Probetas de todo el espesor del panel. Tracción perpendicular a las caras.	Lote 3 y Lote 4 (de PANEL DE FRISO)
	PANEL DE YESO. Probetas de todo el espesor del panel. Tracción perpendicular a las caras.	Lote 5 (de PANEL DE YESO)
Envejecimiento acelerado	TABLERO PAR. Probetas de flexión.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
	TABLERO FRI. Probetas de flexión.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
	PLANCHA XPS. Probetas de compresión.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
	PANEL DE FRISO. Probetas de todo el espesor del panel. Tracción perpendicular a las caras.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
	PANEL DE FRISO. Probetas de todo el espesor del panel. Cortante entre las caras.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
	PANEL DE FRISO. Probetas de todo el espesor del panel. Conductividad térmica.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
	PANEL DE FRISO. Paneles completos. Flexión positiva.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
	PANEL DE YESO. Paneles completos. Flexión positiva.	Lote 2 (de PANEL DE YESO)
	PANEL DE FRISO. Paneles completos. Impacto de cuerpo blando.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
Envejecimiento natural	TABLERO PAR. Probetas de flexión.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
	PANEL DE FRISO. Probetas de todo el espesor del panel. Tracción perpendicular a las caras.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)
	PANEL DE FRISO. Probetas de todo el espesor del panel. Cortante entre las caras.	Lote 1 (de PANEL DE FRISO)

Tabla 3.4. Resumen de los ensayos realizados, ordenados en función del tipo de envejecimiento

TIPO DE PROBETAS	ENSAYOS DE ANALISIS DEL ENVEJECIMIENTO	LOTE	ENVEJECIMIENTOS APLICADOS
Probetas de elementos constituyentes del panel	TABLERO PAR. Probetas de flexión.	1	Env. acelerado
		1	Env. natural
	TABLERO FRI. Probetas de flexión.	1	Env. acelerado
	PLANCHA XPS. Probetas de compresión.	1	Env. acelerado
Probetas de pequeñas dimensiones de todo el espesor del panel	PANEL DE FRISO y PANEL DE YESO. Probetas de todo el espesor del panel. Tracción perpendicular a las caras.	3, 4, 5	Env. de referencia
		1	Env. acelerado
		1	Env. natural
	PANEL DE FRISO. Probetas de todo el espesor del panel. Cortante entre las caras.	1	Env. acelerado
		1	Env. natural
PANEL DE FRISO. Probetas de todo el espesor del panel. Conductividad térmica.	1	Env. acelerado	
Panel completo	PANEL DE FRISO. Paneles completos. Flexión positiva.	1	Env. acelerado
	PANEL DE YESO. Paneles completos. Flexión positiva.	2	Env. acelerado
	PANEL DE FRISO. Paneles completos. Impacto de cuerpo blando.	1	Env. acelerado

Tabla 3.5. Resumen de los ensayos realizados, ordenados en función del tipo de probeta

3. ENSAYOS MECANICOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS ENVEJECIMIENTOS

En este apartado se analizan los ensayos mecánicos utilizados en la valoración del efecto de los envejecimientos aplicados a los paneles y a sus materiales constituyentes. Se evalúa cada ensayo para posteriormente exponer el procedimiento finalmente desarrollado y aplicado. Estos procedimientos forman parte ahora del cuerpo de procedimientos de ensayo de Fundación ITMA.

También se incluye el análisis sobre otros ensayos que finalmente fueron descartados para la valoración del envejecimiento y se argumentan las razones para su descarte.

3.1. Ensayos de los elementos constituyentes del panel

Los elementos constituyentes del panel se evaluaron a través de ensayos seleccionados según estos criterios:

- a. Que fueran ensayos relacionados con su función dentro del panel
- b. Que fueran lo suficientemente sensibles para detectar diferencias en los efectos de la degradación esperados
- c. Que no demandaran excesivos recursos frente al valor de la información que se esperaba extraer de ellos

Conforme a estos criterios, el tablero PAR y el tablero FRI se evaluaron a través del ensayo de flexión en tres puntos (dos apoyos y uno de aplicación de carga). La plancha de XPS se evaluó a compresión y la placa YES no se ensayó ya que ha sido suficientemente estudiada frente a este tipo de envejecimientos.

3.1.1. Procedimiento de ensayo del tablero PAR. Flexión en tres puntos

Para determinar la evolución de la degradación de las propiedades del tablero PAR con los envejecimientos aplicados, se descartó seguir las indicaciones de la norma UNE-EN 789: 1995: *Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Determinación de las propiedades*

mecánicas de los tableros derivados de la madera, por requerir probetas con dimensiones excesivamente grandes.

Se decidió entonces que para los fines comparativos del presente trabajo sería más adecuada la realización de un ensayo de flexión basado en la norma UNE-EN 310: 1993: *Tableros derivados de la madera Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión*. Debido a las dimensiones del panel, las probetas extraídas para efectuar los ensayos bajo la norma mencionada, no cumplían estrictamente las dimensiones requeridas en la norma, pero los resultados resultan valiosos como análisis comparativo sobre la evolución del daño por envejecimiento. En la flexión, la distancia entre los dos apoyos cilíndricos fue de 170 mm.

3.1.2. Procedimiento de ensayo del tablero FRI. Flexión en tres puntos

Para la determinación de la degradación de las propiedades del tablero FRI, se realizó un ensayo de flexión en dos apoyos separados por 170 mm, y aplicación de fuerza en el punto central, similar al realizado sobre el tablero PAR. El ensayo no sigue las indicaciones de ninguna norma concreta ya que no se ha encontrado ninguna que contemple específicamente este tablero formado por tablillas machihembradas.

A pesar de que esta caracterización no cumple estrictamente las indicaciones de ninguna norma, se considera válida a efectos de comparación entre tableros sometidos a distintos días de envejecimiento.

3.1.3. Procedimiento de ensayo de la plancha de XPS. Ensayo de compresión

Para estudiar el envejecimiento en la plancha XPS, se extrajeron, a partir de la misma, paralelepípedos de base cuadrada de 100 mm de lado y se ensayaron siguiendo las indicaciones de la norma UNE-EN 826:1996: *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a compresión*. El ensayo consistió en aplicar una fuerza de compresión con una velocidad de avance de 4 mm/min en dirección axial perpendicularmente a las caras principales de la probeta de ensayo. Obviamente, la

probeta se dispuso de tal manera que la fuerza de compresión se aplicase en la dirección normal de uso del producto.

Este ensayo resulta menos costoso que el ensayo de resistencia a esfuerzo cortante según UNE-EN 14509, anexo A3 donde la magnitud obtenida es la que resulta relevante para la manera en que actúa el núcleo dentro del panel. Sin embargo se consideró suficiente este ensayo sobre la plancha XPS ya que no se esperaba degradación en la misma, según la bibliografía estudiada.

3.2. Ensayos de la unión adhesiva entre la piel y el núcleo

Por su importancia en este trabajo, la unión adhesiva se evaluó a través del ensayo de tracción perpendicular a las caras, tal como recomienda la guía ETAG 016, y adicionalmente, a través del ensayo de comportamiento a cortante descrito en la norma UNE-EN: 12090⁶⁸.

3.2.1. Ensayo de tracción perpendicular a las caras

Este procedimiento describe el ensayo para la determinación de la resistencia a tracción perpendicular a las caras en paneles sándwich. El ensayo tiene como referencias la guía ETAG 016 y la norma UNE- EN 1607⁶³. El ensayo consiste en tomar una probeta cuadrada, extraída de un panel sándwich, fijar cada una de sus caras a un plato rígido, y traccionar estos platos a través de unas rótulas; el conjunto se lleva hasta la rotura, registrándose el valor y el modo de fallo.

Se define como resistencia a tracción perpendicular a las caras y se denota como σ_m , a la máxima fuerza de tracción registrada durante el ensayo, dividida por el área de la probeta sometida a tracción.

Para realizar los ensayos se utilizó una máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON 5583, equipada con una célula de carga de 10 kN. Además se utilizaron platos rígidos, una de cuyas caras está en contacto con la probeta y la otra está unida a una rótula que se conecta a la máquina de ensayos mecánicos.

En la *figura 3.27* se muestra un esquema del ensayo, así como un detalle de la geometría del plato rígido diseñado.

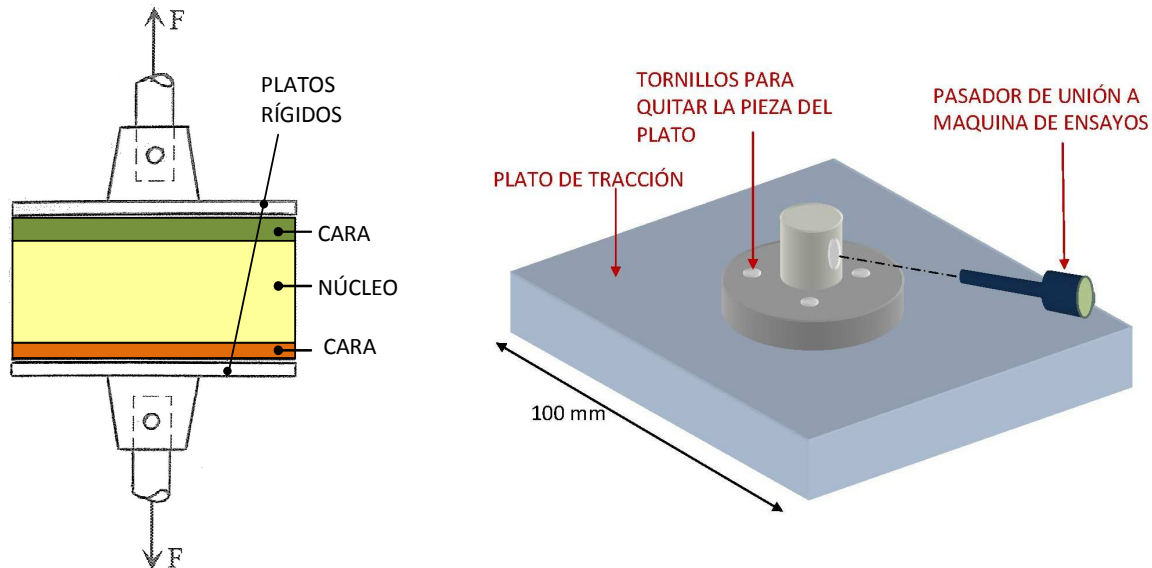


Figura 3.27. Esquema del ensayo de tracción perpendicular a las caras y detalle de la geometría del plato rígido diseñado para facilitar la limpieza, posterior al ensayo, de restos de adhesivo.

Extracción de las probetas

Tal como se explicó en el *aparatado 1.2 del presente capítulo* sobre el proceso de fabricación del panel, los tableros componentes del mismo se desplazan longitudinalmente sobre un sistema de rodillos bajo un pórtico fijo mecanizado con orificios a través de los cuales cae el adhesivo de manera continua sobre los elementos del panel. Estos hilos de adhesivo depositado están dispuestos sobre el tablero en sentido longitudinal. De esta manera se puede concluir que cada porción longitudinal del panel va recibiendo la misma cantidad de adhesivo en sentido longitudinal. Las fotografías que ilustran esta descripción pueden observarse en las *figuras 3.6 y 3.7*.

Por lo tanto se planificó la matriz de extracción de probetas según puede verse en la *figura 3.28* donde, por ejemplo, las probetas T1, T6, T11, hasta la T61 habrán de presentar una adhesión muy similar ya que no solo tienen todos los componentes pertenecientes al mismo lote, sino que incluso habrán sufrido exactamente la misma distribución longitudinal de adhesivo. Esto permitirá un análisis de los resultados más preciso. Estas probetas se han denominado con la letra T mayúscula en alusión a la expresión *Tracción perpendicular*.

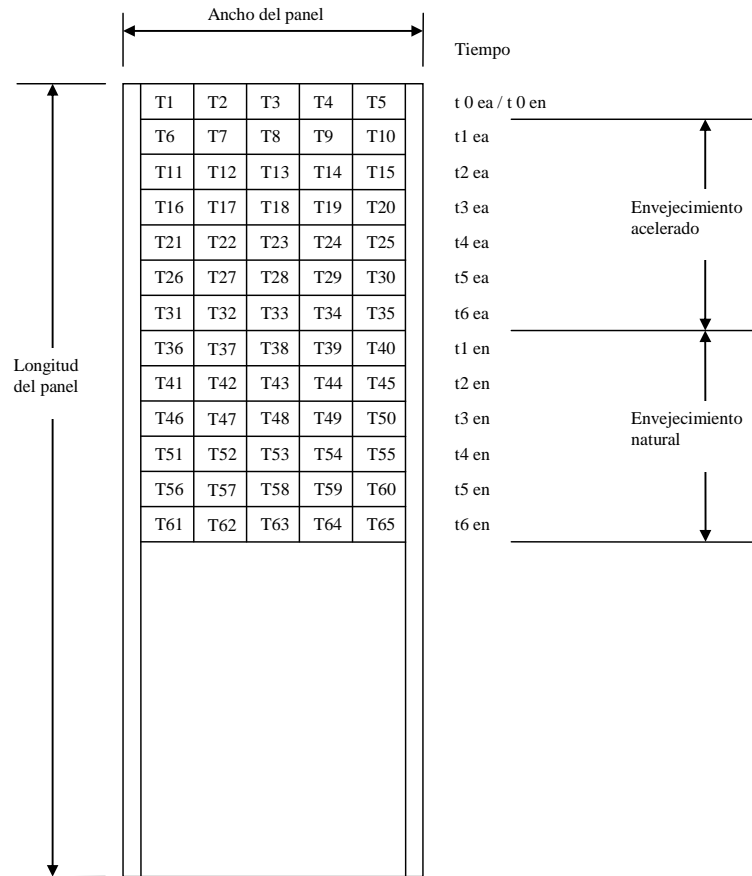


Figura 3.28. Extracción de las probetas para tracción perpendicular

Del ancho total del panel se decidió eliminar 30 mm en ambos bordes longitudinales, para evitar efectos tales como cantidad excesiva de adhesivo o la alteración del borde por ser zona donde se rectifica el panel para llevarlo a las dimensiones estándar.

Por lo tanto, para cada tiempo de envejecimiento t_{iea} y t_{ien} (de los ensayos de envejecimiento acelerado y natural respectivamente) se mecanizaron y ensayaron cinco probetas del panel como recomienda la norma.

Este procedimiento permite observar cómo evoluciona la fuerza de adherencia entre capas del panel comparando las probetas según la secuencia de disposición longitudinal de las mismas:

- Probetas T1 a T5: tiempo de envejecimiento t_{0ea} . Probetas para ensayos sin envejecimiento.

- Probetas T6 a T10: tiempo de envejecimiento t_{lea} . Ensayos al cabo de 15 días de envejecimiento.
- Etc.

Asimismo, estos envejecimientos acelerados pueden compararse con el envejecimiento natural de las probetas T36 a T40 para un tiempo de envejecimiento t_{len} , T41 a T45 para un tiempo de envejecimiento t_{2en} , etc.

Realización del ensayo

Previamente a la realización del ensayo, se identificaron adecuadamente la muestra, la probeta y se anotaron las dimensiones exactas de la misma, que nominalmente son de 100 x 100 mm.

Se aplicó un adhesivo en las caras de la probeta en contacto con la superficie de los platos. Se ha observado un buen comportamiento de los adhesivos de cianoacrilato. A continuación se presiona durante el tiempo necesario hasta alcanzar la máxima resistencia de esa unión adhesiva, lo que suele ocurrir al cabo de las 24 horas de la aplicación. Resulta importante rellenar bien la superficie con adhesivo ya que en este ensayo se corre el riesgo de que rompa la unión adhesiva de la probeta con el plato rígido, lo que resultaría en un ensayo fallido, teniendo en cuenta además que los materiales derivados de la madera absorben adhesivo. Durante la espera se almacenaron las probetas de ensayo, adheridas a sus platos rígidos, en condiciones de laboratorio a 23°C.

Tras la espera indicada, se coloca la probeta en la maquina universal de ensayos mecánicos por medio de los accesorios de fijación de los platos, y se deja preparado para comenzar el ensayo. Primero se coloca el pasador en la rotula superior, y después se ajusta a cero la lectura de la célula de carga mientras está suspendido de ella el conjunto formado por la probeta y los dos platos y rotulas correspondientes.

Como paso final, se coloca el pasador de la rotula inferior, con lo que el montaje está listo para comenzar la tracción. El ensayo se realizará a una velocidad de avance de la cruceta de 10 mm/min hasta que se produzca la rotura (véase esquema de la *figura 3.27*).

Tras finalizar el ensayo se tomará como carga de rotura el resultado de sumar al valor registrado en el momento de la rotura (generalmente el máximo registrado), el valor del peso del plato y rotula inferiores. La razón de esto es que estos pesos pueden ejercer una carga significativa sobre la probeta si la carga de rotura es baja, como ocurre en probetas envejecidas.

Toma de datos

Para cada ensayo se rellenará la hoja de toma de datos, en la cual aparecerán los resultados más relevantes, especialmente los referidos a:

- Identificación de la muestra y de la probeta
- Variaciones respecto a este procedimiento de ensayo
- Resultados de carga de rotura.
- Observaciones sobre el modo de fallo, prestando atención a la forma de fallo, análisis de la superficie de fallo, fotografías, etc.

3.2.2. Ensayo de cortadura según el método del ensayo doble

Cuando el panel se encuentra instalado, está sometido a varios tipos de esfuerzos, pero principalmente a flexión, debido al peso de las cargas dispuestas sobre él. Esto hace que la unión adhesiva entre capas sufra primordialmente tensiones de esfuerzo cortante. Por ello además de estudiar la unión adhesiva a través del ensayo de tracción, se consideró importante estudiarla a través de un ensayo de cortante, a pesar de que este ensayo no esté contemplado en la guía ETAG 016.

Como documento de referencia se tiene la norma UNE-EN: 12090⁶⁸. Este procedimiento establece el método para realizar el ensayo para la determinación del comportamiento a cortante en paneles sándwich por el método del ensayo doble.

El ensayo consiste en tomar dos probetas rectangulares, extraídas de un panel sándwich y someterlas a tensiones de cortadura transmitidas a dichas probetas a través de unos soportes

rígidos a los cuales se han unido. Se lleva el conjunto hasta rotura, y se registra la carga en el momento de la rotura, así como el modo de fallo.

Se define resistencia a cortadura, T , como la máxima fuerza aplicada a la probeta, dividida por el área del plano sobre el que actúa la fuerza.

Extracción de las probetas

El esquema de extracción de las probetas es igual al descrito para el caso de las probetas de tracción perpendicular, y por las mismas razones. En la *figura 3.29* puede verse el despiece del panel; las probetas se denominan con la letra C en referencia al término *Cortante*.

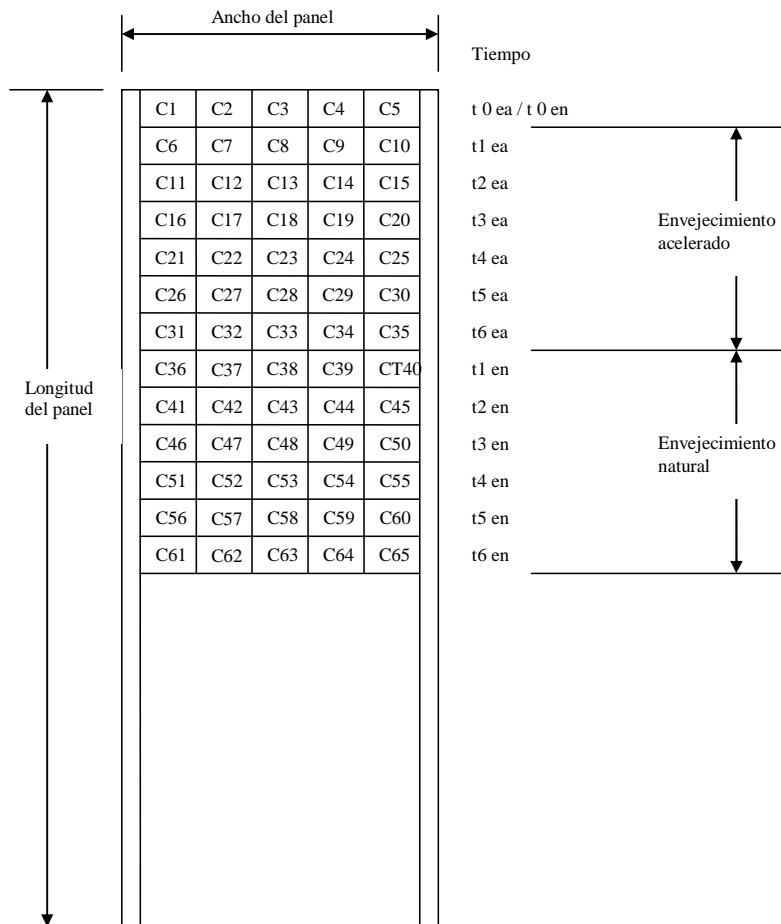


Figura 3.29. Despiece de la extracción de las probetas para cortante

Disposiciones previas al ensayo

Se utilizó la misma máquina universal de ensayos mecánicos INSTRON 5583 que para el ensayo descrito en el punto anterior, pero esta vez se utilizó una célula de carga de 100 kN. Así mismo se utilizaron platos rígidos con la forma y dimensiones apropiadas para el ensayo.

Cada probeta está formada por la unión de dos probetas de dimensiones nominales 200 mm x 100 mm. Se toma la probeta y se anotan los datos que la identifican así como sus dimensiones.

El montaje se muestra en la *figura 3.30*. Como criterio de colocación de las caras se toma siempre el mismo, por ejemplo que la cara del tablero de acabado esté en contacto con la pieza central del montaje, tal como puede verse en la dicha *figura 3.30*.

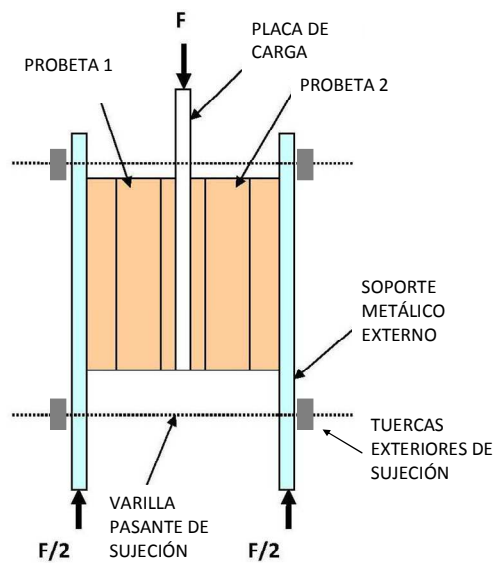


Figura 3.30. Esquema del ensayo de cortadura en paneles sándwich

Se aplicará el adhesivo en la superficie de la cara del panel sándwich y se aprietan las tuercas de las varillas roscadas pasantes de sujeción para mantener el conjunto bajo presión durante las 24 horas que han de pasar después de aplicar el adhesivo hasta alcanzar la máxima resistencia posible. Se utilizó un adhesivo de cianoacrilato. Resulta muy recomendable cubrir adecuadamente la superficie con adhesivo ya que en este ensayo se corre también el riesgo de que rompa la unión adhesiva de la probeta con su plato rígido.

La forma más sencilla de unir todas las piezas consiste en unir las probetas sándwich a la placa de carga (pieza central) y posteriormente unir uno de los soportes externos al conjunto. Tras esto se introducirían las varillas roscadas que evitan que el conjunto se abra durante el ensayo. Finalmente se dispone el otro soporte externo, insertándolo en las varillas ya colocadas. De esta manera se asegura que todos los agujeros pasantes acaben finalmente alineados y las varillas roscadas los atraviesen perfectamente sin tensiones excesivas.

Las varillas roscadas deben llevar tuercas en la parte más externa del conjunto. Estas tuercas deben apretarse firmemente durante el secado del adhesivo. Posteriormente, e inmediatamente antes del ensayo, estas tuercas se aflojaran de manera que toquen a las probetas pero que no las compriman durante la aplicación de la carga.

Realización del ensayo

Se toma el conjunto preparado como se ha explicado en el apartado anterior, y se coloca en la zona de ensayo de la maquina universal de ensayos mecánicos. El esquema del montaje puede verse en la *figura 3.31*

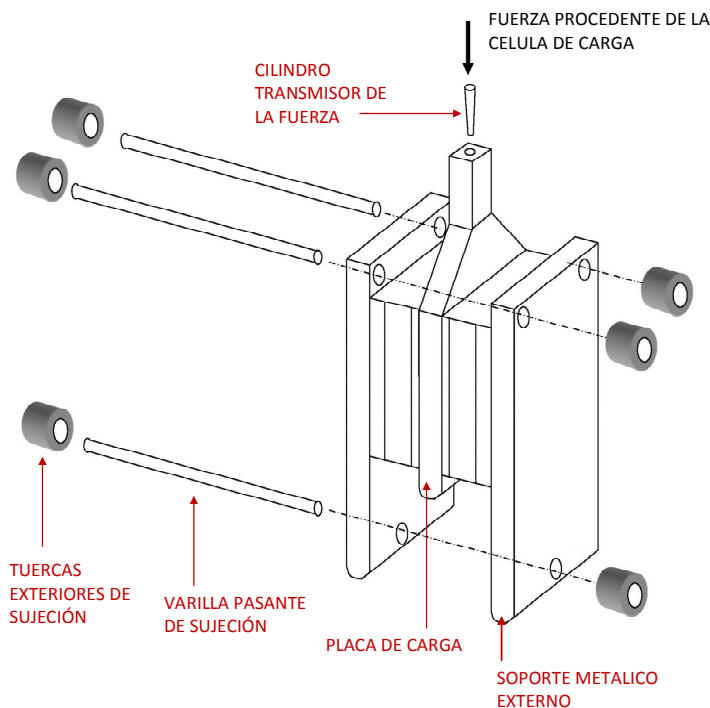


Figura 3.31. Ensayo de cortadura: utillaje diseñado y montaje del mismo

Con los soportes metálicos externos apoyados contra un plato inferior, se aplica una fuerza de compresión sobre la placa de carga con una velocidad de avance de 3 mm/min. Se continúa hasta producir la rotura, que se detecta con una caída de la fuerza leída por la maquina y un desplazamiento de las uniones adhesivas de la probeta. En otras ocasiones sobreviene la rotura del núcleo de espuma. Se hace notar que las varillas roscadas pasantes, limitadas con tuercas exteriores a los soportes metálicos externos, evitan que éstos últimos se abran.

Toma de datos

Para cada ensayo se rellenará la hoja de toma de datos, en la cual aparecerán los resultados más relevantes, especialmente los referidos a:

- Identificación de la muestra y de la probeta
- Variaciones respecto a este procedimiento de ensayo
- Observaciones sobre el modo de fallo, prestando atención a la forma de fallo, análisis de la superficie de fallo, fotografías, etc.
- Resultados de carga de rotura; se registra la fuerza máxima en N y la tensión máxima en MPa; $T = F_m/A$; donde:
 - T : tensión máxima alcanzada en MPa
 - F_m : fuerza máxima alcanzada en N
 - A : suma de las áreas correspondientes a las secciones transversales de las probetas de ensayo en mm^2 ; es decir: (largo 1 x ancho 1) + (largo 2 x ancho 2).

3.3. Ensayo de resistencia mecánica del panel completo. Flexión positiva

Tanto en la guía ETAG 016-1, anexo C1, como también en el informe técnico de la UEAtc⁶⁹ referente al panel sándwich, se describe un ensayo para determinar la resistencia mecánica de un panel simplemente apoyado sometido a una carga positiva uniformemente repartida.

Este ensayo evalúa la resistencia mecánica y estabilidad del panel. La norma, en su parte relativa a la seguridad al uso, exige que el panel compuesto ligero autoportante tenga una adecuada resistencia a cargas estáticas y dinámicas. Este ensayo simula las acciones

relevantes que deben ser consideradas como son las cargas debidas al peso propio y otros elementos de cobertura que deba soportar, y las cargas de viento y de nieve.

La resistencia mecánica del panel se evalúa mediante una configuración de ensayo estático del panel apoyado en tres vigas o correas (dos vanos). Esto se hace así debido a que son los apoyos mínimos recomendados por el fabricante.

El método indicado por la ETAG 016 para llevar a cabo este ensayo consiste en tomar la disposición anteriormente descrita y rodear el panel con una bolsa de manera que ésta se ciña a la cara superior del panel, y se cierre contra la base o bancada de ensayo, creándose un habitáculo por debajo de la cara inferior del panel tal como se puede ver en la *figura 3.32*. Posteriormente mediante una bomba de vacío se extrae el aire y de esta manera el panel estaría sometido a la presión atmosférica sólo en su cara superior por lo que se conseguiría una carga uniformemente repartida de 0,1 MPa (presión atmosférica normal).

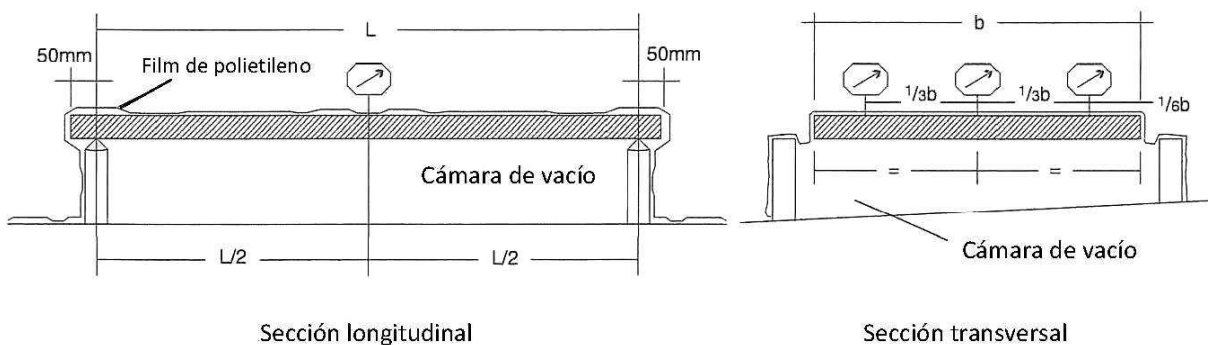


Figura 3.32. Esquemización de la realización del ensayo de carga uniformemente aplicada mediante la aplicación de vacío

Se llevaron a cabo varios intentos para hacer el ensayo de esta manera, pero este procedimiento resultó ser inviable debido a que en tamaños grandes resultaba muy complicado y laborioso conseguir un sellado lo suficientemente efectivo como para alcanzar los valores cercanos al vacío necesarios. En las *figuras 3.33* y *3.34* se muestra una de las pruebas que se realizó a pequeña escala con una válvula y que no funcionó como se pretendía. Por lo tanto se descartó este procedimiento de ensayo.



Figura 3.33. Maqueta del montaje



Figura 3.34. Disposición de la bolsa y válvula para extracción a vacío

Se procedió entonces a probar otro procedimiento de ensayo, mostrado en las figuras 3.35 y 3.36. Este procedimiento consiste en distribuir la carga sobre el panel en ocho puntos. Esta disposición de carga es prácticamente equivalente a una carga uniformemente distribuida y la ETAG 016 acepta que se utilice siempre que el panel se disponga como máximo sobre uno o dos vanos y la carga no cause fallo local.

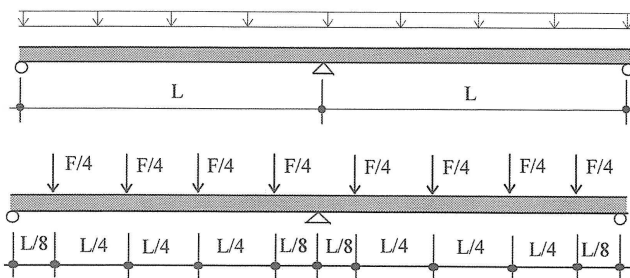


Figura 3.35. Esquema propuesto, del ensayo de dos vanos, por la ETAG 016

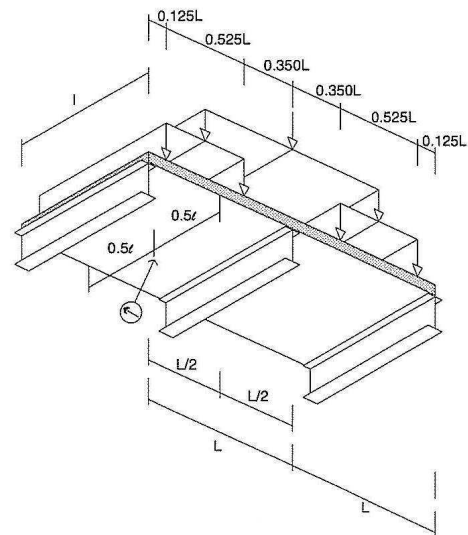


Figura 3.36. Esquema propuesto del ensayo para dos vanos por el informe técnico de la UEAtc

Para la aplicación de la carga se utilizó una maquina universal de ensayos mecánicos, INSTRON 8853 equipada con una célula de carga máxima de 100 kN. A esta máquina

universal se le añadió una bancada a modo de soporte para el panel tal y como se puede observar en las *figuras 3.37 y 3.38*.

Se diseñó un utillaje específico con objeto de repartir la carga sobre el panel. Como se puede apreciar en estas figuras, desde el actuador hidráulico de la maquina, la fuerza aplicada se divide en dos fuerzas iguales, cada una de las cuales a su vez se dividiría en dos, y cada una de éstas nuevamente en dos, hasta que esta sucesiva cadena de división de fuerzas alcanza un total de ocho líneas de aplicación de carga. El conjunto así diseñado estaba formado por partes articuladas de manera que libremente las líneas de aplicación de carga se adaptaban a la deformación que iba adquiriendo el panel durante el transcurso del ensayo.



Figura 3.37. Ensayo de flexión positiva; disposición inicial previa al comienzo del ensayo. Instalaciones de Fundación ITMA.

El ensayo consiste en la aplicación progresiva de la carga, mientras se registra, en función del tiempo, la terna de valores: carga aplicada, flecha en el centro del vano 1 y flecha en el centro

del vano 2. La flecha o desplazamiento de los vanos se midió con un extensómetro de gran desplazamiento tipo LVDT.

Después de un primer prototipo que resultó poco operativo, se realizó un segundo prototipo que resultó definitivo. En esta ocasión todos los elementos estaban vinculados con articulaciones de manera que formaban un todo fácilmente montable y desmontable, que no aportaba una carga inicial significativa al panel y que permitía una distribución uniforme de la carga imprimida desde la cruceta superior a través de la célula de carga. Los resultados se validaron con un modelo analítico que se describirá más adelante. En las *figuras 3.38 a 3.40* se muestran algunas fotografías tomadas en algunos de los ensayos realizados, en las cuales se puede apreciar el modo de funcionar del dispositivo ideado.

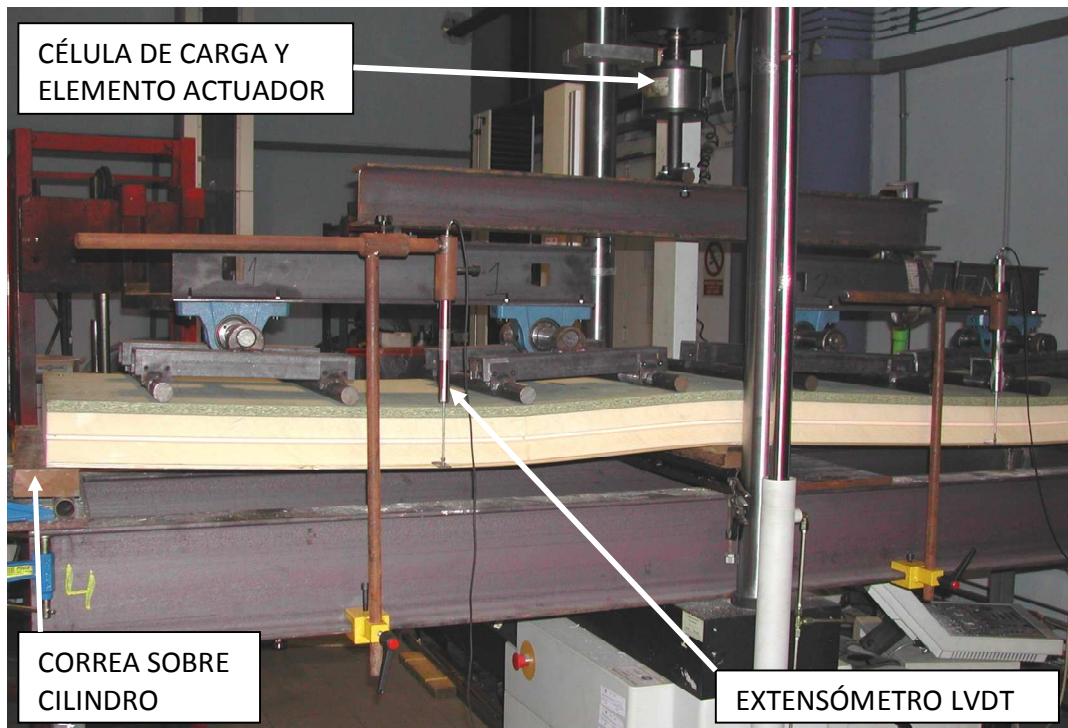


Figura 3.38. Ensayo de flexión positiva; ensayo en curso



Figura 3.39. Flexión positiva; detalle de la flexión del panel



Figura 3.40. Flexión positiva; detalle de la rotura tras un ensayo

Finalmente se decidió que este fuera uno de los ensayos a utilizar en la evaluación de la degradación del panel. La razón es que representa muy bien el comportamiento global del panel. Por otra parte se consideró que resultaría muy interesante relacionar los ensayos del panel completo con otros ensayos llevados a cabo en probetas pequeñas extraídas de los paneles en las que se evalúan las propiedades intrínsecas de cada uno de los materiales que forman parte del panel y sus uniones adhesivas.

3.3.1. Modelización analítica del ensayo de flexión positiva

Davies⁸ describe una metodología analítica para obtener todas las magnitudes de una estructura sándwich relativas a las tensiones y a las deformaciones generadas en ella en función de la carga que actúe sobre la misma. Empleando esta metodología, y con el objetivo de validar los resultados obtenidos en los ensayos de flexión positiva, se desarrollaron unas expresiones analíticas para modelizar estos ensayos.

Los valores numéricos empleados para alimentar el modelo (que se expondrá a continuación) fueron los correspondientes al ensayo de flexión positiva sobre el PANEL DE FRISO sin envejecer; estos valores, que fueron obtenidos en ensayos realizados sobre el lote objeto de estudio, fueron los siguientes:

- Modulo de Young del tablero PAR, $E_{FI} = 2200E+6 \text{ N/m}^2$
- Sección transversal del tablero PAR, $A_{FI} = 0,011324 \text{ m}^2$

- Modulo de Young del tablero FRI, $E_{F2} = 9140E+6 \text{ N/m}^2$
- Sección transversal del tablero FRI, $A_{F2} = 0,005506 \text{ m}^2$
- Espesor efectivo de la plancha XPS, $e = 0,07375 \text{ m}$
- Espesor de la plancha XPS, $d_C = 0,0595 \text{ m}$
- Longitud del vano, $L = 1,19 \text{ m}$, ya que los apoyos exteriores dejan $0,025 \text{ m}$ en cada uno de los dos extremos del panel.
- Ancho del panel, $b = 0,598 \text{ m}$
- Modulo de cortante del núcleo según UNE-EN 14509⁶¹, Anexo A.3, $G_C = 1028E+4 \text{ N/m}^2$

Los valores numéricos anteriores y los que resulten de su sustitución en las ecuaciones obtenidas se muestran, en este desarrollo, en unidades del Sistema Internacional para facilitar el seguimiento de los cálculos.

La ecuación que se emplea en esta modelización indica que la derivada segunda de la deformada (w) con respecto a la variable longitudinal (y) resulta ser la suma de los efectos causados por el momento flector (primer sumando a la derecha de la ecuación), el esfuerzo cortante (segundo sumando) y por la diferencia de temperaturas entre las caras del panel (tercer sumando).

$$w'' = -\frac{M_S}{B_S} + \frac{V_S'}{A_C G_{eff}} - \theta \quad (\text{Ec. 3.1})$$

El ensayo de flexión positiva realizado no aplica una diferencia de temperaturas entre las caras del panel, por lo tanto en la ecuación desaparecería el término relativo a este fenómeno.

Primeramente se calculó un modelo aproximado, denominado Modelo 1, tomando las siguientes simplificaciones:

1. El desplazamiento vertical causado por las ocho líneas de aplicación de carga se considera aproximadamente igual al producido por una carga de igual valor total que estuviera uniformemente distribuida. Esta simplificación, aceptada por la ETAG 016 en el caso de disposiciones en dos vanos y siempre que no incorpore un fallo local inédito,

evita tener que operar con diez tramos diferentes de diagramas de momentos flectores y de cortantes.

2. El apoyo central, formado en el ensayo por una distribución de carga impuesta por la correa central a lo largo de un ancho de la misma de 100 mm, se simplifica y se toma como una carga puntual. Por tanto se considera que la dimensión de 100 mm de ancho de correa frente a la longitud total de tramo de panel sujeto a flexión ($1190 \times 2 = 2380$ mm), así lo permite. Esto elimina otro tramo de diagramas de momentos flectores y de cortantes a estudiar, con lo que finalmente se tienen dos tramos.

Con estas simplificaciones el Modelo 1, resulta ser de una hiperestaticidad de valor uno. Según la metodología propuesta por Davies se puede considerar como la suma de dos estructuras estáticamente determinadas, como se ilustra en la *figura 3.41*.

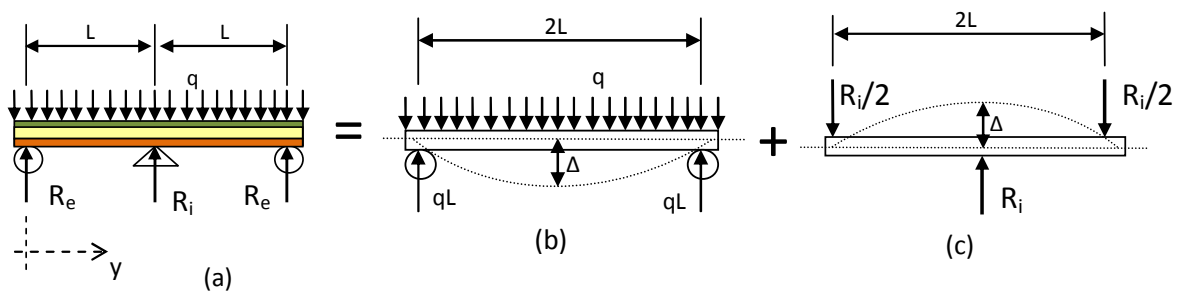


Figura 3.41. Modelo 1 del ensayo de flexión positiva y su equivalencia como suma de dos estructuras estáticamente determinadas. La acción q se expresa en carga por unidad de longitud (N/m), por lo tanto la carga total sobre la estructura sería de $2qL$.

Ahora se combinan las ecuaciones recogidas por Davies para el caso de un solo vano, con el fin de determinar el valor de las reacciones en los apoyos, R_i , R_e . Esto se realiza igualando el valor que toma la flecha máxima en los casos *b* y *c* de la *figura 3.41*. La expresión de la flecha para el caso del panel uniformemente cargado es:

$$\Delta = \frac{5q(2L)^4}{384B_s}(1 + 3,2k_{2L}) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Mientras que para el caso del panel con una carga puntual centrada es:

$$\Delta = \frac{R_i(2L)^3}{48B_s}(1+4k_{2L}) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

$$k_{2L} = \frac{3B_s}{A_C G_{eff} (2L)^2} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

De la resolución de esas ecuaciones se obtiene R_i , y a partir de él, R_e , con lo que se tienen finalmente las siguientes expresiones para el caso particular que se está estudiando:

$$R_i = qL \frac{5 + 4k}{4(1 + k)} = 1,412 q \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$R_e = qL \frac{3 + 4k}{8(1 + k)} = 0,484 q \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$k = \frac{3B_s}{A_C G_{eff} L^2} = 0,341 \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Tras la determinación de las reacciones, se puede obtener el diagrama de momentos flectores, M_s y esfuerzos cortantes, V_s correspondientes al Modelo 1 (*figura 3.41.a*); esto se hace en cada uno de los dos tramos y de la siguiente manera:

Para y entre 0 y L

$$M_s = -\frac{q}{2} y^2 + qL \frac{3 + 4k}{8(1 + k)} y \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$V_s = -qy^2 + qL \frac{3 + 4k}{8(1 + k)} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Para y entre L y 2L

$$M_s = -\frac{q}{2}y^2 + qL \frac{13+12k}{8(1+k)}y - qL^2 \frac{5+4k}{4(1+k)} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

$$V_s = -qy^2 + qL \frac{13+12k}{8(1+k)} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Aplicando la ecuación de la derivada segunda de la deformada respecto a la variable y .

Para y entre 0 y L

$$w'' = -\frac{M_s}{B_s} + \frac{V_s'}{A_C G_{eff}} = -\frac{1}{B_s} \left(-\frac{q}{2}y^2 + qL \frac{13+12k}{8(1+k)}y \right) + \frac{-q}{A_C G_{eff}} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Para y entre L y $2L$

$$w'' = -\frac{M_s}{B_s} + \frac{V_s'}{A_C G_{eff}} = -\frac{1}{B_s} \left(-\frac{q}{2}y^2 + qL \frac{13+12k}{8(1+k)}y - qL^2 \frac{5+4k}{4(1+k)} \right) + \frac{-q}{A_C G_{eff}} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Se integran estas expresiones dos veces respecto a la variable y . Con esto se alcanzan las siguientes expresiones para el valor de la flecha en cada punto, y donde las constantes de integración A_1, A_2, B_1, B_2 son, en principio, incógnitas

Para y entre 0 y L

$$w = \iint w'' dy dy = -\frac{1}{B_s} \left(-\frac{q}{24}y^4 + qL \frac{13+12k}{48(1+k)}y^3 \right) + \frac{-q}{2A_C G_{eff}}y^2 + A_1y + B_1 \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Para y entre L y $2L$

$$w = \iint w'' dy dy = -\frac{1}{B_s} \left(-\frac{q}{24}y^4 + qL \frac{13+12k}{48(1+k)}y^3 - qL^2 \frac{5+4k}{8(1+k)}y^2 \right) + \frac{-q}{2A_C G_{eff}}y^2 + A_2y + B_2 \quad (\text{Ec. 3.15})$$

Para la determinación de las constantes de integración se emplean las condiciones de contorno que imponen que la deformada tome el valor cero en cada apoyo:

1. $w=0$ cuando $y=0$
2. $w=0$ cuando $y=L$, aproximándose desde $y=0$
3. $w=0$ cuando $y=L$, aproximándose desde $y=2L$
4. $w=0$ cuando $y=2L$

De la resolución del sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas se obtienen los valores de las cuatro constantes de integración que resultan ser:

$$A_1 = \frac{qL^3(8k^2 + 10k + 1)}{48B_s(1+k)} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$B_1 = 0 \quad (\text{Ec. 3.17})$$

$$A_2 = \frac{qL^3(24k^2 + 6k - 29)}{48B_s(1+k)} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

$$B_2 = \frac{2qL^4(-8k^2 - 6k + 5)}{48B_s(1+k)} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

Sustituyendo las constantes y reordenando las expresiones queda finalmente la siguiente ecuación, en dos ramas, que proporciona el valor de la flecha en cada punto, en función de la carga por unidad de longitud, q :

Para y entre 0 y L

$$w = \frac{q}{48B_s(1+k)} [2(1+k)y^4 - (3+4k)Ly^3 - 8k(1+k)L^2y^2 + (1+10k+8k^2)L^3y] \quad (\text{Ec. 3.20})$$

Para y entre L y $2L$

$$w = \frac{q}{48B_s(1+k)} [2(1+k)y^4 - (13+12k)Ly^3 + 2(15+8k-4k^2)L^2y^2 - (29-6k-24k^2)L^3y + 2(5-6k-8k^2)L^4] \quad (\text{Ec. 3.21})$$

Sustituyendo por los valores numéricos correspondientes al montaje y a los materiales del presente trabajo se tiene que:

Para y entre 0 y L

$$w = q(1E - 7)(4,59721 y^4 - 8,90090 y^3 - 8,86782 y^2 + 15,41022 y) \quad (\text{Ec. 3.22})$$

Para y entre L y $2L$

$$w = q(1E - 7)(4,59721 y^4 - 34,86460 y^3 + 83,82261 y^2 - 69,84998 y + 13,95370) \quad (\text{Ec. 3.23})$$

Conviene resaltar que el mayor valor de la deformada no se obtiene exactamente en el centro del vano, pero si en un punto cercano al mismo. En cuanto a los momentos flectores, se tienen los siguientes valores relevantes, en el apoyo intermedio y en el centro del vano:

$$M_{S, \text{apoyo intermedio}} = -\frac{qL^2}{8} \left(\frac{1}{1+k} \right) \quad (\text{Ec. 3.24})$$

$$M_{S, \text{centro del vano}} = \frac{qL^2}{16} \left(\frac{1+2k}{1+k} \right) \quad (\text{Ec. 3.25})$$

Considerando que se observó que en la zona del apoyo intermedio se producían gran parte de los fallos en los ensayos realizados, y que también en el Modelo 1 esa zona resultaba ser la de mayor momento flector, se decidió refinar el modelo en ese punto. Para ello se eliminó, en el Modelo 1, la segunda de las simplificaciones, con lo que el apoyo de la correa central se consideró como una carga no puntual, sino distribuida uniformemente (ver figura 3.42).

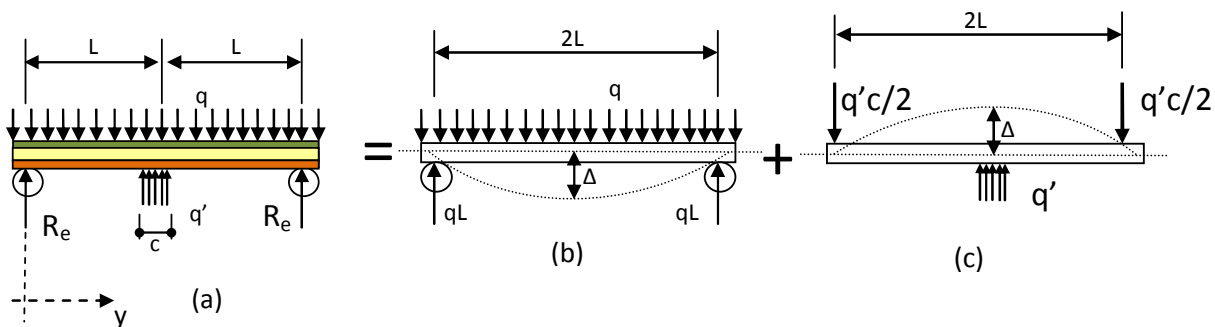


Figura 3.42. Modelo2 del ensayo de flexión positiva y su equivalencia como suma de dos estructuras estáticamente determinadas. La acción q se expresa en carga por unidad de longitud (N/m), por lo tanto la carga total sobre la estructura sería de $2qL$. También q' se expresa en N/m.

Primeramente se obtuvo el valor de q' que produce el desplazamiento virtual necesario para mantener en su posición el punto central de la estructura. Los valores obtenidos para q' y para la reacción en los extremos resultaron ser:

$$q' = 14,20407 q \quad (\text{Ec. 3.26})$$

$$R_e = 0,47980 q \quad (\text{Ec. 3.27})$$

Procediendo de manera similar a como se hizo en el caso del Modelo 1 se llega a la expresión de la deformada w , que en este caso es una ecuación en tres ramas.

Para y entre 0 y $L-C$ (y entre 0 y $1,14$)

$$w = q(1E - 7)(4,59714 y^4 - 8,82279 y^3 - 8,86748 y^2 + 15,04769 y) \quad (\text{Ec. 3.28})$$

Para y entre $L-C$ y $L+C$ (y entre $1,14$ y $1,24$)

$$w = q(1E - 7)(-60,70091 y^4 + 288,94056 y^3 - 392,09083 y^2 + 114,73117 y + 53,53123) \quad (\text{Ec. 3.29})$$

Para y entre $L+C$ y $2L$ (y entre $1,24$ y $2,38$)

$$w = q(1E - 7)(4,59703 y^4 - 34,94031 y^3 + 84,37841 y^2 - 70,76721 y + 14,06818) \quad (\text{Ec. 3.30})$$

La acción q se expresa en carga por unidad de longitud (N/m), por lo tanto la carga total sobre la estructura sería de $2qL$. Como ejemplo, la *figura 3.43* representa los resultados obtenidos aplicando los dos modelos a un valor de carga tal que provoca, en el Modelo 2, una flecha de $0,00595$ m (correspondiente a $L/200$ para los paneles de este trabajo) en el centro del vano.

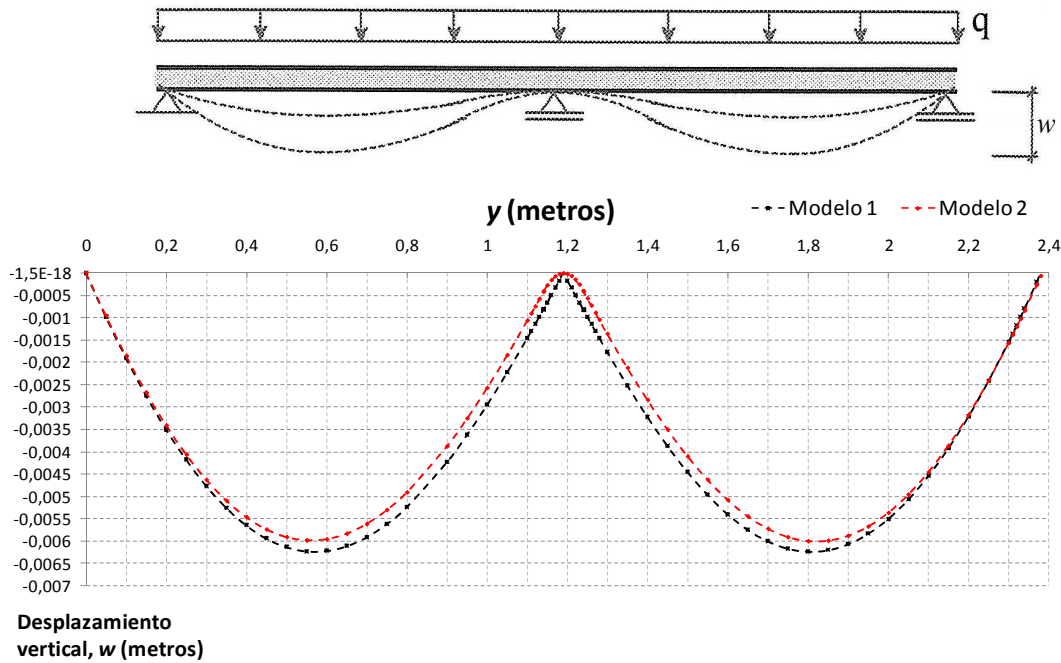


Figura 3.43. Representación de la deformada cuando se aplica un valor de carga $q=13150$ N/m, lo que supone sobre el panel una carga total de 31,3 kN. En tal caso el centro del vano experimentaría una flecha de 0,00595 m según el Modelo 2.

Este razonamiento, empleado en la determinación de la deformada con el objetivo de validar los ensayos, no puede aplicarse de manera directa en la determinación de la tensión de rotura de cada capa, ya que en el apoyo central se disponen los tornillos que tienen un efecto acelerador sobre la rotura del tablero PAR. En cuando al modo de fallo por deslizamiento de una capa respecto a la otra, precisamente la presencia de los tornillos de sujeción a la correa entorpece ese desplazamiento entre las capas constituyentes.

3.3.2. Procedimiento de ensayo de flexión positiva en panel con tres apoyos y ocho líneas de carga.

Este procedimiento describe la realización del ensayo de flexión positiva en paneles sándwich para el caso en el que el panel se apoye en tres apoyos y la carga se aplica en ocho líneas de aplicación de carga. Un esquema de la disposición del ensayo puede verse en las figuras 3.44 y 3.45.

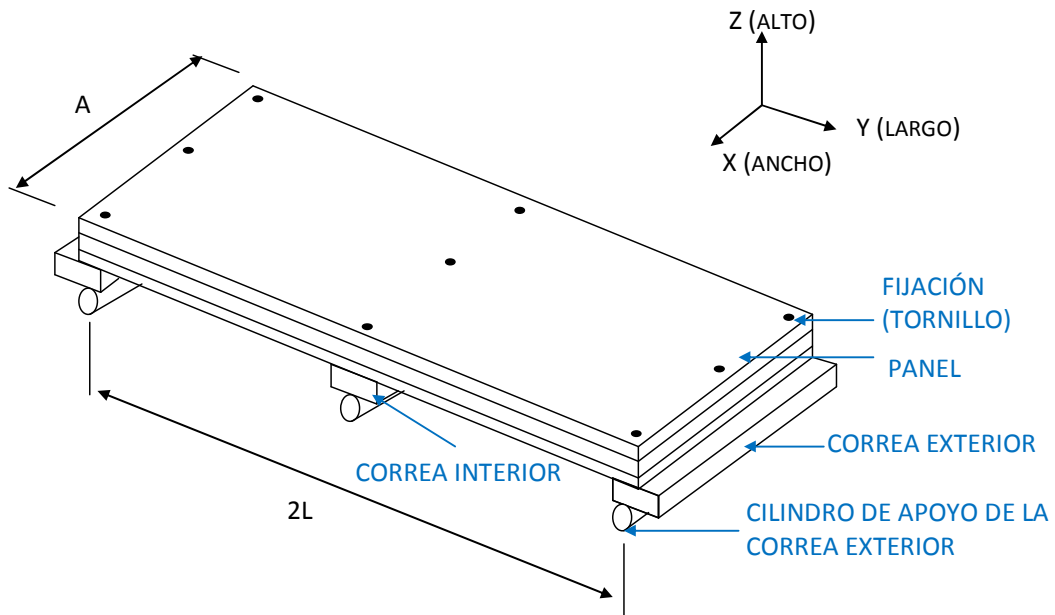


Figura 3.44. Disposición del panel previamente al montaje del utillaje

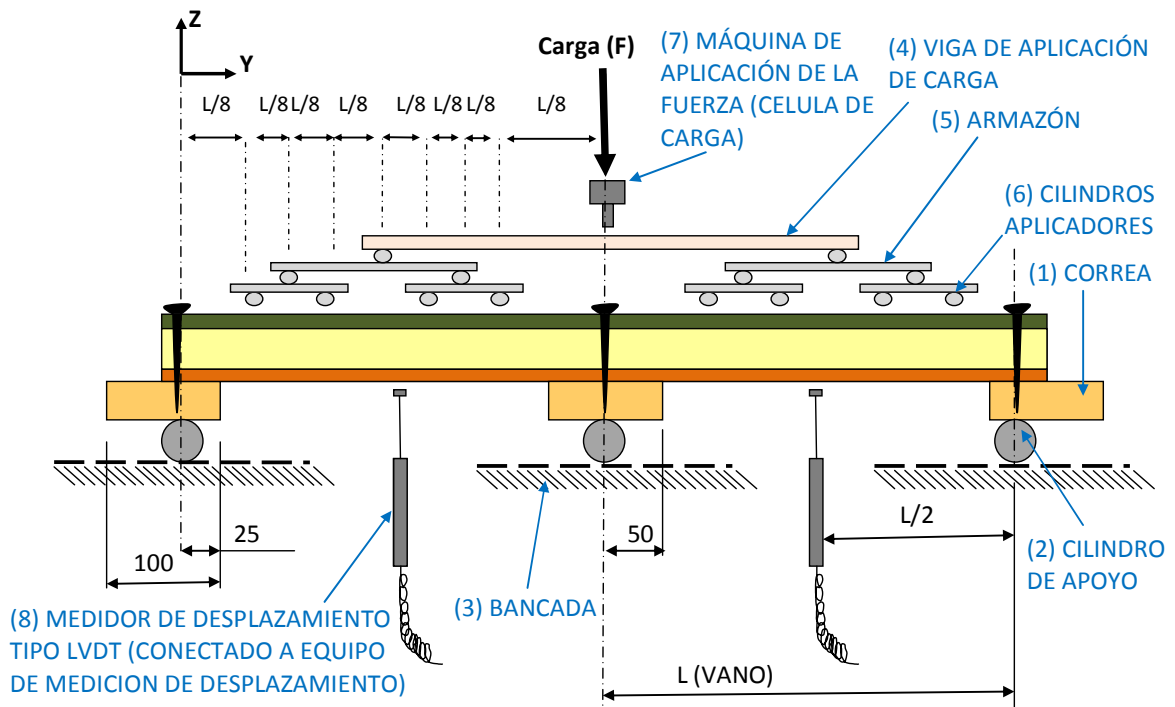


Figura 3.45. Disposición, previa al inicio del ensayo, del panel y del utillaje empleado

El ensayo simula el efecto de una carga uniformemente aplicada sobre toda la superficie del panel. Esta carga, que inicialmente vale cero, se va incrementando progresivamente hasta que se alcanza la rotura del panel. El ensayo se realiza empleando una bancada dispuesta en el interior del pórtico de trabajo de una maquina universal de ensayos mecánicos INSTRON

8561. Se registra, en función del tiempo, la fuerza leída por la célula de carga y el incremento de la flecha en el centro de cada uno de los dos vanos.

Descripción de los elementos utilizados en el ensayo

Se describen los elementos que intervienen en el ensayo y se numeran según se ilustra en la *figura 3.45*:

1. *Correa*. Es el madero de protección que simula el elemento viga sobre el que apoya el panel en la construcción real. Se comprobó que la madera de pino resultaba inadecuada ya que se rompe durante el ensayo, sin embargo la madera de iroko da buenos resultados. La longitud de las correas será igual a la anchura del panel (598 mm), la anchura será de 100 mm, y la altura la suficiente para atornillar las fijaciones, en este caso tornillos autorroscantes, sin que lleguen a atravesar la correa. Hay dos correas exteriores y una interior.

2. *Cilindro de apoyo*. Es cada uno de los cilindros metálicos sobre los que apoya el conjunto panel + correas y que tienen como objeto que el panel esté simplemente apoyado, permitiendo la rotación en la zona de los apoyos.

3. *Bancada*. Es la estructura plana e inmóvil sobre la que descansa todo el conjunto y que sirve de referencia espacial para el ensayo.

4. *Viga de aplicación de carga*. Es el elemento del utillaje, en el centro del cual se aplica la carga puntual total procedente de la máquina de aplicación de la fuerza y que reparte esta carga puntual en dos cargas iguales, cada una de las cuales recae en los denominados armazones. La unión entre la máquina de aplicación de la fuerza y la viga es un contacto tipo rótula que gira libremente.

5. *Armazón*. Es la estructura que transmite la carga procedente de la viga a los cilindros aplicadores. La unión entre armazón y pareja de cilindros aplicadores es un contacto tipo rótula que gira libremente.

6. *Cilindros aplicadores*. Son los cilindros que transmiten la carga al panel. Se trata de ocho cilindros iguales situados en las posiciones indicadas en la guía ETAG 016 para simular una carga uniformemente repartida.

7. *Maquina de aplicación de la fuerza*. Es la maquina universal de ensayos mecánicos a través de la cual se aplica la fuerza total sobre el panel. Esta fuerza, que aplica la maquina en un punto, es repartida por igual en ocho líneas sobre el panel, a través del utillaje.

8. *Medidor de desplazamiento tipo LVDT*. Es un elemento que registra el desplazamiento del punto en el cual se aplica, en este caso en el centro del vano durante todo el ensayo. Está conectado a un equipo que se ha denominado *Equipo de medición del desplazamiento*.

Equipos y accesorios

Además del equipamiento anteriormente definido, se emplearon las siguientes maquinas:

- Máquina Universal de Ensayos Mecánicos INSTRON 8561. Esta máquina está equipada con Célula de carga de 100 kN, Modelo 2528.
- Máquina Universal de Ensayos Mecánicos INSTRON 5583. Esta máquina está equipada con Medidores de Desplazamiento Lineal LVDT de ± 50 mm, Marca SOLARTRON.

Disposiciones previas y realización del ensayo.

A continuación se indican los pasos necesarios previos a la realización del ensayo.

1. Se anota en la hoja de toma de datos el código que identificativo del panel. Antes del montaje hay que asegurarse de que el pistón de la máquina de aplicación de fuerza va a tener recorrido suficiente. El recorrido total del pistón es de 100 mm, por tanto el ensayo debe comenzar con el pistón en la parte más alta de su recorrido. Se mide el espesor total del panel en su zona central y en los laterales. Esto se realiza inmediatamente antes de unirlo a las correas.

2. Se fijan las tres correas en el panel, con tres tornillos cada una. Los tornillos son de diámetro 6, longitud total 100, y longitud de zona roscada, 70 mm, y se disponen a una distancia de 25 mm del borde del panel, tal como puede verse en la *figura 3.45*. En el eje x la distancia a la que se disponen los tres tornillos puede ser variada en cada ensayo, con el fin de reutilizar las mismas correas, ya que se estima que esto no tiene influencia en el resultado del ensayo. Se vuelve a medir el panel en su centro, después de haber atornillado las correas. Esta operación se repetirá también a los cinco minutos de finalizado el ensayo.
3. Se marcan las posiciones sobre las que actuarán los medidores de desplazamiento LVDT, y se disponen unas pequeñas piezas metálicas planas sobre las que estos apoyarán, con el objetivo de que los LVDT puedan ubicarse en una posición por encima del panel para evitar daños en los mismos cuando se produzca la rotura de la probeta.
4. Se lleva el panel sobre los cilindros de apoyo vinculados a la bancada. Las correas se apoyan sobre estos cilindros de apoyo. Se marcan en el panel las distancias a las que se situarán los cilindros aplicadores, y el armazón. Estas distancias se toman en función de la longitud del panel, tal como se indica en la *figura 3.45*. En el caso del panel estudiado, de la longitud total (2.430 mm) se restan 25 mm de cada uno de los dos extremos del mismo, y el resultado se divide entre dos, resultando un valor de longitud del vano (L) de 1190 mm. Por lo tanto $L/200 = 5,95$ mm, que se puede aproximar a 6 mm.

Cabe indicar que el valor de la carga correspondiente a un desplazamiento vertical del centro del vano (flecha) de $L/200$ es el valor límite de deformación admisible en la normativa de diseño, y se calcula, en los ensayos, por ser un parámetro usualmente empleado. En este caso dado que hay dos vanos, se reflejará en las tablas de resultados el valor obtenido en cada uno de los dos captadores de desplazamiento LVDT. Se emplea la metodología de corrección de la gráfica que se describe más adelante.

5. Se colocan los cilindros aplicadores y los armazones, y sobre éstos se dispone la viga. Sobre una muesca que tiene la viga en su centro se aplica la fuerza de la maquina. Se

coloca la sujeción de seguridad que evita la caída del utillaje aplicador de fuerza en caso de que el panel rompa de manera catastrófica en el ensayo.

6. Se colocan los medidores LVDT en el centro del vano ya marcado con anterioridad, y se comprueba que funcionan correctamente, que tienen un recorrido limpio, sin saltos y que miden correctamente. Para ello basta con desplazarlos una distancia de unos 10 mm insertando una probeta de control dimensional entre panel y LVDT.
7. Se preparan las máquinas para el ensayo. Hay que asegurarse de que la máquina de aplicación de la fuerza y la máquina de medición del desplazamiento recogen el mismo número de puntos por segundo de lectura, con objeto de obtener tres columnas de números, que son: cada uno de los dos desplazamientos del LVDT (mm) y el registro de la fuerza de la célula de carga.

Se inicia el ensayo sin aplicar ninguna precarga para asentar el panel, y por tanto el ensayo comienza inicialmente con una carga próxima a 0 kN. Al empezar el ensayo de esta manera, y debido a la falta de planitud del panel, en algunos casos se observa que hay alguna correa que se mantiene sin apoyar en su cilindro correspondiente. Esto se traduciría en la gráfica en un desplazamiento brusco de la lectura del LVDT sin apenas incremento de la lectura de la carga. Para solventar este problema se puede hacer una precarga hasta el punto de asentar plenamente las tres correas sobre sus cilindros de apoyo, y a partir de esa situación comenzar el ensayo.

El ensayo se realiza en control de desplazamiento y con una velocidad de avance del pistón de 10 mm/minuto. En el comienzo del ensayo se debe comprobar que las medidas de desplazamiento de los dos LVDT sean similares, y según avanza el mismo, las mediciones se volverán disimilares, ya que uno de los vanos será el que finalmente rompa presentando una mayor deformación.

Después de la rotura el panel se vuelve a medir el espesor total del panel y de cada una de sus caras.

Tratamiento de resultados.

Una vez finalizado el ensayo se recogen las tres columnas de resultados registrados: carga, desplazamiento del vano 1 y desplazamiento del vano 2. De esta manera se tendrán las columnas de números que se pueden ver en el ejemplo siguiente de la *tabla 3.6*, para cada uno de los dos LVDTs.

<i>Columna 1</i>	<i>Columna 2</i>	<i>Columna 3</i>	<i>Columna 4</i>
Desplazamiento medido por el LVDT (mm)	Fuerza leída por la maquina (kN)	Fuerza leída por la maquina + peso del utillaje (kN)	Fuerza leída por la maquina + peso del utillaje (kN/m ²)
0,00	0,00	0,00+1,2	(0,00+1,2)/(2L·A)
0,02	0,15	.....	.....
0,04	.....	.....	.....
0,05	.....	.....	.....
1,22	.....	.....	.....

Tabla 3.6. Columna ejemplo de los pares de números Fuerza leída en célula de carga – Desplazamiento leído en LVDT.

Seguidamente se representa el desplazamiento obtenido (columna 1) frente a la carga por unidad de superficie (columna 4). Para pasar de la columna 3 a la columna 4, hay que tener en cuenta que cada panel tiene una superficie entre los apoyos extremos de $2L \times A$ m², siendo L la distancia entre correas.

Toma de datos

Para cada ensayo realizado se rellenará la hoja de toma de datos correspondiente, en la cual aparecerán los conceptos más relevantes:

- Características del panel: identificación, dimensiones, materiales.
- Características del montaje: peso del utillaje dispuesto sobre el panel, variaciones respecto a este procedimiento, norma de referencia, equipos utilizados, etc.
- Carga para el valor de desplazamiento del centro del vano de $L/200$, con y sin corrección de la precarga según el procedimiento de *Tratamiento de la grafica carga-desplazamiento* que se verá más adelante.

- Carga de rotura
- Gráficas *desplazamiento del centro del vano frente a carga aplicada*
- Fotografías
- Descripción de la forma de rotura, incluyendo los distintos daños e incidencias observadas a lo largo del ensayo y en el momento de la rotura. Se describirá la evolución durante el ensayo de los siguientes aspectos:
 - Zona de las proximidades de las fijaciones
 - Cara inferior del panel (zonas de apoyo)
 - Cara superior del panel
 - Zonas de apoyo intermedio
 - Adherencia entre capas del panel (desplazamientos relativos entre capas, etc.)
 - Integridad de los tableros de tipo frágil (especial atención a las caras hechas de placa de yeso) o de tipo discontinuo (especial atención a los tableros hechos de tablillas machihembradas)
 - Deformaciones locales de las capas, en particular de la capa de aislante
 - Observación de la cara inferior del panel durante el ensayo.

Tratamiento de la gráfica carga-desplazamiento

En este apartado se describe el tratamiento que se le da a la gráfica generada para cada uno de los dos vanos: carga-desplazamiento del vano. Este tratamiento se basa en el que se recomienda en la norma UNE-EN 12089⁷⁰. En la *figura 3.46* puede verse un grafica típica obtenida de un ensayo de flexión de paneles. En el eje horizontal se ha representado el desplazamiento del centro de uno de los vanos del panel. En el eje vertical se ha representado la carga, traducida a carga uniforme en kg/m^2 , que soporta el panel.

En todas las curvas de ensayo obtenidas se observan dos aspectos característicos:

- a. La primera parte de la gráfica es una zona de menor pendiente hasta aproximadamente 400 kg/m^2 . Esta zona se considera como falsa curva del panel, ya que se está produciendo el asentamiento del mismo de forma que las correas entren a apoyar completamente sobre los cilindros de apoyo. La Norma UNE-EN 12089 recomienda

sustituir esa zona de la gráfica por la prolongación recta de la zona inmediatamente por encima.

- b. Por otra parte se observa que el valor de la carga no es cero al comienzo del ensayo. Esto se debe a que el panel parte inicialmente con un peso debido al utillaje mecánico que se ha dispuesto sobre el mismo; se ha de sumar, a todos los puntos, ese peso del utillaje. Esa suma se ha realizado ya en la gráfica que se muestra en la *figura 3.46*. Para eliminar el efecto de ese peso del utillaje la curva se ha de extrapolar hasta cortar al eje de abscisas, es decir hasta el valor de carga cero, y a partir de ahí tomar la referencia para $L/200$ o para el desplazamiento que se quiera estudiar.

En la *figura 3.46* puede verse la manera en que se calcularía la carga correspondiente a una flecha del centro del vano de valor $L/200$, donde L es la longitud del vano. En este ejemplo esa carga resulta ser de 700 kg/m^2 .

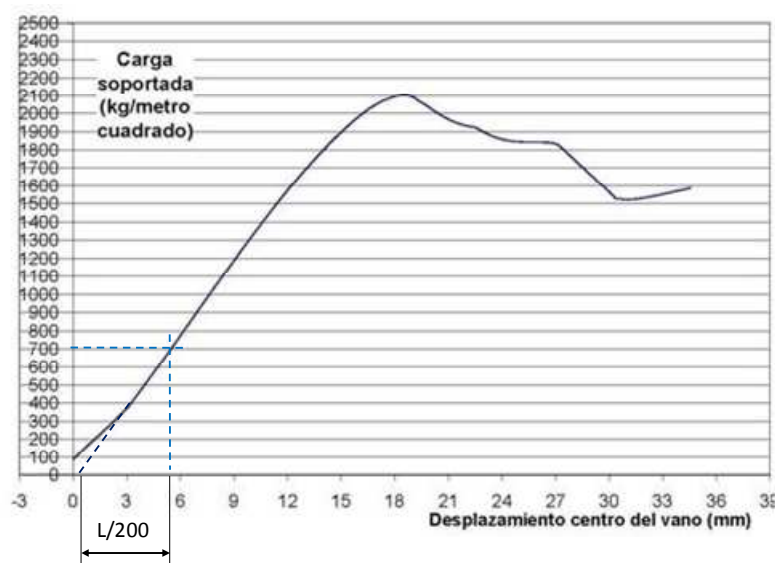


Figura 3.46. Corrección de la gráfica y obtención de la carga para $L/200$

Evaluación de las incertidumbres

En este ensayo resulta importante hacer una estimación de la incertidumbre de medida asociada a los valores obtenidos del ensayo, que son la carga de rotura y la carga para un valor de desplazamiento de la flecha en el centro del vano de $L/200$. Esto es así debido a que es un ensayo con varios instrumentos de medición implicados, con una probeta de gran tamaño que se monta de manera manual y que por lo tanto puede incorporar varias fuentes de error en su

ejecución. Estos posibles errores habrá que evaluarlos para incorporarlos como incertidumbre asociada al resultado obtenido.

En los siguientes párrafos se explicará el método desarrollado para realizar el cálculo de la incertidumbre asociada a la carga de rotura (en adelante P_R) y a la carga para un desplazamiento de $L/200$ (en adelante $P_{L/200}$). Este método está basado en la estimación de incertidumbres propuesta en la guía GUM⁷¹.

a. Cálculo de la incertidumbre asociada a la P_R .

Dada una tipología de paneles sándwich, se toma un lote de n paneles nominalmente idénticos (fabricados partiendo de las mismas materias primas y con los mismos medios de fabricación) para ser ensayados. El cálculo de la incertidumbre asociada a la P_R se realizará teniendo en cuenta las siguientes contribuciones:

- a. Incertidumbre en la medida de la fuerza. El certificado de calibración del equipo (es decir de la Máquina de Aplicación de la Fuerza y su célula de carga) deberá contener esta información. En este caso, al tratarse de una máquina de clase 0,5, la incertidumbre (para $k=2$) en la medida de fuerza es del 0,5%.
- b. Otras fuentes de incertidumbre. Dado que las demás fuentes de incertidumbre son de montaje, y su contribución a la P_R es difícil de precisar con un método analítico, se estimará que se añade su contribución a través de la desviación típica experimental de los resultados de los ensayos.

Con estas premisas, la incertidumbre expandida en la medida de la P_R se obtendrá mediante la siguiente ecuación:

$$U_R = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{patron}}{2}\right)^2 + \frac{S_R^2}{n}} \quad (\text{Ec. 3.31})$$

Y por lo tanto el valor de la carga de rotura P_R para un panel i perteneciente al lote de n paneles será:

$$P_R = P_{Ri} \pm U_R \quad (\text{Ec. 3.32})$$

Donde:

- U_R : Es la incertidumbre expandida de la medida de la P_R .
- U_{patron} : Es la incertidumbre de la célula de carga de la Máquina de Aplicación de la Fuerza, que en este caso vale el 0,5% de la P_R de cada ensayo. Dado que el valor de la fuerza no será el mismo en los n paneles ensayados, se tomará el mayor de todos los valores obtenidos, para la U_{patron}
- S_R : Desviación típica experimental de todas las P_R registradas en un lote de n paneles ensayados, considerados nominalmente iguales
- n : Es el número de paneles ensayados en un lote de ensayos
- P_{Ri} : Es la carga de rotura obtenida del ensayo del panel i .
- P_R : Es la carga de rotura del panel i . Es decir el intervalo en el que se encuentra su valor convencionalmente verdadero.

Como puede verse U_R tiene el mismo valor para todo el lote de los n paneles ensayados. Se recomienda, no obstante, que al valor de U_R , obtenido según la ecuación propuesta, sea multiplicado por un factor de mayoración para tratar de incluir una serie de contribuciones a la incertidumbre que no se incluyen en este sencillo modelo. Algunas de estas fuentes de incertidumbre serían las siguientes:

- Deriva, entre calibraciones, de la célula de carga
- Incertidumbre debida a que el utillaje no es dimensionalmente perfecto ni se dispone perfectamente en el panel (desviaciones en el montaje del utillaje)
- Incertidumbre que se podría asimilar a una división de escala ya que la captación de puntos de lectura (de carga y desplazamiento) programada es de 10 puntos/segundo.
- Otras fuentes de incertidumbre de menor importancia: la incertidumbre de la temperatura a la que se desarrolla el ensayo, incertidumbre del contenido en humedad de cada panel, etc.

Estas fuentes de incertidumbre podrían englobarse dando al factor de mayoración un valor de 1,1.

b. Cálculo de la incertidumbre asociada a la $P_{L/200}$

El cálculo de la incertidumbre asociada a $P_{L/200}$ para cada panel ensayado i se hará bajo las siguientes consideraciones:

- El valor de desplazamiento $L/200$ registrado por el medidor de desplazamiento LVDT tiene una incertidumbre asociada a esa medida de U_{LVDT} que se obtiene directamente del certificado de calibración del LVDT, y que es, al menos, de $U_{LVDT} = 0,058$ mm
- Por otra parte, de los resultados de $P_{L/200}$ obtenidos de los n paneles ensayados se hace el tratamiento de la incertidumbre asociada a la medición de la carga con el mismo procedimiento descrito anteriormente para el caso de P_R .

De esta manera se tiene que

$$U_{L/200} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{U_{patron}}{2}\right)^2 + \frac{S_{L/200}^2}{n}} \quad (\text{Ec. 3.33})$$

Donde:

- $U_{L/200}$: Es la incertidumbre de la medida de la carga $P_{L/200}$ para los n paneles ensayados.
- U_{patron} : Es la incertidumbre de la célula de carga que, como se comentó anteriormente, es el 0,5% de $P_{L/200}$ para cada ensayo. Dado que el valor de la fuerza no será el mismo en los n paneles ensayados, se tomará el mayor de los valores posibles para la U_{patron} .
- $S_{L/200}$: Desviación típica experimental de todas las $P_{L/200}$ registradas en un lote de n paneles ensayados considerados nominalmente iguales
- n : número de paneles ensayados en un lote.

Para cada panel i , la incertidumbre asociada a la $P_{L/200}$ será el resultado de realizar los siguientes cálculos:

Se toma el valor $(L/200) - U_{LVDT}$ en el eje de abscisas y se lee en el eje de ordenadas la carga en ese punto, $P_{(L/200-ULVDT)}$; esa carga tiene una incertidumbre asociada de valor $U_{L/200}$ (calculada en el apartado anterior), con lo que la medida será de:

$$P_{(L/200-ULVDT)} \pm U_{L/200}$$

Análogamente del valor $(L/200) + U_{LVDT}$ se obtiene la siguiente medida:

$$P_{(L/200+ULVDT)} \pm U_{L/200}$$

Por tanto el panel i tendrá un valor de carga en el punto de desplazamiento $L/200$ que estará acotado en el siguiente intervalo:

$$(P_{(L/200-ULVDT)} - U_{L/200}, P_{(L/200+ULVDT)} + U_{L/200})$$

Que por similitud con lo realizado anteriormente en el caso de P_R se puede expresar en forma de un valor central y una incertidumbre expandida asociada a ese valor por el método de tomar el centro de ese intervalo y el \pm valor asociado al mismo. De esta manera se tendría que el valor $P_{L/200}$ quedaría así expresado:

$$P_{L/200} = \left[\frac{(P_{(L/200-ULVDT)} - U_{L/200}) + (P_{(L/200+ULVDT)} + U_{L/200})}{2} \right] \pm \left[\frac{(P_{(L/200-ULVDT)} - U_{L/200}) - (P_{(L/200+ULVDT)} + U_{L/200})}{2} \right] \quad (\text{Ec. 3.34})$$

Por último indicar, como en el caso de la P_R , que se recomienda que el valor de $U_{L/200}$ obtenido según la ecuación propuesta, sea multiplicado por un factor de mayoración para tratar de incluir las mismas contribuciones adicionales a la incertidumbre indicadas en el caso anterior y cubiertas por un coeficiente de mayoración de 1,1.

En cuanto al valor de U_{LVDT} , éste también podría incrementarse en un factor de mayoración debido a la fuente de incertidumbre que supone el hecho de que su posición en el montaje

nunca será de una verticalidad perfecta, a la deriva entre calibraciones del instrumento y a otros efectos.

3.4. Ensayo de resistencia mecánica del panel completo. Flexión negativa

Este ensayo se describe en el apartado C2 de la guía ETAG 016-1 y tiene como objetivo simular el efecto de una carga uniformemente repartida sobre toda la superficie del panel, pero en vez de ser una carga que empujaría al panel hacia abajo, flectándolo contra las correas, se trata de una carga que tiende a arrancar el panel, es decir que tiende a succionarlo, arrancándolo hacia arriba. Este fenómeno ocurre cuando la presión por debajo del panel, dentro de la edificación, es mayor que por encima de él, fuera de la edificación, como en el caso de las acciones de viento con efecto de succión.

La carga aplicada se va incrementando progresivamente hasta que se alcanza el fallo de la estructura, bien sea por rotura del panel, bien por arrancamiento del panel de su fijación a las correas.

El panel se sujeta en tres correas y la aplicación de la carga se realiza a través de ocho líneas, cada una de las cuales aplica la misma carga sobre el panel. Por lo tanto, se aprecia que el sistema de aplicación de cargas y el ensayo mismo presentan una gran similitud con el de flexión positiva, pero ahora el tablero superior está sometido a tensiones de tracción en vez de compresión, y con las correas sin posibilidad de rotar, mientras que en el ensayo de flexión positiva, si que se les permite la rotación. En las *figuras 3.47 a 3.49* se muestran esquemáticamente la configuración de ensayo, mientras que en las *figuras 3.50 a 3.53* se muestran imágenes de los ensayos de puesta en marcha realizados.

De las pruebas realizadas con este ensayo, se observó que el resultado del mismo suele ser el arranque de las fijaciones respecto a la correa (ver *figura 3.52*), aunque eventualmente pudiera ocurrir que si el tablero superior (tablero PAR) se encuentra muy deteriorado, la cabeza del tornillo autorroscante lo atraviese. Este último modo de fallo podría catalogarse como fallo de la resistencia local del panel en los alrededores de la zona de fijación del mismo a la estructura, y se ilustra en la *figura 3.53*. Se ha considerado que este ensayo no aportaba información significativa para la evaluación de la degradación del panel, tanto de su unión

adhesiva como de los tableros que lo componen. Por lo tanto se descartó su utilización en la presente investigación.

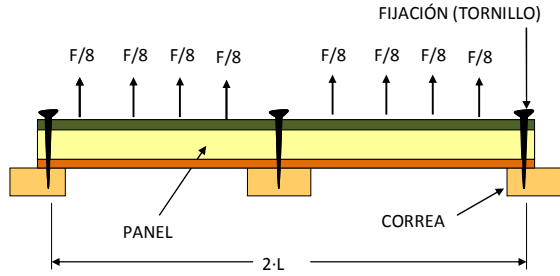


Figura 3.47. Fenómeno a simular en el ensayo de flexión negativa

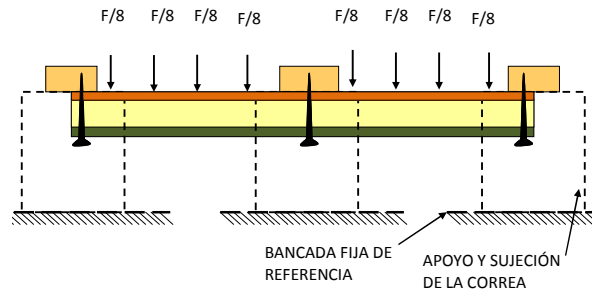


Figura 3.48. Esquemática del ensayo de flexión negativa tal como se lleva a cabo

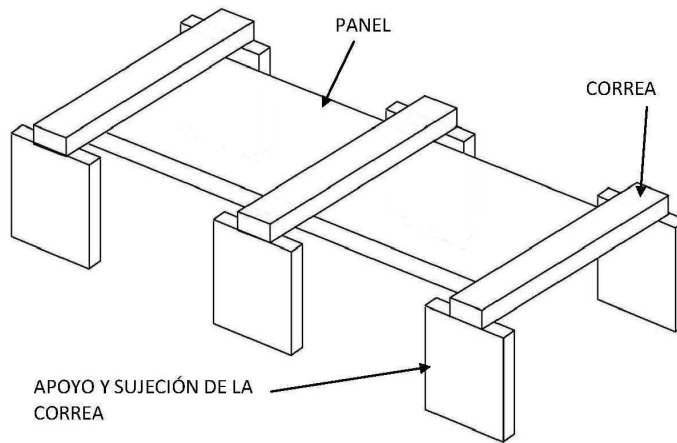


Figura 3.49. Montaje del ensayo de flexión negativa tal como se lleva a cabo



Figura 3.50. Flexión negativa. Puede apreciarse la colocación invertida del panel



Figura 3.51. Flexión negativa; detalle de la unión del panel invertido a la correa.



Figura 3.52. Instante del arrancamiento del tornillo respecto a la correa central

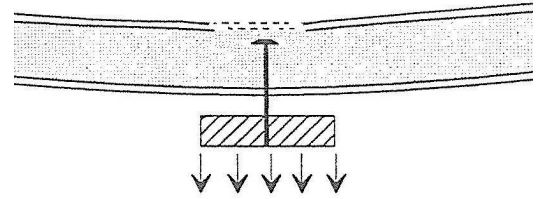


Figura 3.53. Modo de fallo en donde resulta atravesada la cara exterior

3.5. Ensayo de resistencia a impacto del panel completo. Impacto de cuerpo blando

Este ensayo se describe en el anexo C4 de la guía ETAG 016-2, y simula el impacto, por la caída accidental de una persona sobre el panel.

Se realizaron diversas pruebas previas al lote a investigar. Algunas de las fotografías tomadas pueden verse en las *figuras 3.54 a 3.57*. Tras la experiencia adquirida se llegó a la conclusión que éste es un ensayo muy exigente sobre el panel. Algunos paneles que están en el mercado, superan el ensayo, mientras que otros no. Por lo tanto también se eligió este ensayo como elemento de valoración del envejecimiento.



Figura 3.54. Vista del montaje de varios paneles ensamblados, previo al ensayo de impacto por cuerpo blando. Pueden apreciarse las juntas entre panel rellenas con masilla sellante.



Figura 3.55. Momento previo al impacto por cuerpo blando

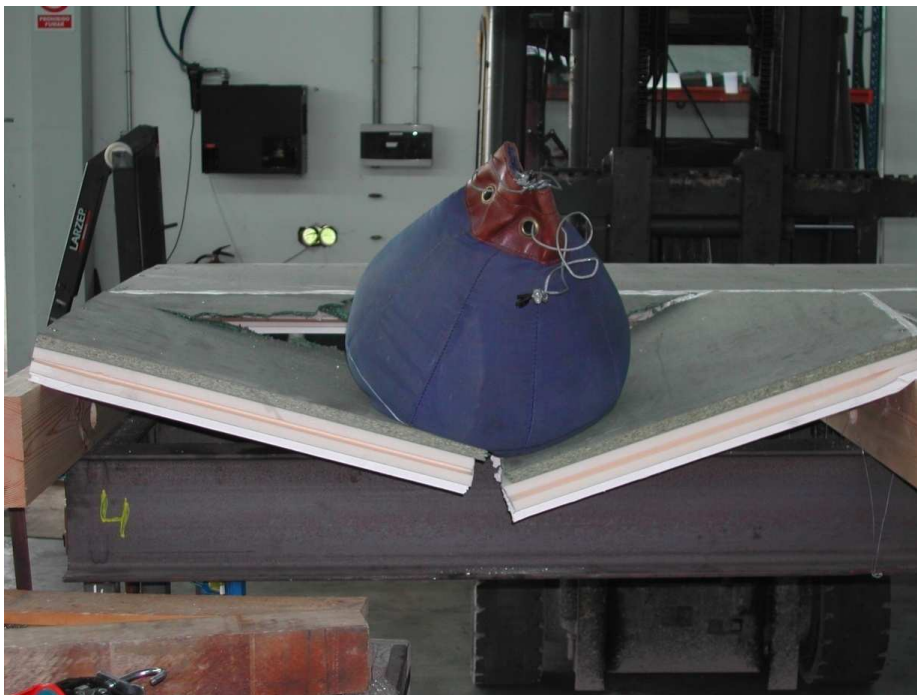


Figura 3.56. Fotografía de detalle tras un impacto.



Figura 3.57. Vista general tras varios ensayos de impacto.

Este procedimiento describe la manera en que se realiza el ensayo de impacto por cuerpo blando en paneles de cubierta, y está basado en las indicaciones de la guía ETAG 016 y en el informe técnico TR 001 de EOTA⁷². El cuerpo blando se deja caer desde una altura, creando una energía de impacto que se corresponde con la energía de impacto causada por una persona. La figura 3.58 muestra el esquema del ensayo.

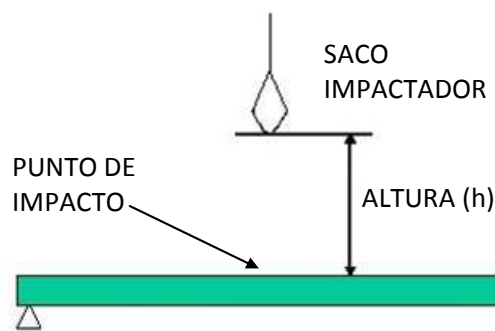


Figura 3.58. Esquema del ensayo de impacto por cuerpo blando

Las correas serán de un material y de unas dimensiones que resulten ser las más débiles o desfavorables de las especificadas por el fabricante, para cumplir con el objetivo evaluador del ensayo.

Las fijaciones y la disposición de las mismas (tornillos autorroscantes u otro tipo de fijación) serán también las mínimas recomendadas por el fabricante para el montaje del panel. El cuerpo blando empleado como impactador es una bolsa con las dimensiones que se describen en el informe técnico TR 001 de EOTA, y que está rellena con esferas de vidrio de un diámetro de $3,0 \pm 0,3$ mm hasta completar un peso total de 50 ± 5 kg.

Montaje de la probeta.

Para llevar a cabo el ensayo se realiza un montaje constituido por un panel completo y dos medios paneles apoyados sobre 3 soportes o correas. Por tanto esta estructura tiene unas dimensiones de 1 panel en longitud y 2 paneles en anchura, tal como se puede ver en la *figura 3.59*. Se dispone la probeta, unida a las correas, que a su vez están firmemente unidas a la bancada de ensayo, de forma que el conjunto reproduzca la disposición real en una edificación, particularmente con respecto a la naturaleza, tipo y posición de las fijaciones y la distancia entre ellas. Asimismo la luz será la máxima de entre las recomendadas por el fabricante para el producto.

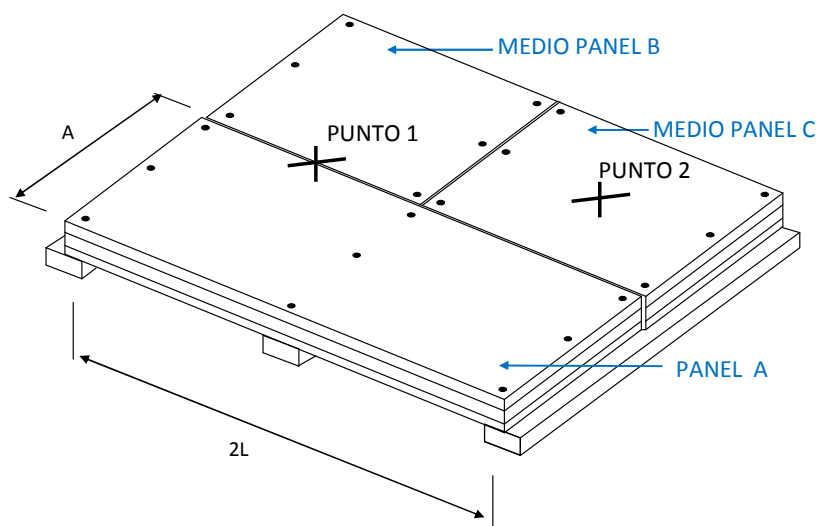


Figura 3.59. Paneles montados para ensayo impacto, con indicación de los puntos más desfavorables

El material de las correas será madera de pino. Los tornillos que se emplean como fijación tendrán las siguientes características: diámetro 6 mm, longitud total 100 mm, y longitud de zona roscada, 70 mm.

El punto de aplicación de los impactos será el punto 1 y/o el punto 2 de la *figura 3.59*. Cuando se tenga la certeza de que el punto más desfavorable del panel es el denominado punto 2, se podrán realizar los ensayos únicamente sobre el medio panel C, sin necesidad de montar los paneles A y B. La altura de caída del cuerpo blando para una energía de 700 N·m es de 1,43 m, mientras que para una energía de 1200 N·m será de 2,45 m.

Energía de los impactos.

La exigencia para cada categoría de uso del tejado es la que puede verse en la *tabla 3.7*.

Categoría de uso del tejado	Nivel de accesibilidad del tejado	Impacto por cuerpo blando. Ensayos que han de superarse
A1	Tejados no accesibles, ni siquiera en el momento de su instalación	No hay exigencia alguna
A2	Tejados accesibles únicamente para su instalación y su mantenimiento (con medidas de protección)	- Exigencia para cumplir seguridad al uso (RE4): Un impacto de 1200 N·m - Exigencia para cumplir funcionalidad: Un impacto de 700 N·m
A3	Tejados accesibles con medidas de protección	- Exigencia para cumplir seguridad al uso (RE4): Un impacto de 1200 N·m
A4	Tejados accesibles sin medidas de protección	- Exigencia para cumplir funcionalidad: Cinco impactos de 700 N·m

Tabla 3.7. Criterios de clasificación relativos al nivel de accesibilidad de los tejados

Se denominará como impacto tipo A al correspondiente a una energía de impacto de 1200 N·m, que supone una caída del impactador desde una altura de 2,45 metros. Se denominará impacto tipo B al correspondiente a una energía de impacto de 700 N·m, 1,43 metros de altura.

Cuando los ensayos se emplean para evaluar el estado de un panel sometido a envejecimiento, la manera en que se procede será la siguiente: se monta cada probeta en la estructura soporte. Se efectúa un impacto tipo A, tras lo cual se examina la probeta. Si el aspecto es bueno con una casi total ausencia de daño, se vuelve a hacer un impacto tipo A y en caso contrario se baja a un impacto tipo B. Se continúa de esta manera, con sucesivos impactos, dañando cada vez más la probeta hasta su destrucción. De esta manera se aprovecha cada probeta al máximo.

3.6. Ensayo de fluencia en flexión del panel completo

Este ensayo se describe en el anexo C6 de la guía ETAG 016-2, y permite determinar el coeficiente de fluencia para el núcleo. El ensayo se lleva a cabo sobre un medio panel simplemente apoyado sobre dos cilindros a los que se permite girar libremente.

Sobre este panel se coloca una masa que genera una carga uniformemente distribuida equivalente al 30% de la carga de rotura a flexión para esa misma disposición. Por lo tanto, previamente ha de hacerse un ensayo para determinar esa carga de rotura.

La carga se aplica de manera constante durante 2.000 horas y se va registrando el desplazamiento en el centro del vano. De esta manera se aprecia el efecto de las cargas aplicadas permanentemente en un largo periodo de tiempo.

Se realizó el montaje descrito para poder observar el comportamiento del panel dispuesto de esa manera. Para ello se diseñó y construyó una bancada sobre la que descansaría el panel, y que sería la referencia espacial fija durante el ensayo a partir de la cual se mide la flecha. Los apoyos de la bancada de referencia consistían en unos rodillos cilíndricos montados sobre cojinetes que permitían el giro libre. A ambos lados de los apoyos se dejan unos centímetros más de panel para cubrir el desplazamiento en proyección horizontal de la misma.

El incremento experimentado por la flecha se midió a través de dos relojes comparadores situados en ambos extremos del centro del vano, de manera que se tengan dos elementos de medición independientes.

Al medio panel se le aplica la carga total a través de 4 líneas de aplicación separadas entre sí a unas distancias de $L/8$, $L/4$, $L/4$, $L/4$, $L/8$, siendo L la longitud del medio panel. La carga se reparte con dos elementos, cada uno de los cuales descansa sobre dos de las barras que hacen la función de líneas de aplicación de carga sobre el panel. Las indicaciones en la norma también permiten que la masa se aplique uniformemente a través de varios sacos rellenos de un material en forma de arena, pero de las pruebas realizadas con este sistema se encontró que era muy difícil aplicarlo de manera correcta, y por lo tanto se descartó.

En las *figuras 3.60 a 3.63*, puede verse uno de los ensayos realizados. Dado que el medio panel estará simplemente apoyado, y para asegurar que no se deslice aleatoriamente sobre dos apoyos cilíndricos, se unió mediante fijaciones a uno de los apoyos, de manera que queda restringido el movimiento en ese apoyo en el plano horizontal; el segundo de los apoyos no lleva fijaciones.

La duración de la aplicación de la carga es de 2000 horas y la frecuencia de medición del desplazamiento es de un minuto durante los 10 primeros minutos, 5 minutos hasta finalizar la primera hora, 30 minutos durante las siguientes 7 horas, y posteriormente dos veces al día separada la medición por al menos 8 horas. La mayor frecuencia inicial en la toma de datos, se debe a la mayor velocidad de deformación al comienzo del ensayo. En función de la progresión de la flecha podría ser necesario aumentar estas frecuencias de medición.

Han de controlarse las condiciones de temperatura y humedad en el recinto donde se realice el ensayo, ya que en pruebas iniciales llevadas a cabo se observó que en días especialmente fríos, la contracción del material lleva incluso a desplazamientos negativos o en sentido contrario de la flecha, es decir lecturas que indicaban que con el descenso de la temperatura, la flecha decrecía.

No se profundizará más en los detalles de este ensayo ya que de las pruebas realizadas se observó que no resultaba interesante para el propósito de este trabajo sobre evaluación del envejecimiento. Esto es debido fundamentalmente al tiempo necesario para llevar a cabo el ensayo (84 días), y a que el panel superaba la prueba holgadamente.



Figura 3.60. Fluencia en flexión, inicio de la disposición de la carga.



Figura 3.61. Fluencia en flexión, montaje completo



Figura 3.62. Fluencia en flexión, vista de perfil



Figura 3.63. Fluencia en flexión, detalle de la captación del incremento de la flecha

3.7. Ensayo para evaluar la caminabilidad en panel completo

Este ensayo evalúa la seguridad al tránsito que ofrece el panel para cubiertas. Consiste en aplicar una fuerza de 1,2 kN, simulando el efecto del pie de una persona, sobre el punto más débil del panel y con el montaje más desfavorable de todos los que pudieran darse conforme a las especificaciones dadas por el fabricante. La carga se aplica a través de un bloque de madera de dimensiones de 100 x 100 mm, forrado con una lamina de goma para evitar daños

locales, mientras que por la parte inferior del panel, se registra la flecha producida. Uno de los ensayos realizados puede verse en la *figura 3.64*.

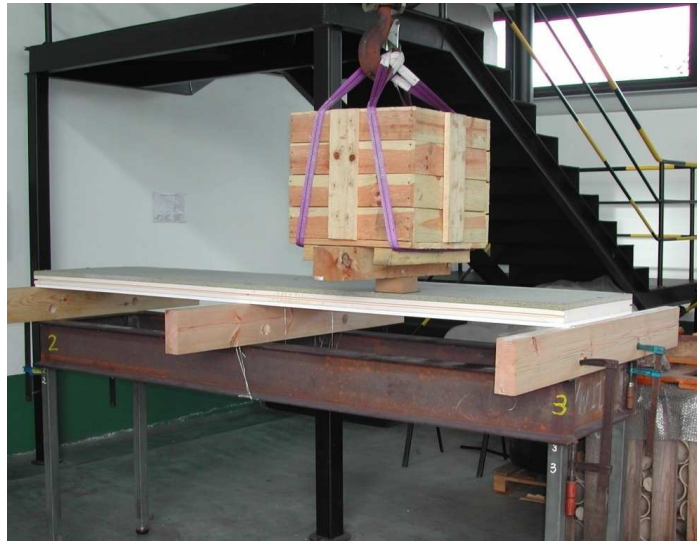


Figura 3.64. Ensayo de caminabilidad

Realizadas diversas pruebas se llegó a la conclusión de que el panel supera holgadamente este ensayo, por lo tanto se considera que esta prueba no aportaría información relevante para evaluar el envejecimiento, ya que resulta altamente improbable que un panel colapse con este modo de fallo por muy deteriorado que se encuentre.

No obstante en un envejecimiento que implique que la zona de las correas al lado de las fijaciones esté también deteriorada, una fuerza de estas características podría llegar a romper el panel, pero esto también se detectaría a través del ensayo de impacto por cuerpo blando que es una prueba más exigente.

3.8. Ensayo de conductividad térmica

Según la guía ETAG 016-1, en lo referente al ahorro energético y conservación del calor, los paneles han de proveer del aislamiento térmico suficiente que satisfaga la normativa nacional relevante al respecto. Como características a ser consideradas están la transmitancia térmica o la resistencia térmica.

Para evaluar la variación de la merma de propiedades térmicas del tablero en función del envejecimiento, se ensayaron probetas según la norma UNE-EN 12667⁷³. En este ensayo la conductividad térmica se mide usando un medidor de flujo de calor de muestra única y simétrica de dimensiones 500x500 mm con un área de medida de 300 x 300 mm.

Previamente a los ensayos, las muestras se acondicionan durante una semana a 23 ± 2 °C y 50 ± 5 % de humedad relativa.

En el equipo empleado la muestra se monta horizontalmente con flujo ascendente y con dos medidores de flujo de calor. La posición del lado caliente de la muestra es la inferior. Mediante aislamiento se reducen las pérdidas de calor en los extremos.

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Tal como se ha explicado en el capítulo anterior, la determinación de los efectos causados por los envejecimientos se ha realizado de la siguiente manera:

1. Ensayos mecánicos sobre las capas de las que consta el panel, con probetas extraídas de las mismas, para determinar los efectos producidos en los materiales constituyentes. Aquí se incluyen los realizados sobre cada una de los tableros componentes (flexión sobre tablero PAR, y sobre el tablero FRI, y compresión sobre la plancha XPS)
2. Ensayos mecánicos para evaluar el comportamiento de la unión adhesiva, también sobre probetas extraídas a partir del panel: tracción perpendicular a las caras y cortante
3. Ensayos mecánicos, de comportamiento global, sobre el panel completo. Se trata de ensayos de flexión positiva y de impacto por cuerpo blando

A continuación se mostrarán los resultados, agrupados en función del tipo de envejecimiento, y se discutirán.

2. EFECTOS DEL ENVEJECIMIENTO DE REFERENCIA

Tal como se explicó en el capítulo 2, la guía ETAG 016 indica que la evaluación del Ciclo 2 (tomado en este trabajo como envejecimiento de referencia), se haga a través del ensayo de tracción perpendicular a las caras, y que se valore la durabilidad del panel utilizando el siguiente criterio:

Sea R_i la resistencia media para el tiempo de envejecimiento de i días (este grupo de probetas envejecidas formaría el denominado *juego de probetas de i días*). Si se cumplen las siguientes dos expresiones se considera que el panel tiene buena durabilidad y supera exitosamente la evaluación conforme al Ciclo 2:

Criterio 1.1. $R_7 - R_{28} \leq 3 \cdot (R_0 - R_7)$

Criterio 1.2. $R_{28} \geq 0,4 \cdot R_0$

Y si no se cumple, se continuará con el ensayo hasta los 56 días, y se considerará que el panel tiene buena durabilidad (y supera la evaluación) si se cumplen las siguientes dos expresiones:

Criterio 2.1. $R_{28} - R_{56} < (R_7 - R_{28})$

Criterio 2.2. $R_{56} \geq 0,4 \cdot R_0$

Si finalmente tampoco cumple estas, el panel no supera la evaluación.

Conviene recordar que estos criterios tienen su origen en la norma UNE-EN 14509 de paneles sándwich de caras metálicas, que tiene un ciclo de envejecimiento y unos criterios iguales a estos.

Por otra parte, y con el objetivo de ilustrar los diferentes tipos de fallo que se pueden dar en este ensayo con este tipo de panel, se muestran a continuación varias imágenes tomadas sobre ensayos realizados con anterioridad al desarrollo de este trabajo en el ámbito del control de calidad y sobre diversos lotes y variantes del panel. Algunos de estos modos de fallo no se han presentado en los ensayos objeto de esta investigación, pero resulta interesante tener presente que pueden tener lugar (*figuras 4.1 a 4.7*)



Figura 4.1. Rotura de la unión FRI-XPS

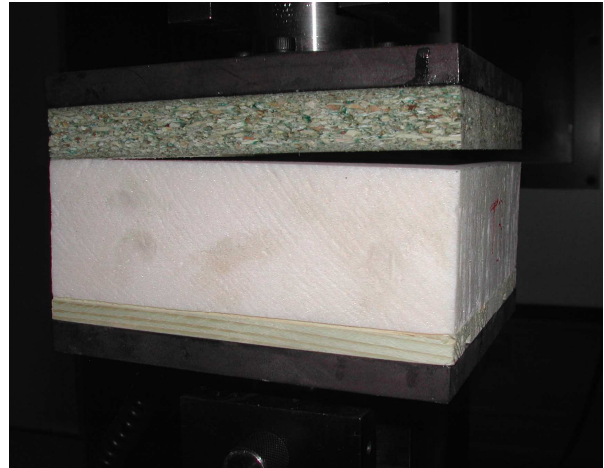


Figura 4.2. Rotura de la unión PAR-XPS



Figura 4.3. Rotura del tablero PAR

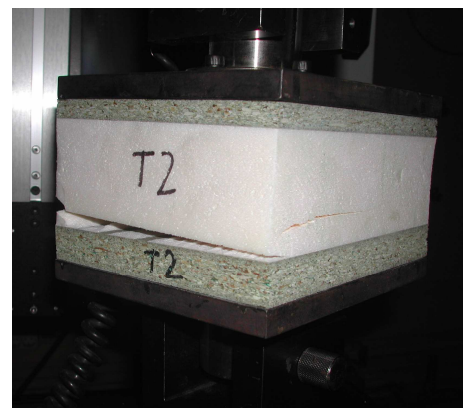


Figura 4.4. Rotura de la plancha XPS



Figura 4.5. Rotura parcial del tablero PAR con posible inicio de despegue del adhesivo.

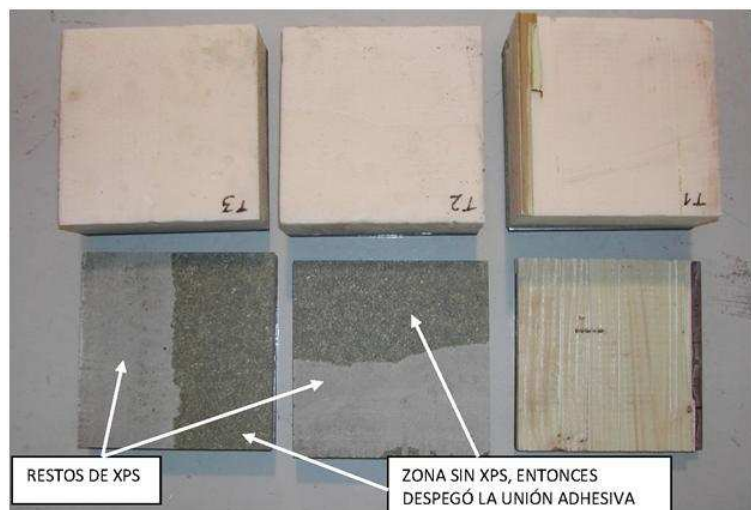


Figura 4.6. Tres probetas de un mismo lote: una sufre despegue de la unión FRI-XPS, las otras dos despegan en la unión PAR-XPS, y presentan restos de XPS en esa unión.



Figura 4.7. Aspecto de la superficie del XPS y del PAR en una probeta. Puede verse la correspondencia entre los restos del XPS dejados en el PAR (a la derecha) y el arrancamiento de esos restos en la plancha XPS (a la izquierda)

2.1. Resultados

El ciclo de envejecimiento de referencia o Ciclo 2 de la guía ETAG 016, (mantenimiento a 65 °C y 100 % HR) se aplicó a unos lotes de ensayo diferentes (ver *tabla 3.4*) a los lotes empleados en los otros dos envejecimientos que se analizarán más adelante (acelerado y natural). No obstante, tal como ya se argumentó, las conclusiones extraídas de ellos son válidas en la comparación de los resultados. La extracción de las probetas se realizó sin la precaución (adoptada posteriormente en las probetas correspondientes a los demás envejecimientos, acelerado y natural) de seguir las indicaciones de la *figura 3.28*, lo que significa que las probetas $R_{0/i}$, $R_{7/i}$, $R_{28/i}$, $R_{56/i}$ no forman una secuencia alineada longitudinalmente en el panel.

A continuación se muestran las tablas de resultados (*tablas 4.1 a 4.3*) correspondientes a los ensayos de tracción perpendicular a las caras en probetas extraídas de paneles de los tres lotes empleados (lotes 3, 4 y 5). En estas tablas se han dispuesto los valores de carga de rotura, así como los comentarios u observaciones recogidos durante los mismos. Los valores se han ordenado con el criterio de agrupar los modos de fallo, y dentro de ello, según valores decrecientes, lo que facilita el seguimiento de los resultados.

Probeta	Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura (kPa)	Descripción de la rotura
R₀/2	Sin envejecimiento	318	Rompe la unión PAR-XPS
R₀/3	Sin envejecimiento	385	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/5	Sin envejecimiento	291	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/7	Sin envejecimiento	286	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/6	Sin envejecimiento	231	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/4	Sin envejecimiento	194	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/1	Sin envejecimiento	---	Ensayo fallido; rompe en la manipulación
R₇/6	7 días	179	Rompe la unión PAR-XPS
R₇/5	7 días	167	Rompe la unión PAR-XPS
R₇/1	7 días	85	Rompe la unión PAR-XPS
R₇/2	7 días	169	Rompe la unión FRI-XPS
R₇/4	7 días	116	Rompe la unión FRI-XPS
R₇/3	7 días	92	Rompe la unión FRI-XPS
R₂₈/1	28 días	146	Rompe la unión PAR-XPS
R₂₈/2	28 días	122	Rompe la unión PAR-XPS
R₂₈/6	28 días	79	Rompe el tablero PAR
R₂₈/5	28 días	166	Rompe la unión FRI-XPS
R₂₈/4	28 días	165	Rompe la unión FRI-XPS
R₂₈/3	28 días	103	Rompe la unión FRI-XPS

Tabla 4.1. PANEL DE FRISO, Lote 3. Resultados del ensayo de tracción perpendicular en el caso del envejecimiento de referencia según Ciclo 2.

En la *tabla 4.1*, se observa una brusca caída de la tensión de rotura a los 7 días de envejecimiento de las probetas del lote 3, pero una posterior estabilización. Esto se relaciona en la bibliografía consultada como indicativo de buena durabilidad para ese modo de envejecimiento⁸. Por otra parte, a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento, se observa un aumento del porcentaje de fallo por la unión PAR-XPS respecto al fallo por la unión FRI-XPS, si bien este efecto no aparece de una manera tan acusada como en los ensayos mostrados en las dos tablas siguientes.

Probeta	Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura (kPa)	Descripción de la rotura
R₀/5	Sin envejecimiento	47	Rompe la unión PAR-XPS
R₀/3	Sin envejecimiento	282	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/8	Sin envejecimiento	80	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/2	Sin envejecimiento	58	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/6	Sin envejecimiento	54	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/7	Sin envejecimiento	41	Rompe la unión FRI-XPS
R₀/1	Sin envejecimiento	---	Ensayo fallido; rompe en la manipulación
R₀/4	Sin envejecimiento	---	Ensayo fallido; rompe en la manipulación
R₇/1	7 días	17	Rompe la unión PAR-XPS
R₇/3	7 días	13	Rompe la unión PAR-XPS
R₇/6	7 días	55	Rompe la unión FRI-XPS
R₇/4	7 días	41	Rompe la unión FRI-XPS
R₇/5	7 días	32	Rompe la unión FRI-XPS
R₇/7	7 días	31	Rompe la unión FRI-XPS
R₇/2	7 días	---	Ensayo fallido; rompe en la manipulación
R₂₈/3	28 días	83	Rompe la unión PAR-XPS
R₂₈/6	28 días	27	Rompe la unión PAR-XPS
R₂₈/4	28 días	15	Rompe la unión PAR-XPS
R₂₈/5	28 días	37	Rompe el tablero PAR
R₂₈/2	28 días	41	Rompe la unión FRI-XPS
R₂₈/1	28 días	15	Rompe la unión FRI-XPS

Tabla 4.2. PANEL DE FRISO, Lote 4. Resultados del ensayo de tracción perpendicular en el caso del envejecimiento según Ciclo 2.

En la *tabla 4.2* se observa, al igual que en la tabla anterior, una caída más acusada de la tensión de rotura durante los primeros 7 días en las probetas extraídas del lote 4, y una estabilización en el resto del tiempo ensayado (indicativo de buena durabilidad para ese tipo de envejecimiento). También, como en la tabla anterior, se observa que según aumenta el tiempo de envejecimiento, aumenta el predominio del fallo en la unión PAR-XPS.

Probeta	Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura (kPa)	Descripción de la rotura
R ₀ /4	Sin envejecimiento	235 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₀ /2	Sin envejecimiento	234 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₀ /7	Sin envejecimiento	193 ⁽²⁾	Rompe la unión YES-XPS
R ₀ /6	Sin envejecimiento	170 ⁽²⁾	Rompe la unión YES-XPS
R ₀ /5	Sin envejecimiento	148 ⁽²⁾	Rompe la unión YES-XPS
R ₀ /3	Sin envejecimiento	61 ⁽²⁾	Rompe la unión YES-XPS
R ₀ /1	Sin envejecimiento	---	Ensayo fallido; rompe en la manipulación
R ₇ /6	7 días	113 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₇ /1	7 días	81 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₇ /3	7 días	68 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₇ /5	7 días	65 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₇ /4	7 días	52 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₇ /2	7 días	43 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₂₈ /6	28 días	99 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₂₈ /5	28 días	88 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₂₈ /2	28 días	82 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₂₈ /1	28 días	59 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₂₈ /4	28 días	40 ⁽³⁾	Rompe el tablero PAR
R ₂₈ /3	28 días	34 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₅₆ /6	56 días	71 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₅₆ /5	56 días	65 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₅₆ /3	56 días	59 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₅₆ /7	56 días	56 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₅₆ /2	56 días	55 ⁽¹⁾	Rompe la unión PAR-XPS
R ₅₆ /4	56 días	30 ⁽³⁾	Rompe el tablero PAR
R ₅₆ /1	56 días	---	Ensayo fallido

Tabla 4.3. PANEL DE YESO, Lote 5. Resultados del ensayo de tracción perpendicular en el caso del envejecimiento según Ciclo 2. Se han marcado con (1) los valores correspondientes a rotura de la unión PAR-XPS; con (2) los valores correspondientes a la rotura de la unión YES-XPS; con (3) los valores correspondientes a la rotura del tablero PAR.

En la tabla 4.3 se observa, al igual que en las dos tablas anteriores una brusca caída de la tensión de rotura a los 7 días de envejecimiento en las probetas correspondientes al lote 5, y

una estabilización posterior. Por otra parte la unión que más deterioro experimenta es la PAR-XPS, ya que antes del envejecimiento hay probetas que rompen en la unión PAR-XPS y otras en la YES-XPS, pero se observa que tras los primeros 7 días de envejecimiento, la unión que siempre falla es la PAR-XPS.

En las siguientes imágenes (*figuras 4.8 a 4.12*) se muestran diferentes superficies de fractura tomadas tras los ensayos

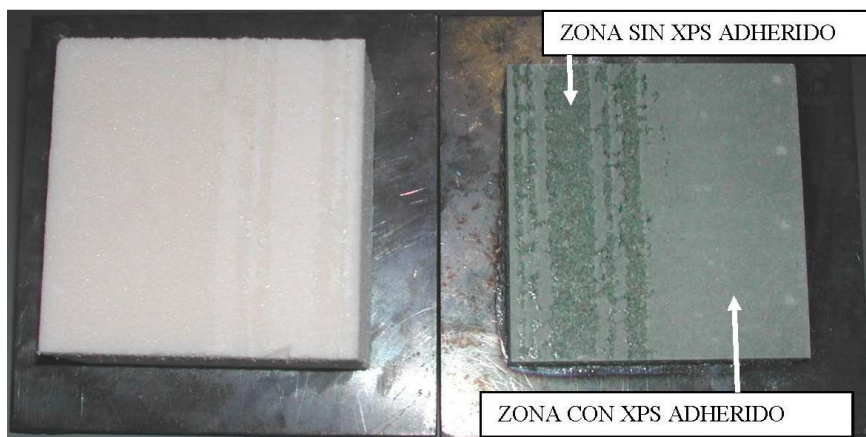


Figura 4.8. Probeta fotografiada tras romper por la unión PAR-XPS. Esta probeta no ha sido sometida a envejecimiento, lo que hace que la zona de rotura tenga un tono claro.



Figura 4.9. La probeta superior es la PANEL DE YESO/Lote5/R28₁. La probeta inferior es PANEL DE FRISO/Lote3/R28₁. Las probetas han sido envejecidas 28 días, el adhesivo adquiere un tono marrón. La probeta de la imagen superior es la que ha mostrado, de las dos, una menor resistencia a tracción perpendicular.



Figura 4.10. Probeta PANEL DE FRISO/Lote3/R28₆. La rotura se ha producido inicialmente en el tablero PAR y posteriormente ha progresado a través de la intercara



Figura 4.11. Probeta PANEL DE YESO/Lote5/R56₄. La rotura se ha producido inicialmente en el tablero PAR y posteriormente ha progresado a través de la intercara



Figura 4.12. De izquierda a derecha: PANEL DE YESO, Lote 5, Probetas R56₇, R56₈, R56₉. En el XPS se aprecian restos de color marrón del adhesivo que se corresponden con las partes más claras en el tablero PAR

2.2. Discusión de los resultados

En la *tabla 4.4* se resumen los valores medios de resistencia a tracción obtenidos en los tres lotes estudiados, 3, 4 y 5, teniendo en cuenta los diferentes periodos de envejecimiento. También se muestra el resultado de la aplicación de los criterios de valoración que se establecen en la guía ETAG 016.

Resistencia a tracción media y criterios de valoración	PANEL DE FRISO, Lote 3	PANEL DE FRISO, Lote 4	PANEL DE YESO, Lote 5
R_0 (kPa)	284,2	93,7	173,5
R_7 (kPa)	134,7	31,5	70,3
R_{28} (kPa)	130,2	36,3	67,0
R_{56} (kPa)	---	---	56,0
$R_7 - R_{28} \leq 3(R_0 - R_7)$	Cumple $4,5 \leq 448,5$	Cumple $-4,8 \leq 186,6$	Cumple $3,3 \leq 309,6$
$R_{28} \geq 0,4R_0$	Cumple $130,2 \geq 113,7$	No cumple $36,3 \geq 37,5$	No cumple $67,0 \geq 69,4$
$R_{28} - R_{56} < (R_7 - R_{28})$	---	---	No cumple $11,0 < 3,3$
$R_{56} \geq 0,4R_0$	---	---	No cumple $56,0 \geq 69,4$
Resultado de evaluación	CUMPLE	NO CUMPLE	NO CUMPLE

Tabla 4.4. Aplicación de los criterios de la ETAG 016.

En la *figura 4.13* se representan esos valores de resistencia a tracción. Como se ha comentado, las curvas muestran una caída inicial de los valores de resistencia y una posterior estabilización.

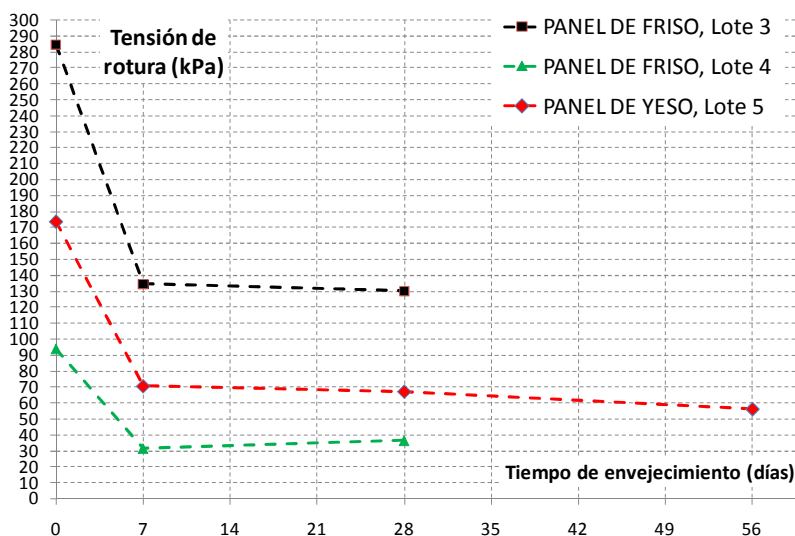


Figura 4.13. Gráficas de resistencia a tracción frente a número de días de exposición

Crítica al Ciclo 2 de la ETAG 016 y a la manera en que se evalúa

En el ámbito de la presente investigación y durante la realización de estos ensayos, se observaron varias carencias e inconsistencias en las indicaciones de la guía ETAG 016-2, que se atribuyen al hecho de que la guía esté fuertemente influenciada por el panel más ampliamente estudiado que es el de caras metálicas (frente al de caras no metálicas, derivadas de la madera, del que se han encontrado muy pocos estudios). Estas inconsistencias se analizan a continuación:

1) En la ETAG 016-2 (apartados 7.4.1 y 7.4.3) se indica que se tome como valores para R_0 , R_7 , R_{28} y R_{56} , el resultado de los valores medios de cada juego de probetas ensayadas n días. Sin embargo dado que en un juego de probetas ensayadas pueden aparecer varias formas de rotura esto parece inadecuado. En el ensayo de tracción perpendicular y en un panel con ambas caras metálicas, el fallo debido a la rotura de la cara metálica es altamente improbable, y la unión del núcleo con la cara metálica 1 es similar a la unión del núcleo con la cara metálica 2. Sin embargo en el caso del panel de caras derivadas de la madera y con ambas caras disimilares, el ensayo de tracción perpendicular puede terminar con la rotura de cualquiera de los dos materiales de las caras, con la del núcleo o con cualquiera de las dos uniones adhesivas (que son dos uniones diferentes entre sí).

Por lo tanto parece inadecuado incorporar al valor medio R_i los resultados de todos los ensayos, independientemente de cuál haya sido la forma de rotura; y esto en un ensayo que pretende evaluar el comportamiento de la unión adhesiva. Por ello se propone que sería más interesante proceder de la siguiente manera: en vez de un solo grupo de probetas envejecido n días, se ensayarían dos grupos (o los que fueran necesarios si se trata de un panel de más de tres capas). Al primer grupo, tras el envejecimiento, se le eliminaría la cara 2 y se ensayaría a tracción la unión *núcleo-cara 1*. Al segundo grupo se le eliminaría la cara 1 para ensayar a tracción la unión *núcleo-cara 2*.

Si se observase que se produce el fallo de la probeta en el material de la cara habría que valorar la importancia de este hecho, el resultado de ese ensayo no contribuiría al cálculo del valor medio R_i . No obstante para evitar que se produjese este fenómeno podría protegerse el material de las caras, en sus superficies libres, durante el proceso de envejecimiento.

Para probar la inconveniencia de mezclar modos de fallo diferentes y por tanto poner en evidencia lo inadecuado del procedimiento indicado en la ETAG 016, a continuación se va a realizar el siguiente ejercicio comparativo: En la *tabla 4.5* se reflejan, al igual que en la *tabla 4.4*, los valores de resistencia a tracción y la correspondiente aplicación de los criterios de la ETAG 016. Las columnas contienen los valores de resistencia a tracción del PANEL DE YESO, Lote 5. La primera columna contiene la contribución de todos los valores obtenidos tal como indica la ETAG 016. En la segunda columna se han eliminado los valores correspondientes al fallo del material de tablero PAR (modo de fallo representado por el número (3)), que eran valores bajos respecto al resto de valores del juego. En la tercera columna solo se conservan los valores correspondientes al fallo en la unión adhesiva PAR-XPS, codificado como (1), eliminándose los fallos del material del tablero PAR y los fallos de la unión YES-XPS (ambos modos de fallo son valores bajos respecto a los fallos de la unión adhesiva PAR-XPS)

Resistencia a tracción y criterios de valoración	PANEL DE YESO, Lote 5. Valores (1)+(2)+(3)	PANEL DE YESO, Lote 5. Valores (1)+(2)	PANEL DE YESO, Lote 5. Valores (1)
		Se tienen en cuenta todos los modos de fallo	No se tiene en cuenta el modo de fallo por rotura de la capa de tablero PAR	No se tienen en cuenta el modo de fallo de rotura del tablero PAR y el modo de fallo de rotura de unión YES-XPS
R ₀ (kPa)	173,5	173,5	234,5
R ₇ (kPa)	70,3	70,3	70,3
R ₂₈ (kPa)	67,0	72,4	72,4
R ₅₆ (kPa)	56,0	61,2	61,2
$R_7 - R_{28} \leq 3(R_0 - R_7)$	Cumple $3,3 \leq 309,6$	Cumple $-2,1 \leq 309,6$	Cumple $-2,1 \leq 492,6$
$R_{28} \geq 0,4R_0$	No cumple $67,0 \geq 69,4$	Cumple $72,4 \geq 69,4$	No cumple $72,4 \geq 93,8$
$R_{28} - R_{56} < (R_7 - R_{28})$	No cumple $11,0 < 3,3$	No cumple $11,2 < -2,1$	No cumple $11,2 < -2,1$
$R_{56} \geq 0,4R_0$	No cumple $56,0 \geq 69,4$	No cumple $61,2 \geq 69,4$	No cumple $61,2 \geq 93,8$
Resultado de evaluación	NO CUMPLE	CUMPLE	NO CUMPLE

Tabla 4.5. Aplicación de los criterios.

Cabe indicar que la manera correcta de proceder no sería la que se ha descrito en el párrafo anterior (sino la propuesta previa de formar grupos de ensayo separados) ya que no se

considera correcto hacer un análisis separando por modos de fallo tras haber ensayado todo el espesor del panel completo (las dos uniones adhesivas y las dos caras), realizando una discriminación de resultados a posteriori. Sin embargo y dado que se dispone de los resultados de este ensayo se va a hacer ese análisis por su importancia como ejemplo, tomando las siguientes consideraciones:

- a. En un juego de n días de envejecimiento los ensayos que se eliminan de la tabla (correspondientes a otros modos de fallo) tienen valores de resistencia inferiores a los de los ensayos que se dejan. Esto significa que los valores de resistencia a tracción para el modo de fallo de los ensayos que permanecen (y se toman en consideración) ha superado esos valores que se eliminan. Si ocurriera al revés y se pretendiera eliminar valores superiores a los que se dejan esto implicaría cometer el error de no considerar ensayos en los que la unión adhesiva ha superado valores altos (ya que esos valores altos resultarían eliminados).

- b. En un juego de n días de envejecimiento, tras eliminar ensayos con otros modos de fallo, los ensayos que se mantienen en el proceso de valoración, suponen un número lo suficientemente alto y con poca dispersión de valores entre ellos como para considerar razonable tomar en consideración esos números. En el ejemplo que se está valorando, si en la *tabla 4.3* en el primer juego de probetas se eliminan los valores marcados con (2) que son los correspondientes a la rotura por la unión YES-XPS, los valores restantes para el modo de fallo en la unión PAR-XPS son 235 y 234, que presentan muy poca dispersión.

En la *figura 4.14* se representan gráficamente los resultados mostrados en la *tabla 4.5*

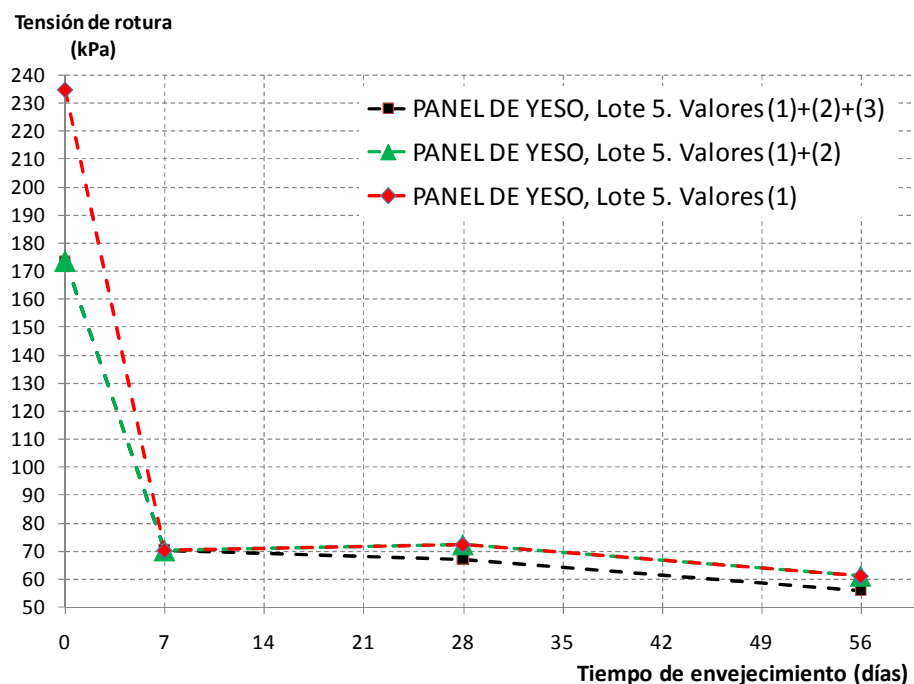


Figura 4.14. Gráficas de resistencia a tracción frente a número de días de exposición

Como puede verse tanto en la *tabla 4.5* como en la *figura 4.14*, si se tienen en cuenta todos los valores de carga de rotura sin discriminar el modo de fallo, no se cumplen, si bien por poco, los criterios de superación del ensayo de la ETAG 016. Si no se consideran los valores (muy bajos o de fallo prematuro) correspondientes al modo de fallo del material de las caras, sí se cumplirían dichos criterios de superación. Sin embargo si se examinan únicamente los valores correspondientes a la unión adhesiva PAR-XPS (tercera columna) se observa una abrupta pérdida de resistencia en los primeros 7 días de envejecimiento, lo que supone incumplir ampliamente el criterio $R_{28} \geq 0,4R_0$; esto indica un mal comportamiento de la unión PAR-XPS frente al Ciclo 2.

Este ejemplo ilustra el hecho de que si se tienen en cuenta todos los modos de fallo y se aplican sin más los criterios de la ETAG 016 el ensayo puede aparecer como superado y sin embargo se está enmascarando un deficiente comportamiento de una de las uniones adhesivas.

2) En cuando a la determinación del modo de fallo y su descripción, la ETAG 016-2 (apartado 7.4) únicamente pide que se inspeccionen las probetas tras el ensayo, con el fin de determinar si ha habido fallo cohesivo del núcleo o fallo adhesivo de la unión. Por tanto no considera la posibilidad del fallo en el material de la cara (posiblemente, como se ha indicado antes, por la

predominancia de estudios sobre paneles de caras metálicas). Sin embargo sería interesante que se indicara que en el caso de paneles de caras derivadas de la madera no resulta fácil determinar el modo de fallo por la mera inspección visual posterior de las probetas ensayadas.

Sin embargo, en este trabajo se ha comprobado que resultaría muy útil el seguimiento visual directo del desarrollo del ensayo de tracción. La razón de esto es que en ocasiones la rotura comienza en el material de la cara y la grieta progresa hasta llegar a la unión adhesiva, a través de la cual prosigue hasta separar las dos mitades de la probeta. En una inspección visual posterior no resulta fácil determinar si el inicio de la grieta ha empezado en la cara y se ha propagado a través de la intercara o bien ha ocurrido al revés y el inicio del despegue se produce primero en la unión adhesiva y la grieta progresa posteriormente por el material de la cara.

Si aún persistiera la duda, sería recomendable la realización de un ensayo similar, pero únicamente con el material de la cara (o con el material del núcleo) para determinar el valor de rotura del mismo.

3) En lo referente a la extracción de las probetas, la ETAG 016-2 (punto 7.2.1) únicamente indica que éstas se extraigan de la zona central del panel. Sería más interesante que se indicara que en el caso de paneles que se fabrican disponiendo longitudinalmente los hilos de adhesivo (como los utilizados en este trabajo), se extrajeran las probetas de manera que cada juego de *cero* días de envejecimiento cubriera toda la superficie transversal del panel. Asimismo el resto de los juegos de *n* días de envejecimiento se extraerían y marcarían de la misma manera que el primero pero en sucesivas tiras transversales, de manera que las probetas $R_{0/j}$, $R_{7/j}$, $R_{28/j}$, $R_{56/j}$ estuvieran alineadas longitudinalmente. Esto permitiría, por una parte, cubrir toda la sección transversal del panel, y por otra parte, permitiría un análisis de la evolución de la degradación en cada porción longitudinal del panel. Esta consideración se podría llevar a cabo siempre que lo permitieran las dimensiones del sándwich, eliminando además, varios centímetros del borde del mismo, si este borde presentara unas propiedades distintas a las del resto del panel que pudieran llevar a conclusiones erróneas.

Esta fue la manera en que se procedió en la extracción de las probetas para el caso del envejecimiento acelerado y natural (como se explica en el apartado correspondiente).

4) En los exámenes visuales de las probetas ensayadas, se ha observado que en ocasiones algunas zonas de la superficie de fractura de la unión adhesiva mostraba restos de XPS (en un color blanco) y otras zonas no presentaban este aspecto (ver *figura 4.6*). En este trabajo no se ha valorado la importancia de este hecho ni se ha encontrado una explicación definitiva para ello. Sin embargo una posible explicación sería que se produce el fallo en la unión adhesiva y la progresión de la grieta a través de la misma se adentra, posteriormente, en el material del núcleo.

5) Cabe resaltar que sobre el mismo tipo de panel, pero de distinto fabricante, sometido a un proceso de evaluación conforme a la guía ETAG 016 por parte de entidades diferentes, se ha encontrado que en algún caso el evaluador considera necesario llevar a cabo la evaluación de este ensayo de ciclos climáticos⁷⁴, mientras que otro evaluador no lo considera necesario⁷⁵. En este último caso el evaluador argumenta que cuando el panel exige, por parte del fabricante, que se coloque una membrana impermeable en su cara exterior, de modo que no esté en contacto con el agua, el estudio del efecto de los ciclos climáticos no se considera relevante. Dado que la humedad puede llegar al panel a través de diversos mecanismos, y dado que no se puede descartar que la membrana impermeable pueda presentar alguna fisura a lo largo de la vida útil del cerramiento, no parece apropiado no hacer ningún tipo de evaluación al respecto. Se considera que la ETAG 016 debería indicar claramente cuándo ha de hacerse esta evaluación y cuándo no.

Critica a los criterios de valoración

Una consideración aparte merecen los propios criterios de valoración. Los criterios que la guía ETAG 016 recomienda utilizar para valorar el Ciclo 2 presentan diversas inconsistencias que se pasan a analizar a continuación:

1. No aparece explícitamente una exigencia de un valor mínimo para R_0
2. El criterio 1.1 resulta muy poco exigente, ya que no obliga a que se produzca una estabilización de la degradación, sino que establece como límite, únicamente, que se

produzca una degradación lineal. Por lo tanto o bien el criterio 1.1 no es muy exigente o bien el ciclo climático aplicado resulta muy agresivo.

3. El criterio 2.2 está redactado de tal manera que resulta inapropiado. Es decir, si no se cumple el criterio 1.2, la guía ETAG indica que se prosiga el ensayo hasta los 56 días, y tras esto se comprueben los criterios 2.1 y 2.2. Sin embargo, si no se cumple el 1.2 nunca se cumpliría el 2.2 y por lo tanto la continuación de los ensayos hasta los 56 días resulta inútil. No resulta lógico pensar que sea una errata, dado que la norma de paneles de caras metálicas UNE EN 14509 tiene los mismos criterios (que ya incluía en su versión anterior como proyecto de Euro Norma, prEN 14509⁷⁶).

En la *tabla 4.6* y en la *figura 4.15* se muestran dos ejemplos (ejemplos 1 y 2) ilustrativos del deficiente funcionamiento de estos criterios. Si al “ejemplo 1” se le aplican los criterios de la ETAG 016, el criterio 1.2 no se cumple, y por lo tanto se continuaría con el ensayo hasta los 56 días. Tras esto se aplicaría el criterio 2.2 con el resultado de que no se cumpliría aunque no se hubiera producido ninguna degradación adicional. En el “ejemplo 2” se aplicarían los criterios de la ETAG 016 a los 28 días y el resultado sería positivo, no se continuaría con el ensayo y se consideraría satisfactorio su resultado. Sin embargo sería perfectamente posible que de la eventual continuación del envejecimiento hasta los 56 días se siguiera observando una continua degradación. Comparando las gráficas de ambos ejemplos se constata que la gráfica correspondiente al “ejemplo 1” presenta mejor aspecto de durabilidad conforme a las indicaciones halladas en bibliografía, tal como se ha expuesto en el capítulo 2.

Resistencia a tracción y criterios de valoración	Ejemplo 1	Ejemplo 2
R ₀ (kPa)	100	100
R ₇ (kPa)	84,5	85
R ₂₈ (kPa)	39	40
R ₅₆ (kPa)	39	0
1.1) $R_7 - R_{28} \leq 3(R_0 - R_7)$	Cumple $45,5 \leq 46,5$	Cumple $45 \leq 45$
1.2) $R_{28} \geq 0,4R_0$	No cumple $39 \geq 40$	Cumple $40 \geq 40$
2.1) $R_{28} - R_{56} < (R_7 - R_{28})$	Cumple $0 < 45,5$	Cumple $40 < 45$
2.2) $R_{56} \geq 0,4R_0$	No cumple $39 \geq 40$	No cumple $0 \geq 40$
Resultado de evaluación	NO CUMPLE	CUMPLE

Tabla 4.6. Aplicación de los criterios para dos ejemplos.

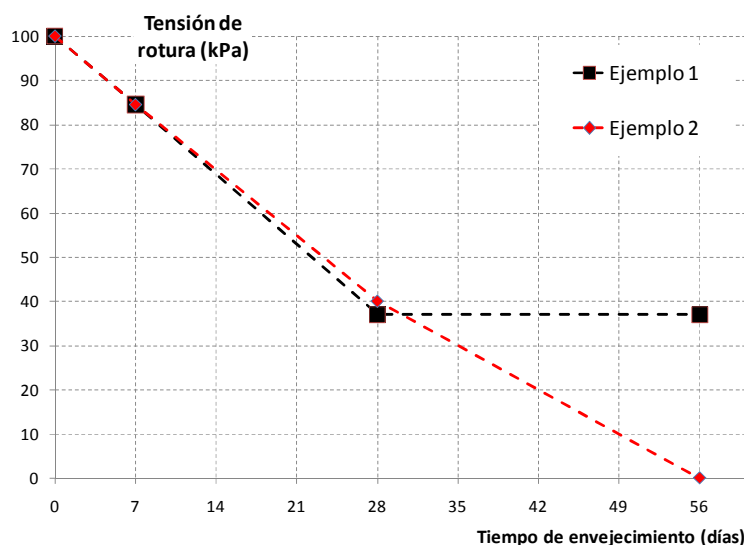


Figura 4.15. Gráficas de resistencia a tracción frente a número de días de exposición. De la aplicación de los criterios de la ETAG 016 resulta que el Ejemplo 2 si que superaría el ensayo, mientras que el Ejemplo 1 no lo superaría.

Ante las inconsistencias expuestas se proponen las siguientes mejoras:

1. Debería aparecer, explícitamente, un primer criterio con un valor mínimo para R_0 . Es decir $R_0 \geq C_1$.
2. Como segundo criterio se propone una modificación del existente, de la siguiente manera:

$$(R_7 - R_{28}) / (R_0 - R_7) \leq C_2$$

El valor de C_2 habría de determinarse a través de los pertinentes estudios, sin embargo el valor actual de $C_2=3$ no parece adecuado ya que implica una degradación continua correspondiente a lo ilustrado con el “ejemplo 2” de la figuras 4.15 y 4.16, con lo que no se aminora en absoluto el ritmo de la degradación. Un valor menor de 1 parece más adecuado. Esto se ilustra con la modificación del tramo de 0 a 7 días que se muestra en la figura 4.16.

3. El criterio de $R_{28} \geq 0,4R_0$ seguiría siendo el mismo.
4. En cuanto a la extensión del ensayo desde 28 a 56 días, dado que es un ensayo de fácil realización que implica mantener un juego adicional de probetas durante 28 días más, sería recomendable indicar que se hiciera en todas las ocasiones y establecer un criterio

que implicara que se ha alcanzado una estabilidad. Se trataría de que el segmento recto de 28 a 56 días tuviera una pendiente menor de la del segmento anterior (ver *figura 4.16*)

De esa manera los criterios que se proponen serían los siguientes:

- $R_0 \geq C_1$
- $(R_7 - R_{28}) / (R_0 - R_7) \leq C_2$, siendo C_2 un número a determinar en posteriores investigaciones, pero de un valor menor que 1.
- $R_{28} \geq 0,4R_0$
- $R_{56} \geq C_3R_{28}$ con C_3 un valor cercano a uno para indicar una mínima degradación entre los 28 y los 56 días.

La *figura 4.16* ilustra la modificación que debería experimentar el “ejemplo 2” para pasar de cumplir los criterios actuales a cumplir los criterios que aquí se proponen.

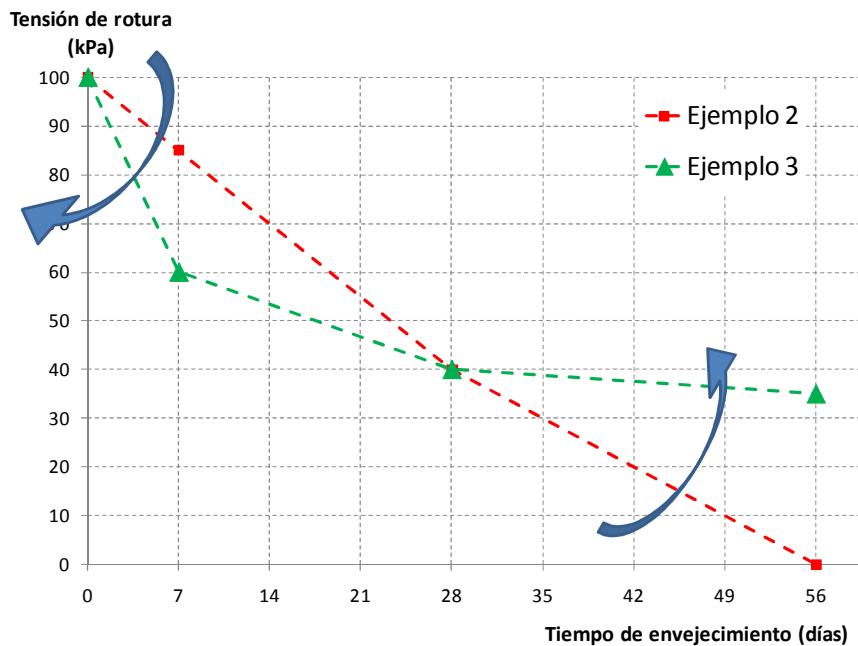


Figura 4.16. Gráficas de resistencia a tracción frente a número de días de exposición. De una exigencia en los criterios ilustrada por el Ejemplo 2 que cumple los actualmente vigentes, se pasaría a una exigencia que el Ejemplo 2 no cumpliría y sí que lo haría el Ejemplo 3.

3. EFECTOS DEL ENVEJECIMIENTO ACELERADO Y DEL ENVEJECIMIENTO NATURAL

En este apartado se analizan y se discuten los efectos de los envejecimientos acelerado y natural sobre los diferentes elementos constituyentes del panel por separado. De la misma manera se describen los efectos de los mismos sobre las uniones adhesivas y sobre el panel completo.

3.1. Efectos sobre el tablero PAR

En la *tabla 4.7* pueden verse los resultados de los ensayos acelerados obtenidos, así como el resultado del envejecimiento natural (transcurrido un periodo de cuatro). Los valores de modulo elástico se calcularon de la pendiente de la gráfica tensión-deformación en los alrededores del valor de 0,005 mm/mm de deformación. Esta zona es suficientemente lineal y se evitan los efectos de asentamiento de la probeta sobre los apoyos en la parte inicial de la curva.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejec.	Tensión de rotura (MPa)	Tensión de rotura (porcentaje respecto al valor sin envejecimiento)	Modulo elástico (MPa)	Modulo elástico (porcentaje respecto al valor sin envejecimiento)
PAR-0	Sin envejec.	19,7	100%	2200	100%
PAR-15	Acel./15 días	15,8	80%	1890	86%
PAR-30	Acel./30 días	13,8	70%	1950	89%
PAR-45	Acel./45 días	14,2	72%	1720	78%
PAR-60	Acel./60 días	12,4	63%	1640	75%
PAR-75	Acel./75 días	11,6	59%	1580	72%
PAR-90	Acel./90 días	11,6	59%	1670	76%
PAR-4 años	Natural/4 años	18,9	96%	2610	119%

Tabla 4.7. Resultados de los ensayos de evaluación del tablero PAR. En todos los casos la rotura de las probetas ha sido por flexión.

En la *figura 4.17* se representan de manera gráfica los resultados obtenidos en las probetas sometidas al envejecimiento acelerado. En la *figura 4.18* puede verse una probeta durante el ensayo.

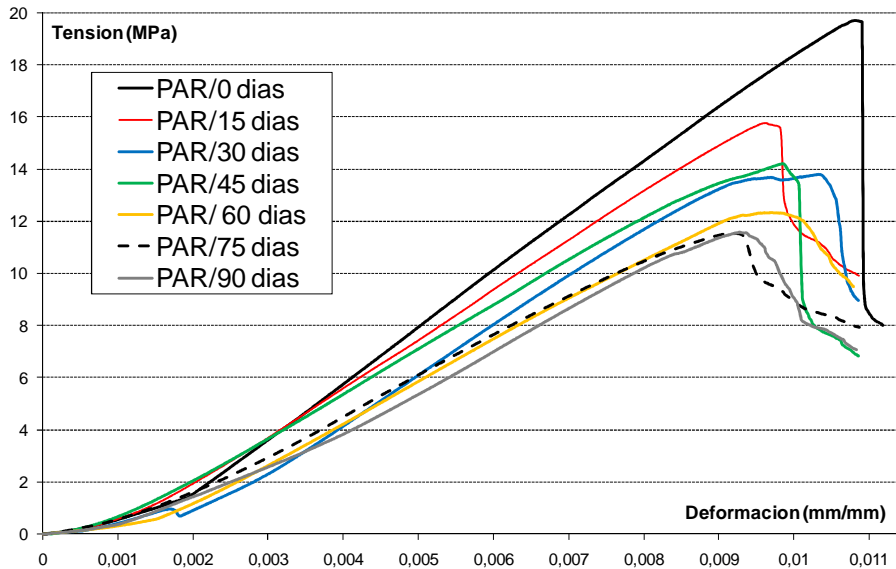


Figura 4.17. Gráficas Tensión-Deformación de los ensayos de flexión del tablero de PAR



Figura 4.18. Ensayo de flexión del tablero PAR

3.1.1. Discusión de los resultados

El envejecimiento acelerado provoca una caída de las propiedades mecánicas al 80% en los primeros 15 días, tras lo cual se produce una caída progresivamente más suave. Sin embargo los 4 años de envejecimiento natural no han producido ninguna merma mecánica. Más adelante se correlacionarán estos resultados con los del resto de los ensayos.

3.2. Efectos sobre el tablero FRI

En la *tabla 4.8* y en la *figura 4.19* pueden verse los resultados de los ensayos. En la *figura 4.20* puede verse el aspecto de un fragmento del tablero de friso en donde se aprecia el machihembrado, así como el grapado de unión entre tablillas. Los valores de modulo elástico indicados se calcularon a partir de la pendiente de la gráfica tensión-deformación en los

alrededores del valor de 0,004 mm/mm de deformación ya que esta zona es suficientemente lineal y se evita, como en el apartado anterior, zonas con efectos de asentamiento de probeta.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura (MPa)	Modulo elástico (MPa)	Descripción de la rotura
FRI-0	Sin envejecimiento	75,3	9140	Rotura por flexión
FRI-15	Acelerado/15 días	75,1	9200	Rotura por flexión
FRI-30	Acelerado/30 días	82,0	9100	Rotura por flexión
FRI-45	Acelerado/45 días	78,0	8590	Rotura por flexión
FRI-60	Acelerado/60 días	81,4	9060	Rotura por flexión
FRI-75	Acelerado/75 días	81,8	9300	Rotura por flexión
FRI-90	Acelerado/90 días	82,4	8220	Rotura por flexión

Tabla 4.8. Resultados de los ensayos de evaluación del tablero FRI.

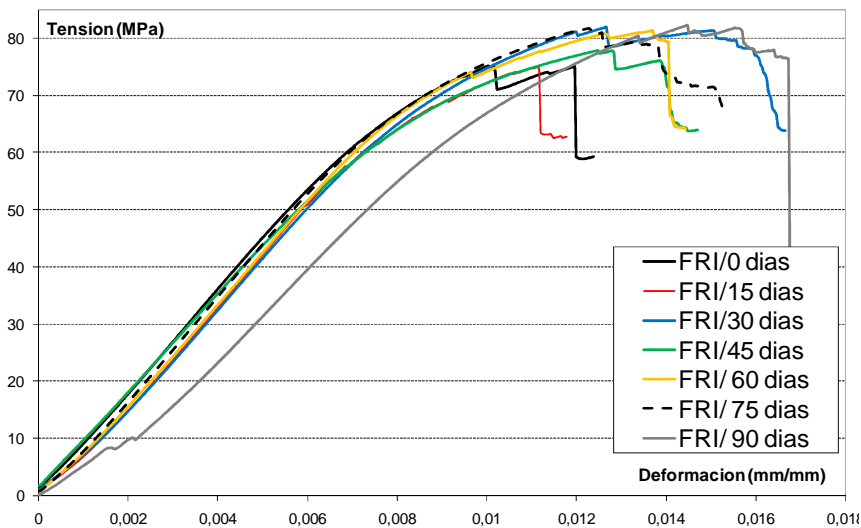


Figura 4.19. Gráficas Tensión-Deformación de los ensayos de flexión del tablero FRI



Figura 4.20. Detalle de las tablillas y de su grapado

3.2.1. Discusión sobre los resultados

Se esperaba que no hubiera diferencias entre tableros FRI más y menos envejecidos y así ha ocurrido. Por ello no se han realizado los ensayos de envejecimiento natural, ya que resultaba innecesario.

3.3. Efectos sobre la plancha XPS

Para cada tiempo de envejecimiento se mecanizaron y ensayaron dos probetas. Esto se consideró suficiente ya que se sospechaba que los ciclos de envejecimiento aplicados no alterarían las propiedades del XPS.

Como se puede ver en la *figura 4.21* durante el ensayo no se alcanza la rotura catastrófica de la probeta sino que las celdas colapsan progresivamente, entrando la curva en una zona plana de aumento de desplazamiento sin aumento de carga. Dependiendo del grado de compresión este colapso será más o menos recuperable elásticamente.

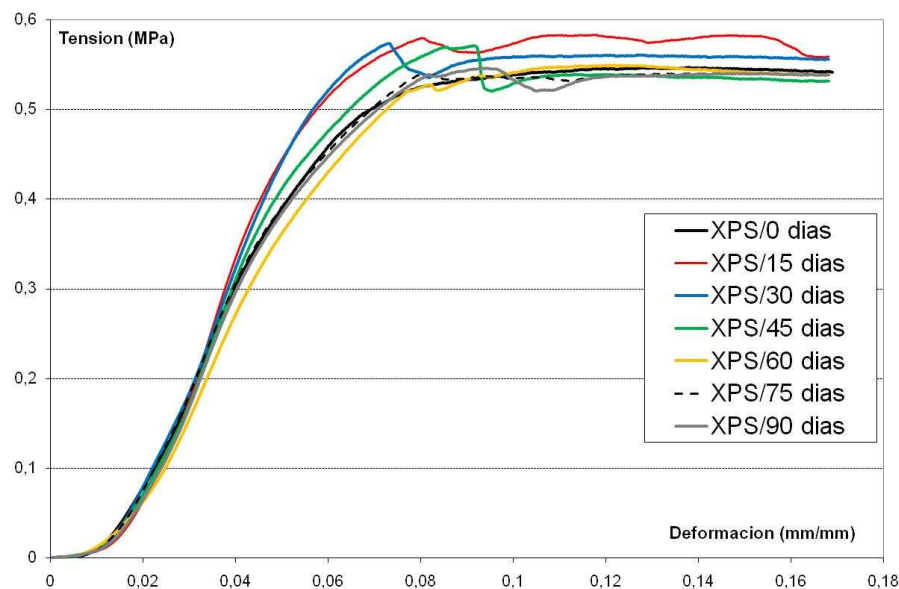


Figura 4.21. Graficas Tensión-Deformación de los ensayos de compresión de la plancha de XPS

Por otra parte, como se puede ver en dichas curvas, la zona elástica lineal no está perfectamente definida y/o no es muy amplia en todo caso.

La *figura 4.22* muestra uno de los ensayos realizados, mientras que en la *tabla 4.9* se muestran diversos resultados numéricos obtenidos para todas las probetas ensayadas. Debido a la falta de linealidad, se decidió sustituir el cálculo del módulo elástico por el cálculo de la tensión al 10% de deformación. Para este cálculo se siguió el criterio de sustituir el primer tramo de la gráfica por la prolongación recta de la gráfica hacia atrás, partiendo del valor aparente de deformación de 0,02 mm, de manera similar a como se indica en la norma UNE-EN 12089, y que se ha ilustrado en la *figura 3.46*.

Después de la comparación de cada pareja de graficas para el mismo tiempo de envejecimiento, se tomó una de estas dos gráficas (que resultaban prácticamente iguales entre sí) y se realizó el solapamiento con una gráfica procedente de cada uno de los otros tiempos de envejecimiento, de manera similar a lo realizado en el caso de los tableros PAR y FRI. Esto puede verse en la *figura 4.21*, mientras que en la *tabla 4.9* se marcan con un asterisco (*) las probetas empleadas para hacer esta comparativa.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión al 10% de deformación (kPa)	Tensión máxima alcanzada (kPa)	Máxima pendiente de la gráfica (MPa)	Deformación al cabo de cinco minutos de finalizado el ensayo (mm)
XPS-0 ₁	Sin envejecimiento	543	543	12,47	6,0
XPS-0 ₂ (*)	Sin envejecimiento	542	546	13,13	6,2
XPS-15 ₁ (*)	Acel./15 días	582	583	16,04	5,9
XPS-15 ₂	Acel./15 días	556	595	15,13	6,2
XPS-30 ₁ (*)	Acel./30 días	559	574	14,35	7,1
XPS-30 ₂	Acel./30 días	565	597	14,36	6,5
XPS-45 ₁ (*)	Acel./45 días	538	571	14,41	6,8
XPS-45 ₂	Acel./45 días	571	583	15,02	6,1
XPS-60 ₁ (*)	Acel./60 días	547	549	11,88	6,7
XPS-60 ₂	Acel./60 días	525	532	13,92	7,0
XPS-75 ₁	Acel./75 días	562	585	13,96	6,7
XPS-75 ₂ (*)	Acel./75 días	531	540	13,19	6,6
XPS-90 ₁ (*)	Acel./90 días	536	546	13,71	6,4
XPS-90 ₂	Acel./90 días	542	570	13,01	6,6

Tabla 4.9. Resultados de los ensayos de compresión de la plancha de XPS.

Como prueba adicional, transcurridos cinco minutos de cada ensayo se procedió a medir la recuperación de la deformación; esto puede verse en la *figura 4.23*, y se refleja en la última columna de la *tabla 4.9*.

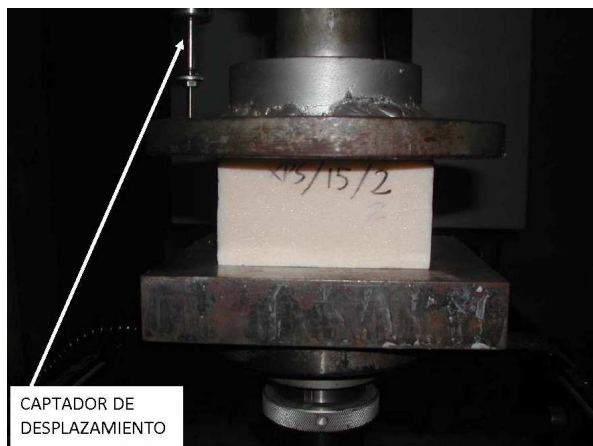


Figura 4.22. Ensayo de compresión de probeta de XPS



Figura 4.23. Medición de la recuperación de la deformación tras el ensayo de compresión

3.3.1. Discusión de los resultados

Como puede verse en la *figura 4.21* y en la *tabla 4.9* no hay variación significativa en las propiedades mecánicas de la plancha de XPS en función del grado de envejecimiento. Se esperaba este comportamiento, ya que otros autores habían reportado que un material similar (EPS), incluso con menor densidad que la que aquí se tenía, no había mostrado pérdida de resistencia mecánica cuando se le mantenía en condiciones de 70°C/80% HR ni cuando se le mantenía en condiciones de secado a de 90°C ³². En el presente trabajo se confirma que tampoco el ciclado entre estas condiciones es lo suficientemente agresivo para que se detecte cambio alguno en las propiedades mecánicas del material.

3.4. Efectos sobre la unión adhesiva a través de la tracción perpendicular

En las *tablas 4.10* a *4.14* pueden verse los resultados de los ensayos de tracción perpendicular en función de la línea en la que han sido mecanizadas y en la *figuras 4.24* y *4.25* algunas de las fotografías tomadas. Esta exposición de los resultados facilita la evaluación del deterioro de las propiedades en función del nivel de envejecimiento y de la posición de la probeta

conforme a la *figura 3.28*. En el caso de los ensayos tras cuatro años de envejecimiento natural se realizaron dos series de ensayos por la importancia de los resultados y por disponer de probetas suficientes para continuar con el ensayo durante varios años. La *tabla 4.15* muestra un resumen de resultados

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura (kPa)	Descripción de la rotura
T1	Sin envejecimiento	470	Rompe el tablero PAR
T6	Acelerado/15 días	183	Rompe la unión PAR-XPS
T11	Acelerado/30 días	91	Rompe la unión PAR-XPS
T16	Acelerado/45 días	80	Rompe la unión PAR-XPS
T21	Acelerado/60 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T26	Acelerado/75 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T31	Acelerado/90 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T36	Natural/4 años	576	Rompe la unión FRI-XPS
T41	Natural/4 años	532	Rompe la unión FRI-XPS

Tabla 4.10. Resultados del ensayo de tracción perpendicular.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura (kPa)	Descripción de la rotura
T2	Sin envejecimiento	---	Ensayo fallido; rompe en la manipulación
T7	Acelerado/15 días	99	Rompe la unión PAR-XPS
T12	Acelerado/30 días	68	Rompe la unión PAR-XPS
T17	Acelerado/45 días	45	Rompe la unión PAR-XPS
T22	Acelerado/60 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T27	Acelerado/75 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T32	Acelerado/90 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T37	Natural/4 años	417	Rompe la unión FRI-XPS
T42	Natural/4 años	> 427	Falla la unión entre los platos de ensayo y la probeta antes de llegar a producirse la rotura de la misma

Tabla 4.11. Resultados del ensayo de tracción perpendicular.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura (kPa)	Descripción de la rotura
T3	Sin envejecimiento	370	Rompe la unión FRI-XPS
T8	Acelerado/15 días	45	Rompe la unión PAR-XPS
T13	Acelerado/30 días	---	Ensayo fallido; rompe en la manipulación
T18	Acelerado/45 días	5	Rompe la unión PAR-XPS, se rompe en el montaje, con el peso del utillaje
T23	Acelerado/60 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T28	Acelerado/75 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T33	Acelerado/90 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T38	Natural/4 años	> 397	Falla la unión entre los platos de ensayo y la probeta antes de llegar a producirse la rotura de la misma
T43	Natural/4 años	422	Rompe la unión PAR-XPS

Tabla 4.12. Resultados del ensayo de tracción perpendicular.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura (kPa)	Descripción de la rotura
T4	Sin envejecimiento	524	Rompe la unión FRI-XPS
T9	Acelerado/15 días	17	Rompe la unión PAR-XPS
T14	Acelerado/30 días	40	Rompe la unión PAR-XPS
T19	Acelerado/45 días	20	Rompe la unión PAR-XPS
T24	Acelerado/60 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T29	Acelerado/75 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T34	Acelerado/90 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T39	Natural/4 años	471	Rompe la unión PAR-XPS
T44	Natural/4 años	518	Rompe la unión PAR-XPS

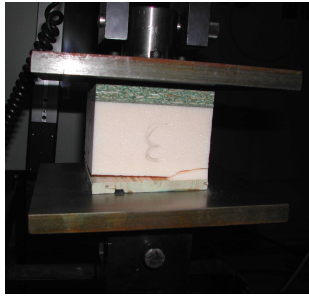
Tabla 4.13. Resultados del ensayo de tracción perpendicular.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura (kPa)	Descripción de la rotura
T5	Sin envejecimiento	330	Rompe la unión FRI-XPS
T10	Acelerado/15 días	5	Rompe la unión PAR-XPS, se rompe en el montaje, con el peso del utillaje
T15	Acelerado/30 días	66	Rompe la unión PAR-XPS
T20	Acelerado/45 días	43	Rompe la unión PAR-XPS
T25	Acelerado/60 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T30	Acelerado/75 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T35	Acelerado/90 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
T40	Natural/4 años	512	Rompe la unión PAR-XPS
T45	Natural/4 años	508	Rompe la unión PAR-XPS

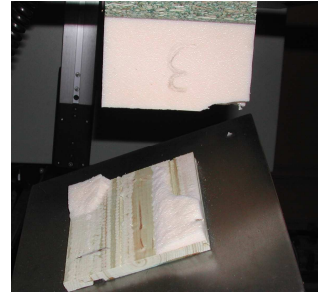
Tabla 4.14. Resultados del ensayo de tracción perpendicular.

Probetas	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura, valor medio (kPa)	Tensión de rotura (porcentaje respecto al valor sin envejecimiento)	Unión adhesiva que predominantemente falla
T1, T3, T4, T5	Sin envejec.	424	100%	FRI-XPS
T6, T7, T8, T9, T10	Acel./15 días	70	16%	PAR-XPS
T11, T12, T14, T15	Acel./30 días	66	16%	PAR-XPS
T16, T17, T18, T19, T20	Acel./45 días	39	9%	PAR-XPS
T21, T22, T23, T24, T25	Acel./60 días	0	0%	PAR-XPS
T26, T27, T28, T29, T30	Acel./75 días	0	0%	PAR-XPS
T31, T32, T33, T34, T35	Acel./90 días	0	0%	PAR-XPS
T36, T37, T39, T40, T41, T43, T44, T45	Natural/4 años	495	117%	Ninguna de las dos predomina

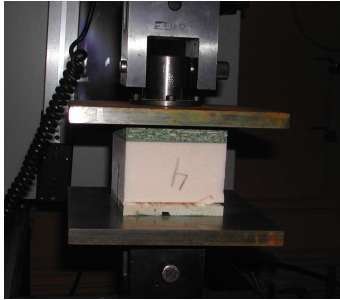
Tabla 4.15. Resultados del ensayo de tracción perpendicular, valores medios.



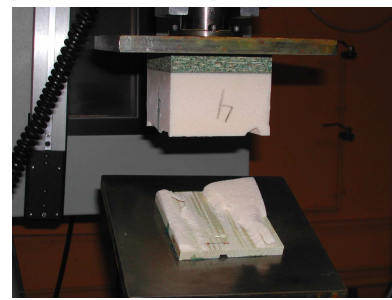
Probeta T3 (sin envejecimiento); momento en que se produce la rotura. 370 kPa



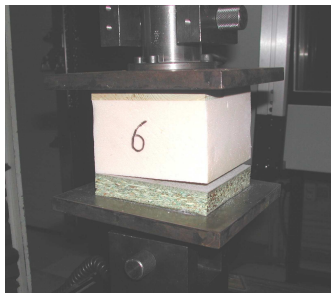
Probeta T3 (sin envejecimiento); aspecto de la superficie tras completarse la rotura



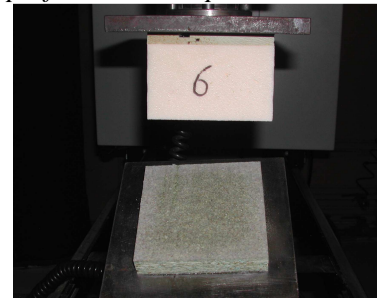
Probeta T4 (sin envejecimiento); momento en que se produce la rotura. 524 kPa



Probeta T4 (sin envejecimiento); aspecto de la superficie tras completarse la rotura



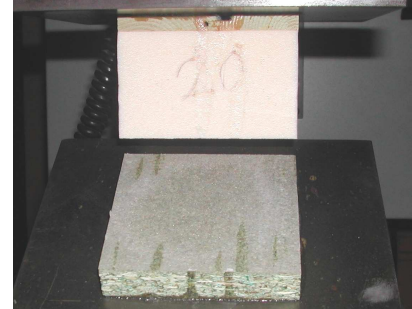
Probeta T6 (acelerado-15 días); momento en que se produce la rotura. 183 kPa



Probeta T6 (acelerado-15 días); aspecto de la superficie tras completarse la rotura

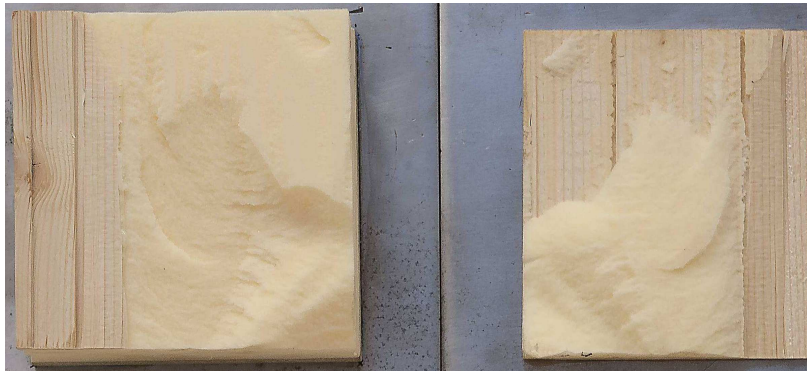


Probeta T16 (acelerado-45 días); momento en que se produce la rotura. 80 kPa

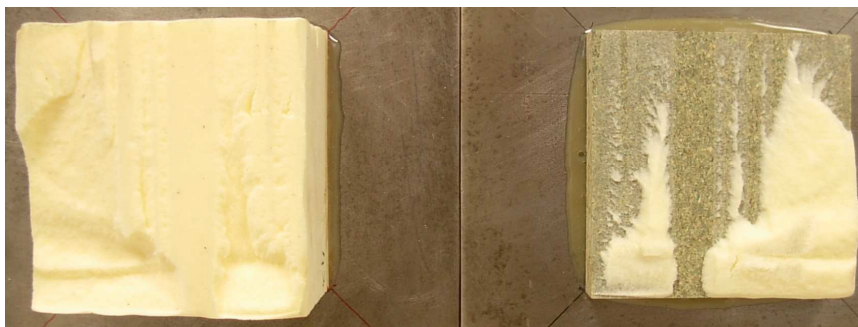


Probeta T20 (acelerado-45 días); aspecto de la superficie tras completarse la rotura. 43 kPa

Figura 4.24. Ensayos de tracción perpendicular. Se destacan las dos más inferiores: teniendo el mismo tiempo de envejecimiento y el mismo aspecto han presentado valores de rotura muy diferentes.



Probeta T37 (envejecimiento natural, 4 años). Fallo de la unión FRI-XPS a 417 kPa



Probeta T43 (envejecimiento natural, 4 años). Fallo de la unión PAR-XPS a 422 kPa

Figura 4.25. Ensayos de tracción perpendicular en probetas con envejecimiento natural

3.4.1. Discusión de los resultados

Del análisis de los resultados de este ensayo destaca que la unión adhesiva PAR-XPS experimenta un gran deterioro tras el envejecimiento acelerado. Este hecho se pone especialmente de manifiesto teniendo en cuenta que en las probetas sin envejecer no hay fallo de esta unión, sino principalmente de la unión FRI-XPS (y a valores de carga altos), mientras que tras el envejecimiento acelerado la rotura se produce siempre en la unión PAR-XPS y a valores de carga significativamente cada vez más bajos.

Se puede concluir que es el ciclado de humedad la causa principal de esta degradación, ya que el daño observado es mayor que el que se produce durante el envejecimiento de referencia (ciclo 2).

No se esperaba que el envejecimiento acelerado diera lugar a un daño tan elevado en esta unión adhesiva, ya que a priori no parecía ser muy agresivo. El daño causado no guarda relación con el que se produce en un envejecimiento en condiciones reales (natural) tras cuatro años.

Por otra parte se observa que una vez aplicado este ciclado, la caída de propiedades es diferente para distintas probetas: si se compara la probeta T1 con la T6 (extraída de la misma línea longitudinal) esta última tiene un valor de resistencia de un 40% del valor de resistencia de aquella. Si se realiza el mismo ejercicio de comparación entre la T5 y la T10, el valor de resistencia de esta última es un 2% del de la primera. Esta dispersión en los resultados se extiende a las cinco líneas longitudinales del panel estudiadas.

En cuanto a los resultados obtenidos en el ensayo tras envejecimiento natural, el hecho de que la carga haya resultado ligeramente superior a la del ensayo sin envejecimiento (realizado unos pocos días después de la fabricación) puede deberse a la existencia de un post-curado de la unión adhesiva que ha tenido una influencia mayor en la resistencia que la influencia desfavorable que pudieran haber tenido las condiciones ambientales del envejecimiento natural.

3.5. Efectos sobre la unión adhesiva a través del comportamiento a cortante

Los resultados de los ensayos se muestran en las *tablas 4.16 y 4.17*. Dentro de las tablas se han dispuesto los resultados de forma que se facilite el seguimiento del deterioro de propiedades en función del nivel de envejecimiento, conforme a la distribución de las probetas que se mostraba en la *figura 3.29*. En el caso de los ensayos tras cuatro años de envejecimiento natural se realizaron dos series de ensayos por la importancia de los resultados y por disponer de probetas suficientes para continuar con el ensayo durante varios años.

Probetas	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura a cortadura (kPa)	Descripción de la rotura
C1 y C2	Sin envejecimiento	242	Rompe la probeta C2 por la unión FRI-XPS a esfuerzo cortante
C6 y C7	Acelerado/15 días	100	Rompe la probeta C7 por la unión PAR-XPS a esfuerzo cortante
C11 y C12	Acelerado/30 días	47	Rompe la probeta C12 por la unión PAR-XPS a esfuerzo cortante
C16 y C17	Acelerado/45 días	76	Rompen ambas probetas por la unión PAR-XPS a esfuerzo cortante. No se ha detectado cual rompe antes.
C21 y C22	Acelerado/60 días	41	Rompe la probeta C21 por la unión PAR-XPS a esfuerzo cortante
C26 y C27	Acelerado/75 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
C31 y C32	Acelerado/90 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
C36 y C37	Natural/4 años	269	Rompe la probeta C36 por la unión FRI-XPS a esfuerzo cortante
C41 y C42	Natural/4 años	274	Rompe la probeta C42 por la unión FRI-XPS a esfuerzo cortante

Tabla 4.16. Resultados del ensayo de cortante

Probetas	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura a cortante (kPa)	Descripción de la rotura
C3 y C4	Sin envejecimiento	247	Rompe la probeta C3 por la unión FRI-XPS a esfuerzo cortante
C8 y C9	Acelerado/15 días	76	Rompe la probeta C8 por la unión PAR-XPS a esfuerzo cortante
C13 y C14	Acelerado/30 días	23	Rompe la probeta C13 por la unión PAR-XPS a esfuerzo cortante
C18 y C19	Acelerado/45 días	50	Rompe la probeta C18 por la unión PAR-XPS a esfuerzo cortante.
C23 y C24	Acelerado/60 días	19	Rompe la probeta C23 por la unión PAR-XPS a esfuerzo cortante
C28 y C29	Acelerado/75 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
C33 y C34	Acelerado/90 días	Cercana a cero	Rompe la unión PAR-XPS en la manipulación, sin llegar a ensayarse
C38 y C39	Natural/4 años	257	Rompe la probeta C38 sin que se pueda determinar si falla antes su unión FRI-XPS o su unión PAR-XPS
C43 y C44	Natural/4 años	253	Rompe la probeta C43 por la unión FRI-XPS a esfuerzo cortante.

Tabla 4.17. Resultados del ensayo de cortante

La tabla 4.18 muestra un resumen de los resultados.

Probetas	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Tensión de rotura, valor medio (kPa)	Tensión de rotura (porcentaje respecto al valor sin envejecimiento)	Unión adhesiva que predominantemente falla
C1-C2 y C3-C4	Sin envejec.	245	100%	FRI-XPS
C6-C7 y C8-C9	Acel./15 días	88	36%	PAR-XPS
C11-C12 y C13-C14	Acel./30 días	35	14%	PAR-XPS
C16-C17 y C18-C19	Acel./45 días	63	26%	PAR-XPS
C21-C22 y C23-C24	Acel./60 días	30	12%	PAR-XPS
C26-C27 y C28-C29	Acel./75 días	0	0%	PAR-XPS
C31-C32 y C33-C34	Acel./90 días	0	0%	PAR-XPS
C36-C37, C38-C39, C41-C42 y C43-C44	Natural/4 años	263	107%	FRI-XPS

Tabla 4.18. Resultados del ensayo de cortante, valores medios.

En las figuras 4.26 a 4.29 se muestran imágenes tomadas de los ensayos mostrando los diferentes modos de fallo.



Figura 4.26. Fallo de la probeta C2 por deslizamiento de la unión FRI-XPS



Figura 4.27. Fallo de la probeta C18 por deslizamiento de la unión PAR-XPS



Figura 4.28. Fallo de la probeta C36 por deslizamiento de la unión FRI-XPS



Figura 4.29. Fallo de la probeta C38, se observa deslizamiento en ambas uniones adhesivas

3.5.1. Discusión de los resultados

Al igual que en el de tracción perpendicular a las caras, el resultado de este ensayo muestra que el envejecimiento acelerado ha imprimido a la unión adhesiva un daño grande, que no guarda relación con el que se produce en un envejecimiento en condiciones reales (natural).

Si se compara con el ensayo de tracción perpendicular, la caída de propiedades del ensayo de cortante es ligeramente menor. No obstante esto puede deberse al hecho de que, debido al gran espesor de la probeta, igual al espesor del panel, la realización de este ensayo entraña el siguiente problema: si las sujeciones exteriores se dejan libres o no se colocan, en el desarrollo del ensayo se observa que en muchas ocasiones los dos soportes metálicos externos se van separando (ver *figura 4.30*) y por tanto las uniones adhesivas no se ensayarían a esfuerzo cortante. Por el contrario al colocar las sujeciones exteriores a los soportes externos, se puede producir el efecto de que actúe una fuerza normal a la superficie de las uniones adhesivas, con lo que el resultado medido en el ensayo no es totalmente correcto, aunque su influencia en este caso no se estima que sea significativa.

Este efecto tiene más relevancia cuanto mayor es el grosor de la probeta, y por tanto se puede evitar si se trabaja con los mismos materiales pero de un espesor menor.

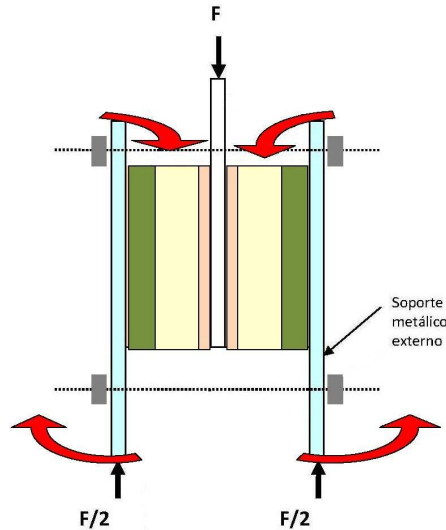


Figura 4.30. Tendencia que presentan los soportes metálicos externos a separarse por su parte inferior durante el ensayo de cortadura

3.6. Efectos sobre el panel completo: Flexión positiva

En los apartados anteriores se han visto los resultados correspondientes a la degradación de cada elemento constituyente del panel, así como la degradación de la unión adhesiva. En este apartado y en el siguiente se analiza el panel completo. Estos ensayos no solo permiten evaluar el grado de envejecimiento como en los casos anteriores, sino que permiten evaluar cómo la degradación de los elementos constitutivos afecta al rendimiento global del panel. En cualquier caso, el panel debería seguir cumpliendo los requisitos esenciales que se le exigen.

En la *figura 4.31* se muestra una curva característica del ensayo de flexión positiva. En el inicio de esta curva se distinguen dos zonas de comportamiento anómalo que deben ser corregidas (señaladas en la curva como tramo 1 y tramo 2).

Al comenzar el ensayo, la cruceta de la máquina de ensayos comienza a aplicar la carga progresivamente, a una velocidad de 10 mm/min. En ese momento empieza a detectarse el movimiento en cada uno de los captadores de desplazamiento dispuestos en el centro del vano. En los primeros milímetros de desplazamiento del vano se observa que el incremento de la carga es muy pequeño. Este hecho se manifiesta en la curva como un tramo recto de muy poca pendiente (tramo 1). Este comportamiento está relacionado con una falta de planitud del panel. De esta manera, aquellos paneles que son convexos por su parte superior (ver *figura*

4.32), muestran en sus dos gráficas de ensayo este tramo inicial recto de poca pendiente, mientras que aquellos paneles que son cóncavos muestran ese tramo inicial recto en uno solo de los dos vanos (*figuras 4.33 y 4.34*). Conforme se incrementa la carga, llega un momento en el que las tres líneas de apoyo del panel reposan sobre los cilindros vinculados a la bancada de referencia, y en ese momento finaliza ese tramo inicial de menor pendiente.

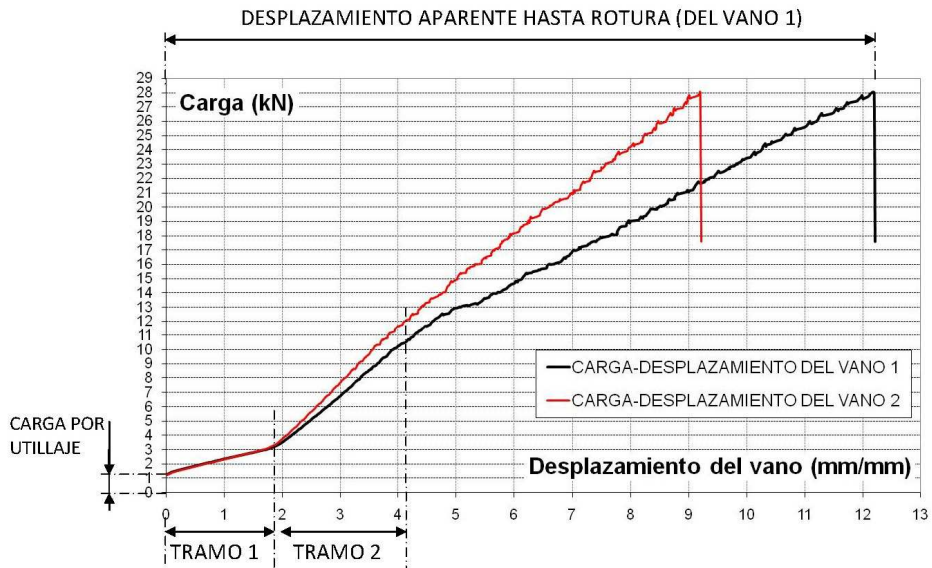


Figura 4.31. Ejemplo de gráfica carga-desplazamiento del vano, que ilustra algunos efectos observados como el del tramo 1 con una pendiente inicial muy pequeña durante 2 mm.

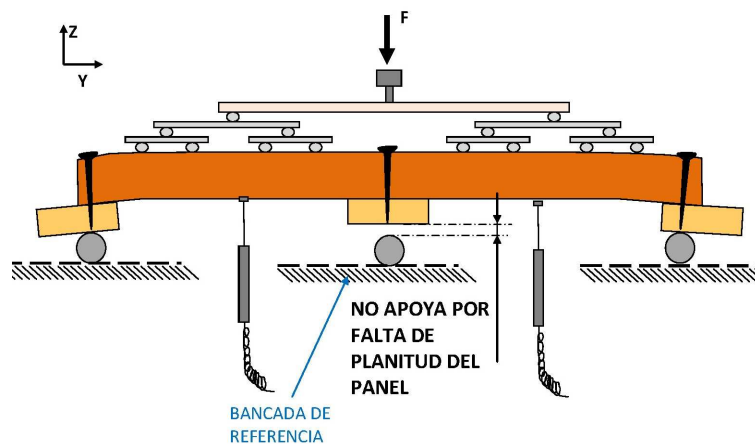


Figura 4.32. Ilustración del instante inicial del ensayo de un panel con falta de planitud. Por ello la correa central no apoya sobre el cilindro unido a la bancada de referencia. Es un panel convexo por su parte superior. Se observaría un tramo de escasa pendiente inicial recta en las dos gráficas.

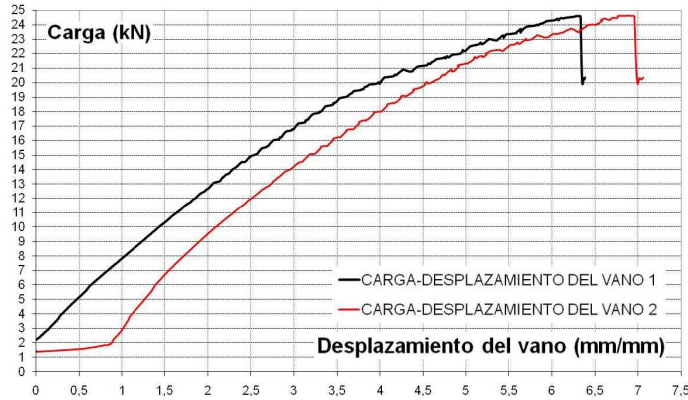


Figura 4.33. Ejemplo de gráfica carga-desplazamiento del vano correspondiente a un desplazamiento inicial grande en uno de los vanos, con poco aumento de carga.

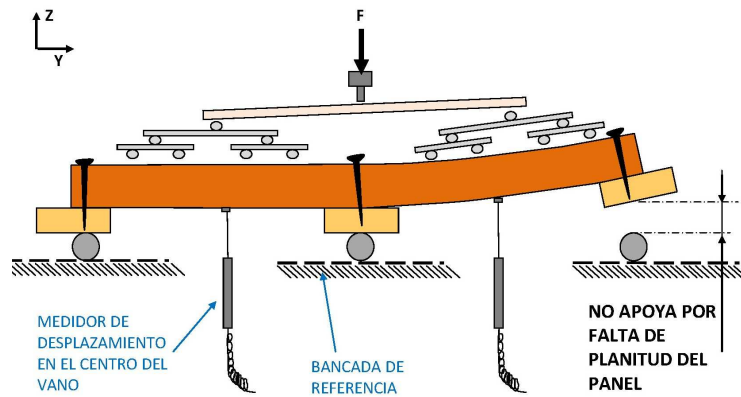


Figura 4.34. Ilustración del instante inicial del ensayo de un panel con falta de planitud. Por ello la correa central no apoya sobre el cilindro unido a la bancada de referencia. Es un panel cóncavo por su parte superior. Se observaría un tramo de escasa pendiente inicial recta en una sola de las dos gráficas.

En cualquier caso, en los cálculos de carga para un desplazamiento $L/200$ se han eliminado y sustituido estos tramos iniciales por la prolongación recta del tramo inmediatamente posterior.

El tramo 2 de la figura 4.31, no se aprecia en todas las curvas, pudiendo también estar relacionado con cierre de holguras o asentamientos en los apoyos. En cualquier caso esta anomalía en el comportamiento de la curva tiene escasa incidencia en los resultados calculados.

Por otra parte hay que tener en cuenta que según progresa el ensayo, es normal que uno de los dos vanos alcance valores de flecha mayores que el otro, y que esta diferencia se vaya acentuando cada vez más, con lo que se observará una menor pendiente en una de las curvas. De esta manera la deformación tiene una tendencia a progresar más por el vano más débil.

Otro fenómeno observado en la curva de flexión es la aparición de pequeñas caídas de carga en la parte final de la misma. La explicación de este comportamiento es que el utillaje diseñado aplica las líneas de fuerza a las distancias correspondientes, pero de manera que esas distancias no varían entre sí durante el ensayo. Sin embargo el panel se va curvando a medida que se deforma por lo que los cilindros aplicadores de vez en cuando resbalan súbitamente dando lugar a pequeños deslizamientos entre los cilindros y el panel. Se ha comprobado que este comportamiento se atenúa si se engrasan los cilindros aplicadores de la fuerza o se engrasa la misma superficie del panel. Este comportamiento tampoco tiene relevancia o incidencia en los resultados obtenidos.

Se ha tomado como criterio de fallo del panel la primera caída de carga significativa, a pesar de que en algunas ocasiones sigue incrementándose el valor de la carga aplicada. Esto se ha observado en algunos de los ensayos en los que la causa de la caída inicial de carga fue el deslizamiento de una capa constituyente con respecto a otra (fallo a cortadura de la unión adhesiva). Un ejemplo de este comportamiento puede verse en la *figura 4.35*.

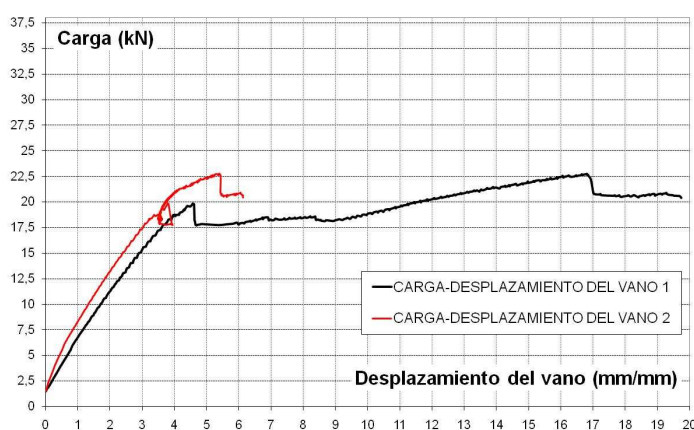


Figura 4.35. PANEL DE YESO-F9. En sayo de flexión de panel completo en el que se aprecia cómo después de una primera caída de carga significativa, el panel no solo mantiene su capacidad portante, sino que incluso alcanza cargas superiores

Finalmente hay que señalar que además de las circunstancias antes indicadas, en algunas ocasiones no hay claramente un tramo recto (lineal) por encima de los tramos iniciales de asentamiento que se deben descartar. Debido a esto, el cálculo del valor de carga para $L/200$ y el valor de la pendiente de la gráfica plantea cierto grado de subjetividad,

Debido a las consideraciones anteriores, los valores de carga para $L/200$ y los valores de la pendiente de la gráfica, en los cuales interviene la medición del desplazamiento, son menos exactos que los valores de carga de rotura que proceden exclusivamente de la lectura de la célula de carga. Por ello se decidió estimar las incertidumbres de los resultados de ensayo mediante el procedimiento desarrollado en el *apartado 3.3.1. del capítulo 3.*

Los resultados de los ensayos sobre los PANELES DE FRISO pueden verse en la *tabla 4.19*, y en las *figuras 4.36 a 4.38*. Las probetas se han denominado con la letra F mayúscula en alusión a la expresión *flexión positiva*. Los valores de carga se han indicado como carga total sobre el panel, en kN. Esta carga se puede convertir a valores de carga por unidad de superficie dividiendo dicho valor entre la superficie de los paneles: $2LA = 1,42 \text{ m}^2$. Cabe señalar que el aspecto visual de los paneles envejecidos es prácticamente igual al de los paneles sin envejecer, y esto es algo que también se ha observado en el resto de las probetas correspondientes a los demás ensayos realizados (flexión en tablero de PAR, tracción perpendicular todo espesor, etc.). Es decir que en una simple inspección visual no sería detectable un panel envejecido y degradado higrotérmicamente.

En la *tabla 4.19.b* se muestra un resumen de los resultados para el PANEL DE FRISO a los cuales se ha añadido la incertidumbre de ensayo. Para generar esta tabla se ha eliminado el resultado del ensayo PANEL FRISO-F1 y se ha tomado como incertidumbre expandida de los captadores LVDT, $U_{LVDT} = 0,1 \text{ mm}$

En la *figura 4.36.c* se ha representado una gráfica carga-desplazamiento representativa de cada uno de los estados de envejecimiento, y adicionalmente se ha representado la gráfica conforme al modelo analítico 2 desarrollado en el *apartado 3.3 del capítulo 3*. Este modelo se emplea como un elemento para la validación del ensayo.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejec.	Carga de rotura (kN)	Pendiente de la gráfica, plenamente desarrollada, en cada vano (kN / mm/mm)		Carga en L/200, en cada vano (kN)		Forma de rotura
PANEL FRISO-F1	Sin envejec.	50,88	2,8	3,3	22,9	28,3	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F2	Sin envejec.	64,26	4,6	5,0	28,7	29,3	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F3	Sin envejec.	75,54	5,2	5,9	33,1	35,9	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F4	Acel./30 días	46,87	4,7	5,0	26,6	27,9	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F5	Acel./30 días	53,00	4,5	5,2	24,4	27,4	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F6	Acel./60 días	47,82	4,4	4,8	24,8	27,5	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F7	Acel./60 días	49,64	5,0	5,0	24,2	25,8	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F8	Acel./60 días	43,93	4,6	5,0	24,4	25,4	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F9	Acel./90 días	---	---	---	---	---	Ensayo fallido
PANEL FRISO-F10	Acel./90 días	44,82	4,8	5,3	26,3	26,6	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F11	Acel./90 días	37,82	5,1	5,2	26,1	26,2	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL FRISO-F12	Acel./90 días	34,68	4,5	4,8	23,0	25,1	Rompe el tablero PAR en el centro del panel

Tabla 4.19.a. Resultados de los ensayos de flexión positiva en el PANEL DE FRISO

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Carga de rotura (kN)	Carga de rotura (porcentaje respecto al valor sin envejecimiento)	Carga en L/200 para el vano más débil (kN)	Carga en L/200 (porcentaje respecto al valor sin envejecimiento)
MODELO 2 TEORICO	Sin envejecimiento	---	---	31,3	---
PANEL FRISO-F2, F3	Sin envejecimiento	69,9 ± 12,4	100%	30,8 ± 7,7	100%
PANEL FRISO-F4, F5	Acel./30 días	49,9 ± 6,7	71%	25,6 ± 4,0	83%
PANEL FRISO-F6, F7, F8	Acel./60 días	47,1 ± 4,5	67%	24,5 ± 1,3	80%
PANEL FRISO-F10, F11, F12	Acel./90 días	39,1 ± 8,1	56%	24,6 ± 5,0	80%

Tabla 4.19.b. Valores medios de los resultados de los ensayos de flexión positiva en el PANEL DE FRISO, incluyendo incertidumbres.

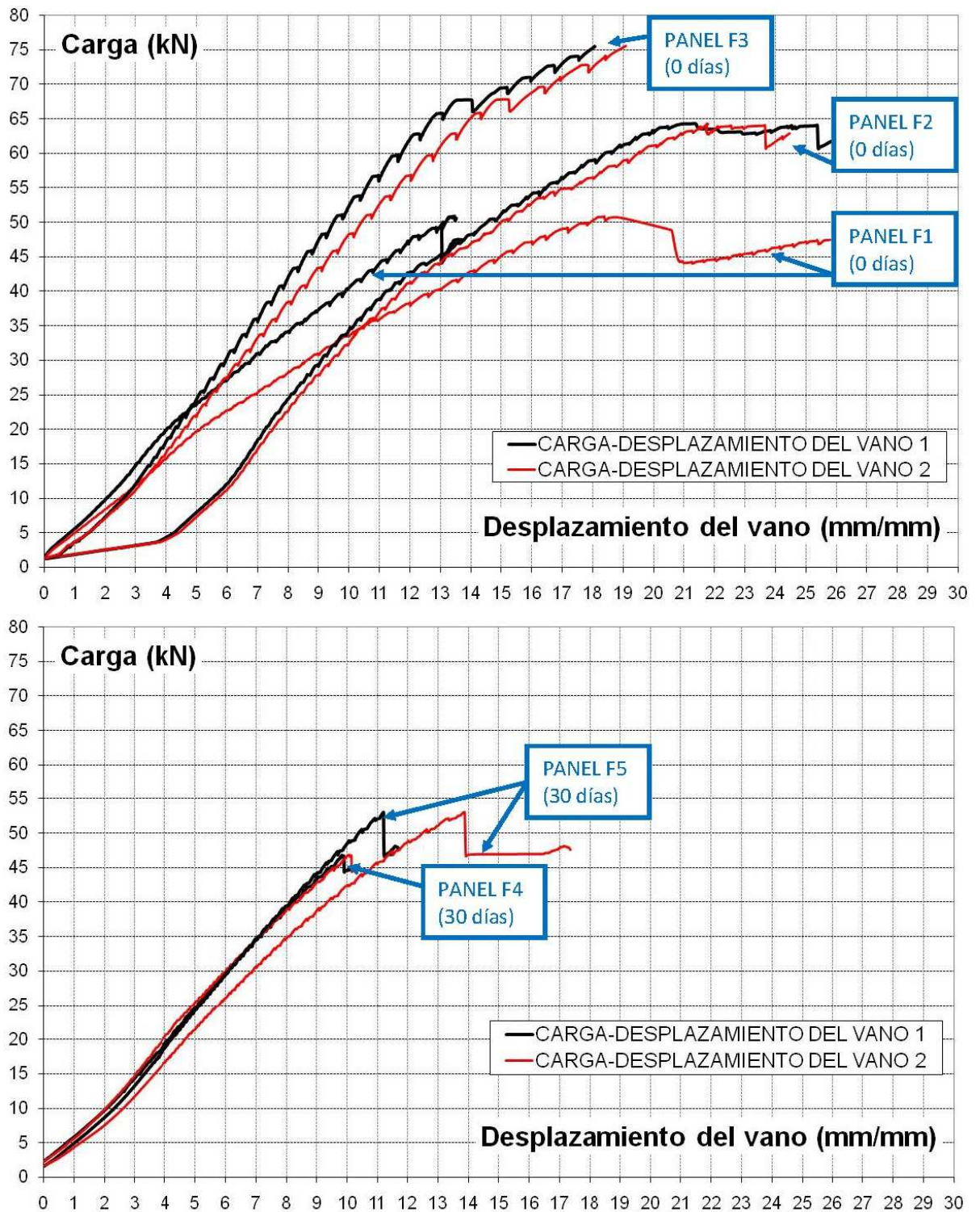


Figura 4.36.a. Gráficas de los ensayos de los paneles de friso envejecidos 0 y 30 días.

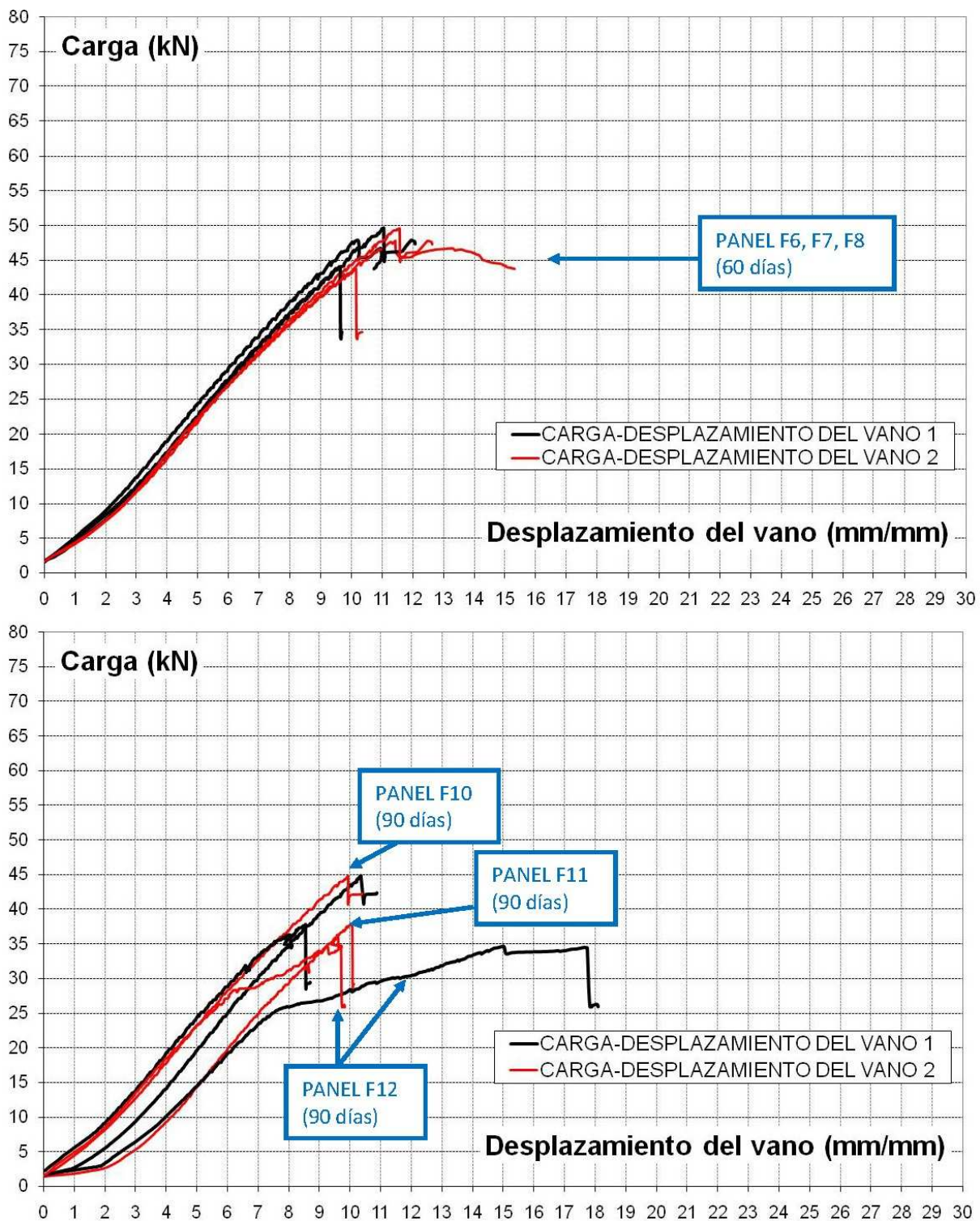


Figura 4.36.b. Gráficas de los ensayos de los PANELES DE FRISO envejecidos 60 y 90 días.

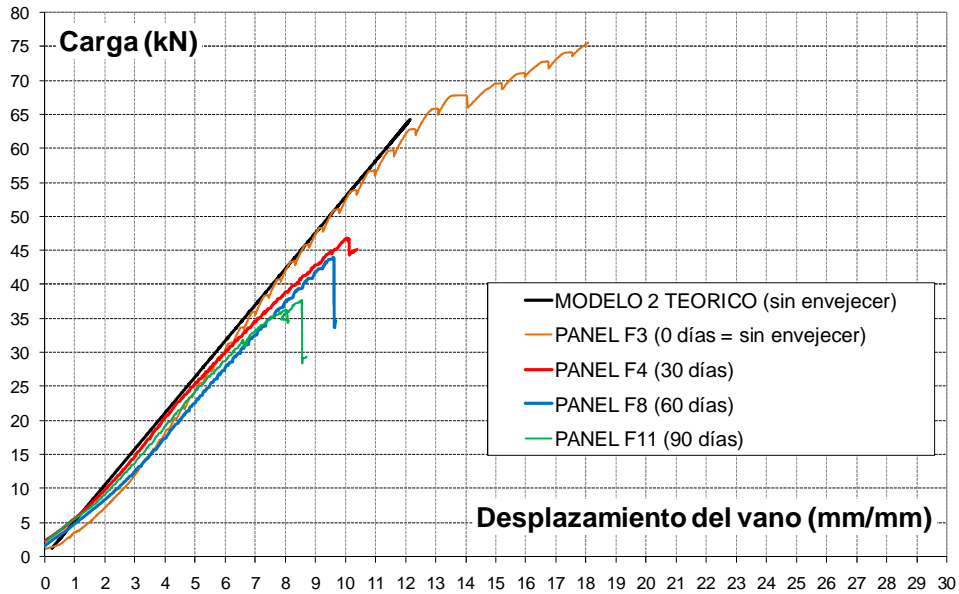


Figura 4.36.c. Gráficas de los ensayos de los PANELES DE FRISO. Comparativa de una de las gráficas representativas de cada una de las fases de envejecimiento.



Figura 4.37. Ensayo de flexión positiva; vista general



Figura 4.38. Detalle de la rotura producida en la plancha de XPS



Figura 4.39. Fallo de la probeta PANEL DE YESO-F10. Desliza el tablero PAR respecto al XPS. Detalle del extremo longitudinal del panel



Figura 4.40. Probeta PANEL YESO-F10; detalle de la rotura del tablero PAR en el centro del mismo producida con posterioridad al deslizamiento de las capas constituyentes

De la misma manera, los resultados de los ensayos sobre los PANELES DE YESO pueden verse en la tabla 4.20 y en las figura 4.39 a 4.41.

Probeta	Tipo /Tiempo de envejec.	Carga de rotura (kN)	Pendiente de la gráfica, plenamente desarrollada, en cada vano (kN / mm/mm)		Carga en L/200, en cada vano (kN)		Forma de rotura
PANEL YESO-F1	Sin envejec.	34,34	2,9	3,9	15,1	19,6	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL YESO-F2	Sin envejec.	36,36	2,5	2,8	14,8	17,2	Rompe el tablero PAR en el centro del panel
PANEL YESO-F3	Sin envejec.	---	---	---	---	---	Ensayo fallido
PANEL YESO-F4	Acel./30 días	30,50	4,0	4,6	21,6	24,4	Desliza el tablero PAR respecto al XPS: fallo de unión adhesiva
PANEL YESO-F5	Acel./30 días	30,65	4,0	4,2	22,1	23,5	Desliza el tablero PAR respecto al XPS: fallo de unión adhesiva
PANEL YESO-F6	Acel./60 días	26,64	3,9	4,4	21,8	21,9	Desliza el tablero PAR respecto al XPS: fallo de unión adhesiva
PANEL YESO-F7	Acel./60 días	30,41	4,1	4,7	22,4	24,7	Desliza el tablero PAR respecto al XPS: fallo de unión adhesiva
PANEL YESO-F8	Acel./60 días	24,85	4,1	4,3	22,4	22,7	Desliza el tablero PAR respecto al XPS: fallo de unión adhesiva
PANEL YESO-F9	Acel./90 días	22,76	4,1	4,3	Error en la captación del dato		En los alrededores de 18 kN desliza el PAR respecto al XPS y poco después rompe el PAR por el centro del tablero
PANEL YESO-F10	Acel./90 días	24,62	4,3	4,9	23,6	24,1	Desliza el tablero PAR respecto al XPS y poco después rompe el PAR por el centro del tablero
PANEL YESO-F11	Acel./90 días	27,38	3,9	4,9	23,1	24,9	En los alrededores de 20 kN desliza el PAR respecto al XPS y poco después rompe el PAR por el centro del tablero
PANEL YESO-F12	Acel./90 días	24,43	3,7	4,8	22,3	24,2	Desliza el tablero PAR respecto al XPS y poco después rompe el PAR por el centro del tablero

Tabla 4.20.a. Resultados de los ensayos de flexión positiva en los PANELES DE YESO.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Carga de rotura (kN)	Carga de rotura (porcentaje respecto al valor sin envejecimiento)	Carga en L/200 para el vano más débil (kN)	Carga en L/200 (porcentaje respecto al valor sin envejecimiento)
PANEL YESO-F1, F2	Sin envejecimiento	35,4 ± 2,2	100%	14,9 ± 0,7	100%
PANEL YESO-F4, F5	Acel./30 días	30,6 ± 0,2	86%	21,8 ± 1,0	146%
PANEL YESO-F6, F7, F8	Acel./60 días	27,3 ± 4,4	77%	22,1 ± 1,2	148%
PANEL YESO-F9, F10, F11, F12	Acel./90 días	24,8 ± 3,0	70%	23,0 ± 1,9	154%

Tabla 4.20.b. Valores medios de los resultados de los ensayos de flexión positiva en el PANEL DE YESO, incluyendo incertidumbres.

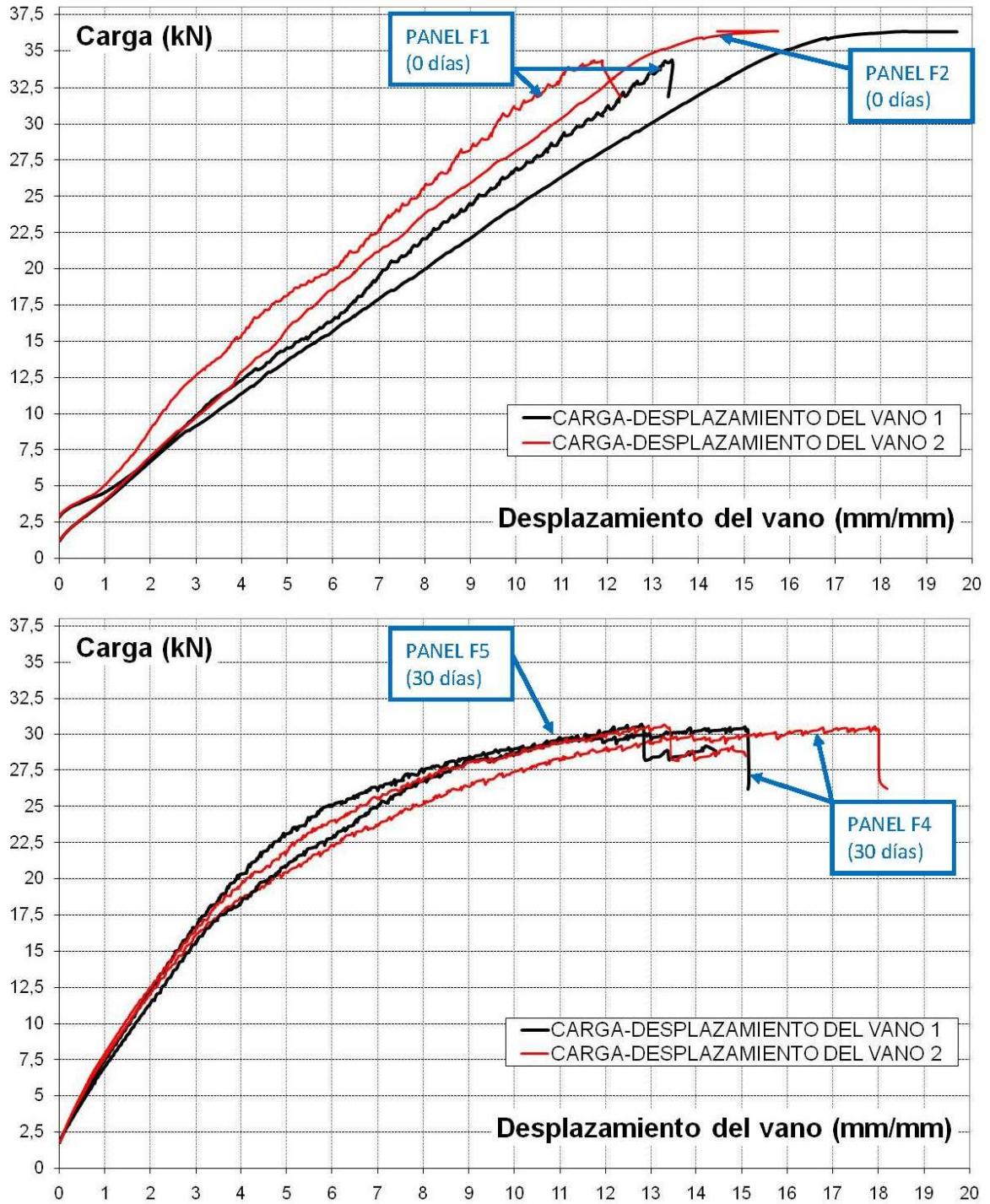


Figura 4.41.a. Gráficas de los ensayos de los PANELES DE YESO envejecidos 0 y 30 días.

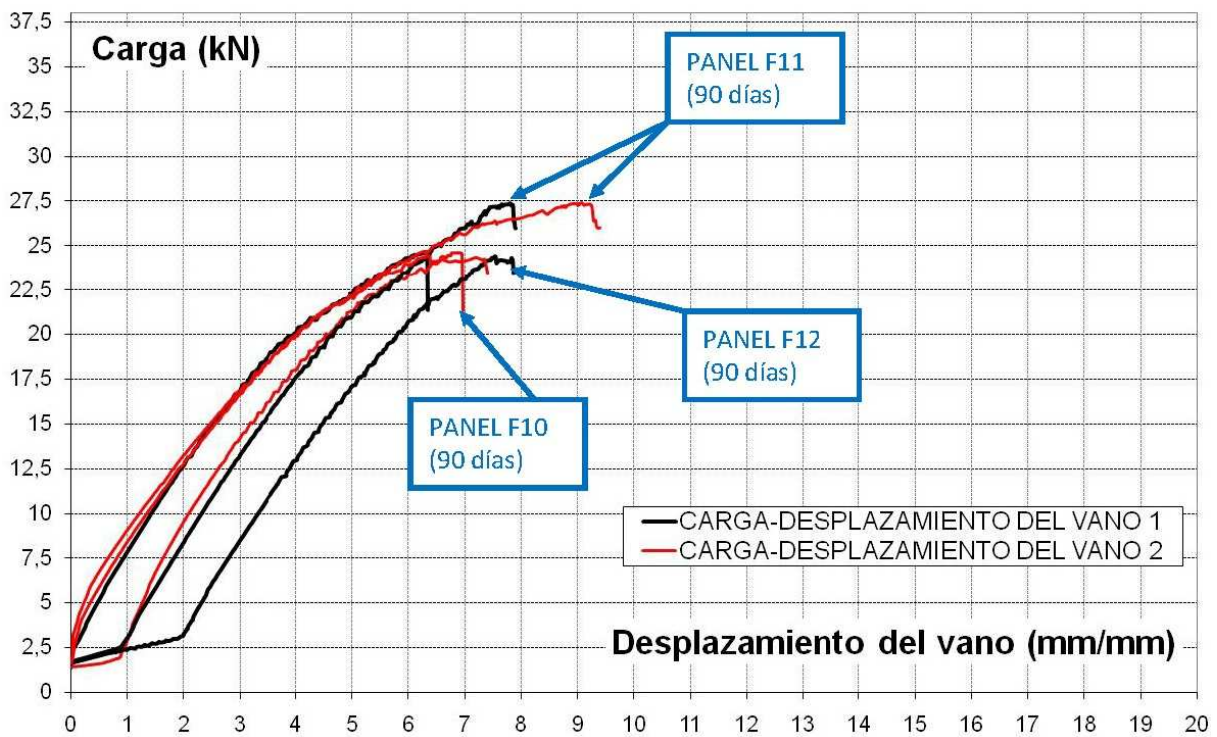
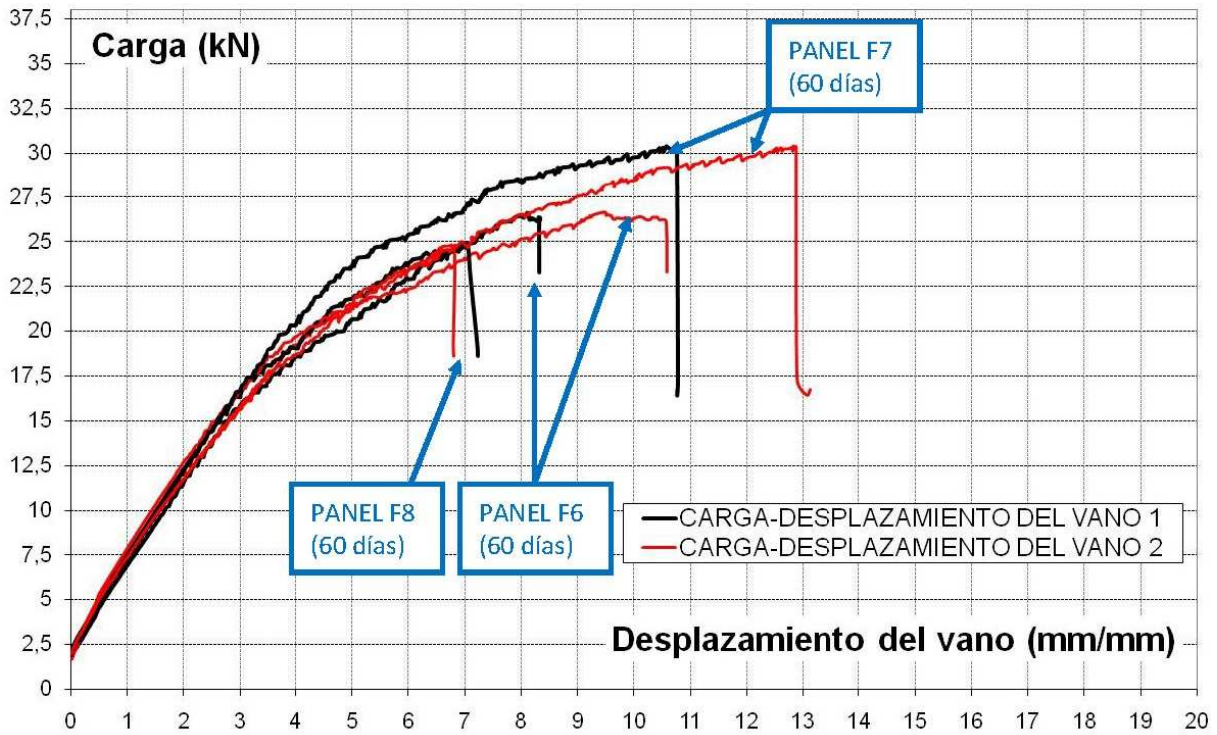


Figura 4.41.b. Gráficas de los ensayos de los PANELES DE YESO envejecidos 60 y 90 días.

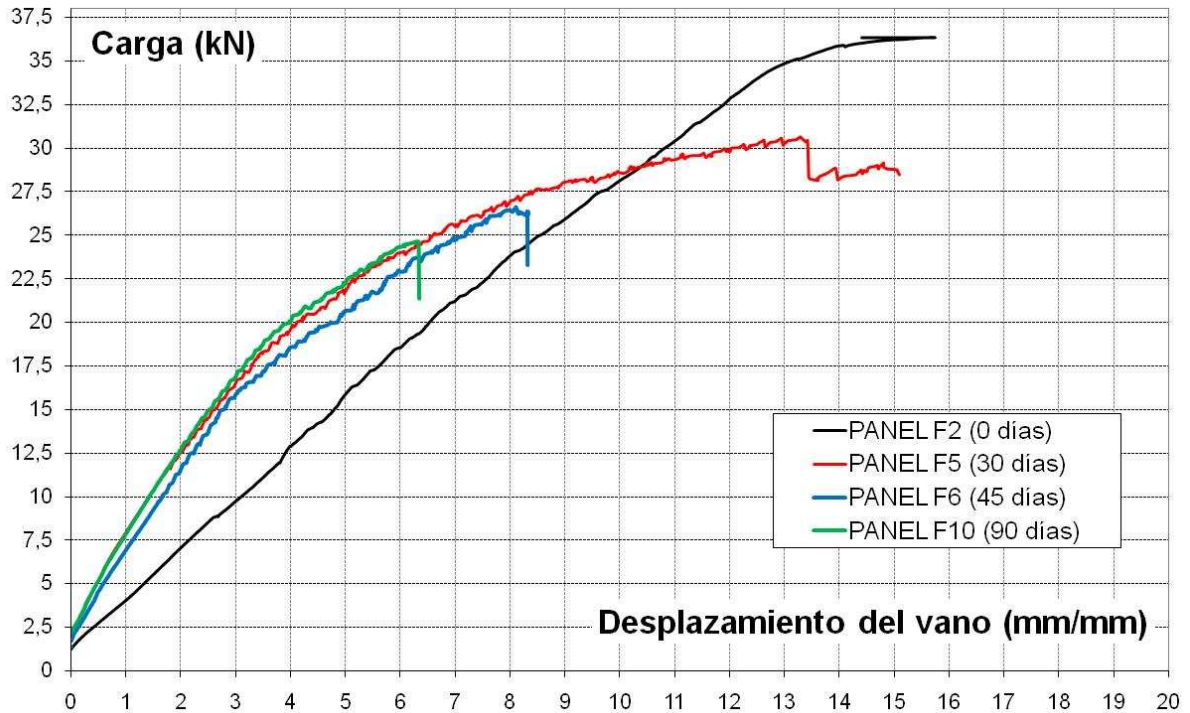


Figura 4.41.c. Gráficas de los ensayos de los PANELES DE YESO. Comparativa de una de las gráficas representativas de cada una de las fases de envejecimiento.

3.6.1. Discusión de los resultados

Consideraciones sobre la manera de realizar el ensayo

Como se ha indicado anteriormente, se decidió ensayar el panel con las correas para evitar el fallo local por aplastamiento contra los cilindros de apoyo, que en una disposición real no se daría. Esta precaución está indicada en la guía ETAG 016. Sin embargo esta guía no aclara si se debe efectuar el ensayo con los tornillos pasantes que están presentes en un montaje real.

Por una parte, si no se introducen los tornillos pasantes que atraviesan las tres capas se está eliminando un elemento que está siempre presente en la disposición real y que tiene diversos efectos sobre el comportamiento del panel: sin tornillos hay más tendencia a que se produzca el modo de fallo de deslizamiento de unas capas respecto a otras, ya que los tornillos dificultan ese desplazamiento. Por el contrario si los tornillos están presentes disminuye la tendencia al deslizamiento entre capas, pero se contribuye a la rotura en la zona central del vano, ya que introducen tres agujeros que debilitan esa zona que es la de mayor momento flector, y por la que habitualmente rompe en los ensayos (ver figuras 4.40, 4.43, 4.44).

Lo más apropiado sería que se realizara el ensayo de las dos maneras. No obstante la guía ETAG 016 debería aclarar si la pretensión del ensayo es simular el panel a flexión positiva o simular el modo de trabajo real del sistema completo de cerramiento cuando el panel trabaja a flexión positiva. Si esto fuera así, sería también más apropiado, que los apoyos no fueran del tipo simplemente apoyado (tal como indica la guía), sino más parecidos a las correas de la disposición de montaje real que son elementos que no rotan. En tal caso en el ensayo debería restringirse la rotación en los apoyos, lo que modificaría el resultado alcanzado.

En relación con esto también se debe tener en cuenta la cuestión que se apuntó en el *capítulo 1* acerca de la fragilidad que supone la unión entre el panel y la correa de apoyo cuando la superficie de apoyo entre ambos es pequeña. En tal caso una merma en las propiedades de los materiales componentes puede hacer que un panel con comportamiento satisfactorio en flexión positiva tal como se ha ensayado en este trabajo, falle a valores de carga muy bajos en la zona del apoyo. Este fallo puede deberse no solo al panel sino a cualquiera de los elementos implicados en ese apoyo: la correa (especialmente el material de la misma y la superficie de apoyo disponible), las sujeciones y el propio panel. Por lo tanto esta posibilidad refuerza la idea de que la ETAG 016 debería indicar la opción de ensayo a flexión positiva incluyendo las correas empotradas sin capacidad de rotación, con lo que se posibilitarían otros modos de fallo como el que se muestra en la *figura 4.42*. De esta manera el panel puede llegar a ser arrancado de la correa o habilitarse otros modos de fallo que actualmente no son contemplados en la norma.

El modo de fallo en el que el panel pierde su unión a la correa es especialmente grave en este tipo de panel, ya que un extremo en voladizo no tiene apenas capacidad portante.

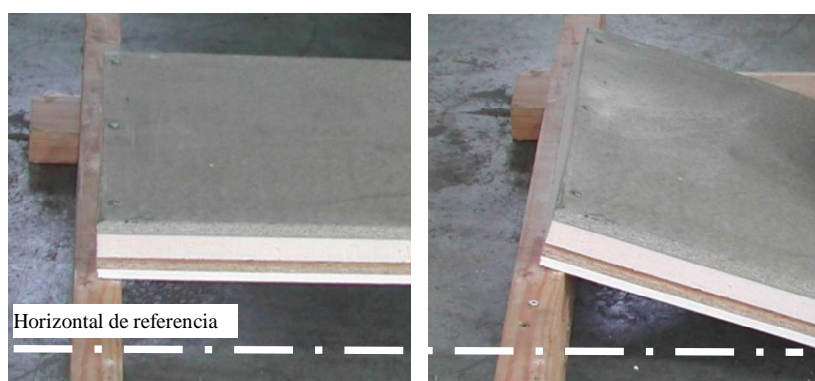


Figura 4.42. Uno de los modos de fallo por la unión del panel a la correa: las fijaciones son arrancadas, lo que puede provocar que el panel resbale de su apoyo en la correa.

Discusión sobre los resultados del panel de friso

En primer lugar, se observa que el *modelo 2 teórico* permite obtener una relación bastante precisa entre carga aplicada sobre el panel y flecha en el centro del vano. Esto significa que con este sencillo modelo se pueden hacer estimaciones correctas a partir de las propiedades de los materiales constituyentes para este tipo de panel, con el objetivo de predecir el comportamiento a flexión en tres apoyos de nuevas combinaciones y/o calidades de materiales. No obstante la existencia de modelos no debe excluir completamente la realización de ensayos, ya que en estos pueden verse fenómenos no previstos en los modelos.

Así por ejemplo en este modelo no se había contemplado el hecho de que al incrementar la carga sobre el panel, la plancha de XPS experimenta un esfuerzo de compresión que hace que su espesor disminuya sobre todo en la zona de los apoyos, lo que influye en la oposición que el panel presenta a ser flectado. En este caso particular, dada la densidad de la plancha de XPS, esta disminución del espesor es muy pequeña y no tiene gran efecto en el comportamiento del panel, pero en planchas de XPS con menor densidad pudiera tenerlo.

En segundo lugar, en lo que respecta a la carga de rotura, hay una inequívoca pérdida de capacidad portante a medida que va transcurriendo el envejecimiento acelerado. De la comparación con los resultados obtenidos en los componentes aislados del panel (*tabla 4.21*), podría deducirse que esta pérdida de propiedades en el panel completo está relacionada fundamentalmente con la pérdida de propiedades del tablero PAR, y no lo está apenas con la pérdida de propiedades de la unión adhesiva.

En efecto, si se comparan entre sí los distintos ensayos que han mostrado degradación a envejecimiento acelerado se puede observar que la flexión positiva tiene un ritmo de degradación similar al observado en el tablero PAR. La explicación es que el tablero que se encuentra en posición inferior (tablero FRI) y la plancha de XPS no experimentan disminución en sus propiedades, pero sí hay una disminución en las propiedades del tablero PAR. Como el modo de fallo que primero se alcanza es el de la rotura del tablero PAR, es lógico que aparezca esa correlación observada en la *tabla 4.21* (ver también *figuras 4.43* y *4.44*).

Tipo/Tiempo de envejecimiento	Flexión del Tablero PAR		Tracción perpendicular de todo espesor del panel	Cortante del panel (todo espesor)	Flexión positiva en dos vanos	
	Tensión de rotura	Módulo elástico	Tensión de rotura	Tensión de rotura	Carga de rotura	Carga en L/200
Sin envejecimiento	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Acel./30 días	70%	89%	16%	14%	71%	83%
Acel./60 días	63%	75%	0%	12%	67%	80%
Acel./90 días	59%	76%	0%	0%	56%	80%
Natural/4 años	96%	119%	117%	107%	No ensayado	No ensayado

Tabla 4.21. Resumen de diversas magnitudes ensayadas. Se expresan los valores en términos porcentuales con respecto al valor de la magnitud sin envejecer.

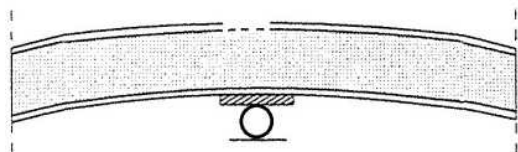


Figura 4.43. Esquemática del fallo del tablero PAR en el centro del vano



Figura 4.44. Detalle del fallo del tablero PAR en el centro del vano.

En tercer lugar puede verse en la *tabla 4.21* que la caída de las propiedades mecánicas en el panel a flexión positiva (que es un modo de comportamiento global del panel) es mucho menor que la caída de propiedades de la unión adhesiva (ensayo de tracción perpendicular y de cortante en todo el espesor del panel).

Tal como se recoge en la bibliografía estudiada, el comportamiento a tracción perpendicular resulta importante en los paneles de caras metálicas delgadas debido a que valores bajos de despegue en este ensayo implican que en el panel completo sujeto a flexión puede fallar en un modo de fallo de las caras denominado wrinkling³² (arrugamiento) (ver *figura 4.45*). Sin embargo en este trabajo se ha observado que este modo de fallo no se produce en la tipología

de paneles aquí estudiada, y por tanto la tracción perpendicular no tiene tanta importancia en este sentido. Lo que si puede darse en la flexión positiva, si hay un mal comportamiento de la unión adhesiva, es un deslizamiento de unas capas respecto a otras (*figura 4.39*), modo de fallo que no se contempla en el documento de recomendaciones europeas para el panel sándwich⁷⁷. Este documento está orientado hacia el panel de caras metálicas, y no contempla el modo de fallo de deslizamiento porque posiblemente cuando hay una deficiente unión adhesiva se producirá antes el wrinkling (arrugamiento) que el deslizamiento de las caras metálicas.

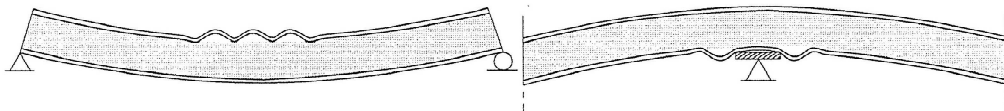


Figura 4.45. Wrinkling en una de las caras; en el centro del vano y en la zona de la correa.

En cuanto a los ensayos individuales, la probeta PANEL FRISO-F1 se ha descartado en el cálculo de los valores medios, ya que presenta un comportamiento anómalo, que puede ser atribuido a una incorrecta manipulación. Hay que tener en cuenta que estos paneles fueron transportados desde Asturias hasta Toledo para su envejecimiento y de nuevo retornados por transporte hasta Asturias para ser ensayados.

Resultados del panel de yeso

De la comparación de los resultados del ensayo de flexión positiva entre el panel sin envejecer y los paneles envejecidos, se observa que la carga de rotura del panel disminuye según avanza el tiempo bajo envejecimiento acelerado.

El PANEL DE YESO sin envejecer rompe con una deformación prácticamente igual al PANEL DE FRISO sin envejecer (unos 16 mm). Aquí se constata de nuevo que el eslabón más débil ha sido el tablero PAR.

Al cabo de 30 días de envejecimiento se esperaba que el PANEL DE YESO rompiera a unos 10 mm de deformación, como el PANEL DE FRISO con envejecimiento equivalente, pero dado que su tablero PAR ha mostrado gran resistencia respecto al mismo tablero del PANEL DE FRISO, ha resultado que se ha alcanzado el modo de fallo consistente en el deslizamiento de la unión adhesiva que peor envejece en este caso, la unión PAR-XPS.

Lo único relevante que resta por comentar es que se observa que los paneles envejecidos presentan un incremento de rigidez respecto a los no envejecidos. Esto se observa en la *figura 4.41.c.* donde se aprecia que para alcanzar la misma flecha, los paneles envejecidos precisan de mayor aplicación de carga. Esto podría deberse al fenómeno conocido, y descrito en el *capítulo 2*, por el cual el material de yeso puede experimentar una hidratación por efecto de la humedad que provoca un crecimiento de los cristales de carbonato de calcio. Este efecto de densificación del material se traduce en una rigidización del tablero y consiguientemente de todo el panel.

Consideraciones sobre la detección visual de un panel dañado

Como se ha indicado anteriormente en el punto de resultados, y también se observó en otros ensayos (además del de flexión positiva), el aspecto visual de un panel envejecido, con su tablero PAR y sus uniones adhesivas degradadas, es el mismo que el de un panel sin envejecer con buenas propiedades mecánicas.

Esto indica que un panel instalado en una edificación que estuviera deteriorado higrotérmicamente no sería detectable en una mera inspección visual, máxime cuando en muchas ocasiones el panel está oculto con capas adicionales de impermeabilización. De la observación de la capa de acabado (tablero de FRISO) desde una posición por debajo del panel tampoco se distinguiría un panel en mal estado.

Esto puede ser un problema cuando se llevan a cabo las inspecciones para valorar el estado de una cubierta. Si un panel concreto ha sufrido degradación de sus propiedades por envejecimiento sólo se puede detectar este hecho mediante extracción y ensayo del panel en cuestión.

3.7. Efectos sobre el panel completo: Impacto de cuerpo blando

Los ensayos se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento de ensayo de impacto por cuerpo blando descrito en el *capítulo 3*, excepto en lo que se refiere a la secuencia de impactos seguida. En efecto, debido a que el objetivo de estos ensayos era el de comparar el estado de probetas sometidas a distintos tiempos de envejecimiento, en vez de someter cada probeta a la secuencia de impactos recomendada para una categoría particular de cubierta, cada probeta se sometió a una sucesión de impactos tipo A (alta energía, 1200 N·m, 2,45 metros) e impactos tipo B (baja energía, 700 N·m, 1,43 metros) en función del resultado del impacto anterior.

Las probetas se han denominado con la letra I mayúscula en alusión al término *Impacto*. En la *tabla 4.22* se muestran los resultados de los ensayos, mientras que en la *figura 4.46* se muestran fotografías correspondientes a dichos impactos realizados.

Probeta	Tipo/ Tiempo de envejecimiento	Descripción de los impactos sucesivos a los que se somete la probeta hasta alcanzar la rotura de la misma
PANEL FRISO-I1	Sin envejecimiento	<i>Primer impacto:</i> Un impacto A que resiste sin daño <i>Segundo impacto:</i> Un impacto B que resiste sin daño <i>Tercer impacto:</i> Un impacto B que resiste sin daño <i>Cuarto impacto:</i> Un impacto B en el que la probeta rompe
PANEL FRISO-I2	Sin envejecimiento	<i>Primer impacto:</i> Un impacto A que resiste sin daño <i>Segundo impacto:</i> Un impacto B que resiste sin daño <i>Tercer impacto:</i> Un impacto B que resiste sin daño <i>Cuarto impacto:</i> Un impacto B que resiste sin daño <i>Quinto impacto:</i> Un impacto B que resiste sin daño <i>Sexto impacto:</i> Un impacto A que resiste sin daño. Se deja de ensayar ya que la probeta ha superado todas las expectativas
PANEL FRISO-I3	Acelerado/30 días	<i>Primer impacto:</i> Un impacto B que resiste sin daño <i>Segundo impacto:</i> Un impacto B que resiste sin daño <i>Tercer impacto:</i> Un impacto A que resiste sin romper, pero muy deformada <i>Cuarto impacto:</i> Un impacto B en el que la probeta rompe
PANEL FRISO-I4	Acelerado/30 días	<i>Primer impacto:</i> Un impacto A en el que la probeta rompe
PANEL FRISO-I5	Acelerado/60 días	<i>Primer impacto:</i> Un impacto B que resiste sin romper, pero muy deformada <i>Segundo impacto:</i> Un impacto B en el que la probeta rompe
PANEL FRISO-I6	Acelerado/60 días	<i>Primer impacto:</i> Un impacto B que resiste sin romper, pero muy deformada <i>Segundo impacto:</i> Un impacto B en el que rompe la probeta y se despega el tablero PAR del resto del panel
PANEL FRISO-I7	Acelerado/90 días	<i>Primer impacto:</i> Un impacto A en el que la probeta rompe y se despega completamente el tablero PAR del resto del panel
PANEL FRISO-I8	Acelerado/90 días	<i>Primer impacto:</i> Un impacto B en el que la probeta rompe y se despega completamente el tablero PAR del resto del panel

Tabla 4.22. Resultados de los ensayos de impacto a los que se ha sometido cada probeta en los PANELES DE FRISO

En la *tabla 4.22* puede verse cómo la resistencia a impacto disminuye a medida que aumenta el envejecimiento de los paneles. Los paneles soportan progresivamente menos impactos y de menor energía.



Ejemplo de un panel roto tras el ensayo del impacto



Probeta FRISO-I2 tras el sexto impacto aún no ha roto



Probeta FRISO-I4, tras el primer impacto ha roto



Probeta FRISO-I6 tras el primer impacto: vista de perfil de la deformación que presentó



Probeta FRISO-I6 tras el segundo impacto en el que se produce su rotura como se puede ver



Probeta FRISO-I7 que ilustra el despegue completo del tablero PAR respecto al XPS

Figura 4.46. Fotografías de algunos de los ensayos de impacto de cuerpo blando

3.7.1. Discusión de los resultados

Consideraciones sobre el ensayo de impacto

Se ha observado en este trabajo, y también en ensayos anteriores realizados sobre otros lotes de paneles del mismo tipo y de diferentes variantes (con las caras formadas por distintos tipos de tableros), que en muchas ocasiones, aunque el panel supere este ensayo, no lo hace holgadamente. Obviamente, debido a que superan el ensayo, son aprobados para el uso pretendido por el organismo autorizado para la concesión del DITE (Documento de Idoneidad Técnico Europeo).

Esto significa que a poco que el panel degrade por efecto de humedad o por algún pequeño mojado accidental, se tendría un panel que no superaría el ensayo. Tratándose de un ensayo crucial para la seguridad de las personas, este hecho es de gran importancia.

Por otra parte este ensayo no es complejo o costoso de llevar a cabo, por el contrario, resulta de fácil realización, ya que únicamente se necesita un armazón o estructura de madera y un saco impactador de 50 kg acorde a las exigencias de la norma.

Por todo ello sería recomendable que en el apartado que la ETAG 016 dedica a la durabilidad y a su evaluación mediante ciclos climáticos, se incluyeran ensayos de impacto como un medio más de evaluar los paneles después del envejecimiento. Esta prueba, por su sencillez, podría ser incluso previamente realizada, como control de calidad, por los propios fabricantes. Sería recomendable introducir una modificación en la ETAG 016 en este sentido.

También se ha observado que el medio panel que se dispone en la zona periférica del tejado a cubrir y que cierra una secuencia de paneles completos a tresbolillo, es el más susceptible de fallar a impacto. Esto es debido a que este medio panel está apoyado en dos correas, mientras que el panel completo al menos apoya en tres. Por otra parte, el apoyo central del panel completo es claramente más firme que los dos medios apoyos del medio panel.

Finalmente también se ha constatado en este ensayo que si un panel recibe un impacto por caída de una persona, y el panel queda dañado, este daño puede no ser visualmente detectado

si el panel se encuentra protegido y oculto por una lámina de impermeabilización que tape el tablero PAR. Así, en la *figura 4.47* puede verse un ejemplo de un panel ensayado a impacto, en el que el aspecto del tablero de FRI contemplado desde debajo del panel es un aspecto sin daño, pero sin embargo el panel está dañado claramente por su parte superior. Una lámina de impermeabilización que cubriera totalmente el panel, ocultaría este daño.

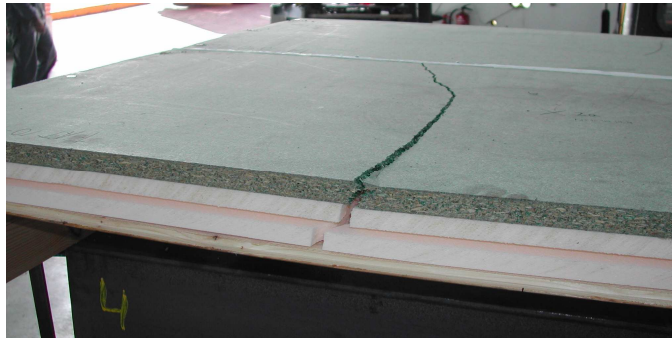


Figura 4.47. Panel dañado tras impacto de cuerpo blando, pero sin daño en el tablero FRI a causa de su flexibilidad.

Discusión sobre los resultados del panel de friso

Primeramente se constata una gran dispersión en los resultados obtenidos para cada tiempo de envejecimiento. Así, si se compara el resultado de la probeta PANEL FRISO-I1 y PANEL FRISO-I2 se puede ver la diferencia de comportamiento: la primera ha resistido un impacto de tipo A y dos de tipo B (con lo que se clasificaría como cubierta A2), mientras que la segunda ha resistido dos impactos A y cuatro impactos B (clasificado como cubierta A3) (ver *tabla 3.7*).

El problema de la dispersión de los resultados debería solventarse realizando un gran número de ensayos, para determinar con mayor precisión la verdadera resistencia del panel. Esto debería indicarse en la ETAG 016.

En segundo lugar se observa que a medida que envejece el panel, su comportamiento a impacto es claramente peor. Hasta tal punto que un panel sin envejecer puede clasificarse en el peor de los casos como de categoría A2 y sin embargo el panel más envejecido ya presenta comportamiento de categoría inferior, A1; es decir se pasa de una cubierta accesible a una no accesible.

No obstante, dado que se ha comprobado con los resultados de otros ensayos realizados en el ámbito del presente trabajo, que el envejecimiento acelerado imprime una degradación excesiva respecto al envejecimiento natural, lo más relevante de este ensayo no es tanto la pérdida de propiedades observada en el ensayo de envejecimiento acelerado, sino las *consideraciones sobre el ensayo de impacto* explicadas en el apartado anterior.

Si bien, de los resultados de los ensayos realizados sobre otras características del panel y sus componentes se ha concluido que el envejecimiento natural experimentado por las probetas no resultaba muy agresivo, se debe tener en cuenta que paneles sometidos a ambientes de alta humedad pueden no superar los niveles exigidos frente a impacto, por lo que este hecho se debe comprobar como ya se apuntó anteriormente. Hay que tener en cuenta que en este trabajo los paneles han envejecido en un determinado ambiente natural, mientras que en un caso real pueden darse otros más agresivos como es el caso de cocinas, cuartos de baño, piscinas, etc.

Por último indicar que se ha observado que algunos fabricantes para mejorar sensiblemente el comportamiento a impacto de este tipo de panel, añaden una capa adicional de un material muy resistente a impactos, tal como un tablero contrachapado (plywood), entre el tablero de acabado y la plancha de XPS, lo que mejora el comportamiento del panel frente al impacto.

3.8. Efectos sobre la conductividad térmica

La diferencia de temperatura entre la cara caliente y fría ha sido de 10 °C, mientras que la temperatura de ensayo ha sido de 9,9 °C. Los resultados obtenidos pueden verse en la *tabla 4.23*.

Probeta	Tipo/Tiempo de envejecimiento	Resistencia térmica (m ² ·k/W)	Observaciones
PANEL DE FRISO-T1	Sin envejecimiento	2,11	No se observan cambios en la probeta durante el ensayo
PANEL DE FRISO-T2	Acelerado/90 días	1,99	No se observan cambios en la probeta durante el ensayo

Tabla 4.23. Resumen de los resultados de los ensayos de conductividad térmica realizados sobre probetas de todo el espesor del panel.

3.8.1. Discusión de los resultados

Los resultados sobre conductividad térmica confirman lo obtenido en los ensayos de la plancha de XPS, en el sentido de que este material no se ve alterado por el envejecimiento acelerado. Esto es así debido a que la mayor parte de la resistencia térmica es aportada por el XPS. Como la conductividad térmica nominal de la plancha de XPS es de $\lambda_D=0.029$ W/m·K y tiene un espesor de 60 mm, la resistencia térmica medida en los ensayos resulta ser la esperada, y aún en las probetas fuertemente envejecidas no se aprecia variación de propiedades relativas al aislamiento térmico.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A continuación se exponen las conclusiones alcanzadas en el desarrollo del presente trabajo referidas al panel sándwich de caras derivadas de la madera y núcleo de XPS.

Envejecimiento natural frente a envejecimiento acelerado

1) El envejecimiento higrotérmico natural, a temperaturas no inferiores a 0°C y durante cuatro años, no ha producido degradación en el comportamiento de la unión adhesiva ni en los materiales constituyentes. Se puede concluir que si las condiciones ambientales, en el entorno del panel, presentan oscilaciones suaves de la humedad relativa junto con temperaturas ambientales moderadas y ausencia de ciclos de congelación-descongelación, las uniones adhesivas *XPS-tablero de partículas* y *XPS-tablero de friso de abeto* (ambas adheridas con PUR monocomponente de curado en presencia de humedad) no presentan degradación alguna. El tablero de partículas tampoco disminuye sus propiedades mecánicas por efecto de este envejecimiento.

Si bien el envejecimiento natural aplicado no provocó degradación en los materiales estudiados, hay que tener en cuenta que otras situaciones de alta humedad durante largos periodos de tiempo (cocinas, baños, recintos de piscinas, saunas, etc.) sí pueden producir degradaciones significativas. En cuanto al caso de temperaturas muy altas (70°C o más), que aparecen referenciadas en diversas ocasiones a lo largo de la norma ETAG 016, no parece muy factible que puedan ser sufridas por esta tipología de panel. Este nivel de temperatura sí puede ser aplicable al panel de caras metálicas, que se dispone como solución de cobertura final exterior, principalmente en fachadas. Por el contrario, el panel aquí estudiado lleva dispuesto por encima de él diversos elementos, incluida la teja, que hacen que en condiciones normales de uso no se alcancen estas temperaturas tan extremas, (lo no que excluye que excepcionalmente se puedan alcanzar: incendios accidentales cercanos, chimeneas, etc.). Esta

cuestión se tratará posteriormente en el apartado correspondiente a líneas futuras de investigación.

2) El envejecimiento acelerado consistente en un ciclado entre condiciones de humedad relativa baja (30%) y alta (85%), se ha revelado como significativamente más agresivo para la unión adhesiva que el envejecimiento según el ciclo 2 de la ETAG 016 consistente en el mantenimiento en condiciones de humedad máxima (100%).

En todo caso, el material más sensible a la humedad es la unión adhesiva entre capas constituyentes. La pérdida de resistencia a tracción perpendicular a las caras, aunque elevada, no se ve reflejada con la misma intensidad en la pérdida de propiedades del panel completo en flexión o en impacto por cuerpo blando. La disminución de prestaciones observada en estos dos ensayos es menor. La respuesta del panel frente a estos dos modos de sollicitación parece estar más bien relacionada con el comportamiento del tablero de partículas.

En este sentido, sería posible predecir de manera aproximada, el comportamiento de un panel, en función del comportamiento de los tableros que lo constituyen. En el caso del presente trabajo, la degradación de una sola de las capas componentes se ha traducido en una merma de propiedades similar en el panel completo.

3) Un panel deteriorado por efecto higrotérmico no es detectable en una mera inspección visual, máxime cuando en numerosas ocasiones el panel está oculto por otros elementos de la cubierta. Aunque el tablero de acabado (en este caso tablero de FRISO), presente un buen aspecto, el panel puede estar dañado en sus otras capas. Esto puede ser un problema en el ámbito de las inspecciones en edificación: no es fácil determinar si un panel concreto ha sufrido degradación en sus propiedades por humedad excesiva, a no ser que sea extraído y ensayado.

Critica a la evaluación de la durabilidad en la guía ETAG 016

En primer lugar, en la evaluación de la durabilidad, el ciclo climático que la ETAG 016 recomienda aplicar a un panel sándwich resulta ser función del material del que está hecho el núcleo del panel. Además, el ciclo climático a aplicar cuando se trata de un núcleo de XPS es

diferente, según se busque en la norma UNE EN 14509: 2006 o en la guía ETAG 016. En la primera se indica que se utilice el ciclo de temperatura alta y ausencia de humedad, denominado DUR1, mientras que en la segunda se indica que se utilice el ciclo caracterizado por una humedad alta, denominado Ciclo 2. Esto resulta contradictorio.

En lo referente a esta cuestión y como conclusión obtenida de esta investigación, se propone lo siguiente: Dado que en el comportamiento a tracción perpendicular a las caras del panel sándwich influye la combinación completa de material de la cara, núcleo y adhesivo que los une, se debería seleccionar aquel ciclo que fuera el que contuviera las condiciones climáticas que más afectaran al conjunto de esos tres elementos que conforman la unión adhesiva. Por tanto la tabla de selección de ciclo climático adecuado debería contemplar una selección de ciclo, no solamente basada en función del material del núcleo, sino también en el material del adhesivo e incluso en la combinación *material de la cara + material del adhesivo + material del núcleo*.

En segundo lugar la guía ETAG 016 indica que la durabilidad, en lo referente al efecto de la humedad y la temperatura sobre el panel sándwich, se debe evaluar a través de su comportamiento en el ensayo de tracción perpendicular a las caras. Sin embargo se considera que sería más correcto complementar este estudio incorporando la siguiente evaluación:

Se debería someter al panel completo a un envejecimiento higrotérmico realista, y comprobar tras ello si se siguen cumpliendo los requisitos esenciales exigibles (RE). No obstante no sería necesario repetir todos los ensayos del proceso de evaluación, sino solamente aquellos en los que el panel hubiera superado los requisitos exigibles por muy poco margen, y estos fueran fundamentales para la seguridad de utilización del panel. Por tanto, esto habría de hacerse, al menos, en los ensayos de impacto por cuerpo blando y flexión positiva. Este envejecimiento higrotérmico realista debería contemplar escenarios de estados de humedad o temperatura excepcionalmente desfavorables que pudieran darse, bien accidentalmente, bien por ubicaciones climáticas especialmente adversas en las que pudiera encontrarse el panel.

Crítica al ensayo de ciclos climáticos, Ciclo 2, de la guía ETAG 016

1) En lo referente a la idoneidad del ciclo 2, utilizado para la evaluación de la durabilidad a ciclos ambientales, para su aplicación en paneles de caras de madera y núcleo de XPS, se tiene que:

- a. Este ciclo resulta muy agresivo, ya que plantea unas condiciones que no se darían en la realidad. Son unas condiciones más susceptibles de ser alcanzadas por un panel de caras metálicas expuesto directamente al ambiente exterior. No obstante, aunque no se trate de un ensayo realista, se podría justificar la aplicación de este ciclo ambiental en base a que permite la acumulación y utilización de datos históricos sobre el comportamiento de diferentes materiales y adhesivos.
- b. En lo referente a la manera de evaluar la unión adhesiva, se debe tener en cuenta que en el panel aquí estudiado resulta un modo de fallo más determinante el deslizamiento entre capas (fallo de la unión por cortadura) que el wrinkling (arrugamiento) que es típico de paneles de caras metálicas.
- c. En todo caso no se evalúa un aspecto muy importante del envejecimiento que es el comportamiento frente a oscilaciones cíclicas de la humedad, fenómeno que tiene importancia en los tableros derivados de la madera.

2) En lo que respecta a la manera de aplicar el ensayo al panel de caras de madera, se recomiendan las siguientes cuestiones:

- a. Un panel especificado por su fabricante para ser instalado con la protección de una lamina de impermeabilización, debería de ser evaluado bajo ciclos climáticos, y no dejarlo a la elección del organismo evaluador como sucede en la actualidad. Se corre el riesgo de que organismos evaluadores diferentes adopten criterios diferentes ante paneles similares. Se concluye que, por su importancia y por la facilidad de realización de los ensayos, es conveniente evaluar también frente a ciclos climáticos este tipo de paneles.

b. Con el objetivo de no mezclar resultados obtenidos con distintos modos de fallo, en el ensayo de resistencia a tracción perpendicular a las caras, tras cada periodo de envejecimiento, se deberían ensayar por separado tantos grupos diferentes de probetas como uniones adhesivas presenta el panel. Cada grupo de probetas solo contendría una única unión adhesiva, que sería aquella objeto de evaluación.

c. En caso de ser necesario, los materiales de las caras y el del núcleo pueden ser sometidos al mismo ensayo de envejecimiento y posteriormente realizar el ensayo de tracción perpendicular a las caras. Esto permitiría determinar plenamente si un fallo aparente de unión adhesiva lo es realmente o se trata de un fallo del núcleo o de la cara en una zona muy cercana a la unión adhesiva.

d. Ante la dificultad, en ocasiones, de determinar el modo de fallo mediante la inspección a posteriori de las probetas ensayadas, se recomendaría el seguimiento visual del ensayo, ya que en la actualidad la ETAG 016 indica única y específicamente que se inspeccionen visualmente las probetas, tras el ensayo, para determinar el tipo de fallo .

e. En la extracción de las probetas de ensayo se debe tener en cuenta el proceso de fabricación del panel. Esto se debe hacer así para tener en cuenta posibles heterogeneidades en la distribución del adhesivo o en la naturaleza de los materiales constituyentes. En el estudio se debe cubrir toda la superficie del panel y se debe registrar la zona del panel de la cual procede cada probeta.

f. Cuando el valor de la resistencia a rotura de la unión adhesiva es pequeño, el peso de los platos empleados en los ensayos de tracción perpendicular a las caras pueden ser significativo por lo que deben ser tenidos en cuenta en los cálculos.

3) En lo referente a los criterios de evaluación del ciclo C2, se proponen las siguientes modificaciones:

- a. Debería aparecer, explícitamente, un primer criterio con un valor mínimo para R_0 . Es decir, $R_0 \geq C_I$.

- b. Como segundo criterio se propone una modificación del existente, que quedaría de la siguiente manera: $(R_7 - R_{28}) / (R_0 - R_7) \leq C_2$. Donde C_2 sería un valor a determinar, que se estima que sería menor de la unidad, ya que el valor actual $C_2 = 3$ no parece adecuado.
- c. El criterio de $R_{28} \geq 0,4R_0$ se mantiene.
- d. En cuanto a la extensión del ensayo desde 28 a 56 días, dado que es un ensayo de fácil realización que implica mantener un juego adicional de probetas durante 28 días más, sería recomendable indicar que se hiciera en todas las ocasiones. Incluiría un criterio que indique si se ha alcanzado la estabilidad. Se trata de que el segmento recto de 28 a 56 días tuviera una pendiente menor que la del segmento anterior, esto es $R_{56} \geq C_3 R_{28}$ donde C_3 tendría un valor cercano a la unidad para exigir una mínima degradación de los 28 a los 56 días.

Crítica al ensayo de flexión positiva (carga positiva)

La manera en que la guía ETAG 016 indica que se realice el ensayo de flexión positiva, evalúa el comportamiento del panel ante cargas aplicadas uniformemente sobre el mismo, pero con el panel aislado de su entorno y de otros elementos estructurales importantes. Se considera que resultaría de mayor interés la realización del ensayo de flexión positiva de manera que se aproxime más al funcionamiento real del panel en servicio.

El sistema se debería ensayar incluyendo el conjunto más desfavorable de correas sin capacidad de rotar, fijaciones y panel, especificados por el fabricante. Esto, por ejemplo, ya se indica en la guía para el caso del ensayo de impacto por cuerpo blando y también para otros ensayos mecánicos, pero no para el caso de flexión positiva.

En cuanto a la dificultad y coste de preparación, este ensayo es similar al actualmente descrito en la guía ETAG 016. Sin embargo resulta más realista y permite la detección de otros modos de fallo (en la unión del panel con sus apoyos) que en la actualidad no es posible evaluar.

El ensayo de impacto por cuerpo blando

Se ha observado en numerosas ocasiones que este ensayo es superado sin mucha holgura. También se ha observado una gran dispersión de resultados experimentales. Debido a esto, pequeñas degradaciones por efecto de la humedad podrían hacer que los paneles no superaran el ensayo.

Dado que el comportamiento frente a impactos de cuerpo blando es crucial para la seguridad de las personas, se recomienda que en el apartado correspondiente de la guía ETAG 016 dedicado a durabilidad y su evaluación por ciclos climáticos, se incluya la comprobación mediante impactos. Este ensayo es sencillo en su ejecución y requiere un equipamiento mínimo.

Se ha visto que se mejora el comportamiento del panel frente a impacto si se añade durante el proceso de fabricación una capa adicional que tenga resistencia específica frente a impactos.

Líneas futuras de investigación

A partir de la experiencia y conclusiones obtenidas en este trabajo, se propone una línea de investigación futura que complementaríade adecuadamente el trabajo realizado.

Sería de gran interés el estudio de envejecimientos naturales distintos del aplicado en este trabajo. Se trataría de estudiar paneles envejecidos en condiciones reales de servicio en distintas zonas climáticas e industriales (zonas de costa, montaña, etc.) con distintas orientaciones y exposiciones a los agentes meteorológicos. El trabajo consistiría en la recopilación de paneles que han estado trabajando en distintos ambientes o en situar paneles de la misma tipología que los estudiados en este trabajo en diferentes situaciones climáticas para evaluarlos posteriormente e intentar relacionar los resultados obtenidos con los envejecimientos acelerados aplicados en este trabajo.

La utilización de paneles ya en servicio conllevaría la ventaja de un ahorro significativo de tiempo en la obtención de resultados.

REFERENCIAS

- ¹ *Código técnico de la edificación. Estructuras de Madera.* (2006).
- ² *ETAG 016. Guideline for European Technical Approval of Self-supporting Composite Lightweight Panels. Parte one: General.* European Organisation for Technical Approvals, EOTA. (edition November 2003).
- ³ *ETAG 016. Guideline for European Technical Approval of Self-supporting Composite Lightweight Panels. Parte 2: Specific aspects relating to Self-supporting Composite Lightweight Panels for use in roofs.* European Organisation for Technical Approvals, EOTA. (edition November 2003).
- ⁴ *Resolución de 25 de octubre de 2004 de la Dirección General de Desarrollo Industrial por la que se modifican y amplían los anexos I, II y III de la Orden CTE/2276/2002, de 4 de septiembre, por la que se establece la entrada en vigor del mercado CE relativo a determinados productos de construcción conforme al Documento de Idoneidad Técnica Europeo.* Boletín Oficial del Estado núm. 287 de 29 de noviembre de 2004.
- ⁵ Moore, D.R., Iremonger, M.J. *The prediction of the flexural rigidity of sandwich foam Mouldings.* J. Cell. Plast., 10(5). P. 230-235. (1974).
- ⁶ Moore, D.R., Couzens, K.H., Iremonger, M.J. *The Deformational behavior of Foamed Thermoplastics.* J. Cell. Plast., 10 (3): P. 135-139. (1974).
- ⁷ Progelhof, R.C, Throne J.L. *Young's modulus of uniform density thermoplastic foam.* Polymer Engineering & Science. Volume 19. P. 493-499. (1979).
- ⁸ Davies, J.M. *Lightweight sandwich construction.* Blackwell Science Ltd. ISBN 0-632-04027-0. (2001).
- ⁹ *Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook. Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-113.* United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. (1999).
- ¹⁰ *ASTM C1396/ C1396. Standard Specification for Gypsum Board.* (2011).
- ¹¹ Singh, N.B., Middendorf, B. *Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization.* Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials 53 P. 57-77. (2007).
- ¹² Geimer R.L., De Souza, M.R., Moslemi, A.A. *Low-density cement-bonded wood composites made conventionally and with carbon dioxide injection.* Drvna industrija, 47 (2) P.55-62. (1997).

- ¹³ Gibson, L.J., Ashby, M.F. *Cellular Solids. Structure & Properties*. Pergamon Press. Oxford. (1988).
- ¹⁴ *Annual book of ASTM standards, Vol. 15.06 Adhesives*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials. (1997).
- ¹⁵ Bangham, D.H., Razouk, R.I. *Adsorption and the wettability of solid surfaces*. Transactions of the Faraday Society. 33, P.1459-1463. (1937).
- ¹⁶ Wenzel, R.N. *Resistance of solid surfaces to wetting by water*. Industrial Engineering Chemistry, 28, P. 988. (1936).
- ¹⁷ Soles, C.L., Yee, A.F. *A discussion of the molecular mechanisms of moisture transport in epoxy resins*. Journal of Polymer Science, 38, P. 792–802. (2000).
- ¹⁸ Van Landingham, M.R., Eduljee, R.F., Gillespie, J.W. *Moisture diffusion in epoxy systems*. Journal of Applied Polymer Science, 71, P. 787–798. (1999).
- ¹⁹ Adamson, M.J. *Thermal expansion and swelling of cured epoxy resin used in graphite/epoxy composite materials*. Journal Materials Science, 15, P. 1736–1745. (1980).
- ²⁰ Moy, P., Karasz, F.E. *Epoxy–water interactions*. Polymer Engineering Science, 20, P. 315–319. (1980).
- ²¹ Stroebech, C. *One- and two-component polyurethane adhesives for bonding sandwich elements*. Proceedings of the 1st International Conference on Sandwich Construction, Stockholm. (1989).
- ²² Borimir R., Claus R. *Eignung von 1k-PUR-Klebstoffen für den Holzbau unter Berücksichtigung von 10-jähriger Erfahrung*. Bauen mit Holz, vol. 6/2003, P.36. (2003).
- ²³ *DIN CEN/TS 14999. Adhesives for thermoplastic piping systems. Accelerated test of adhesives*. (2006).
- ²⁴ *UNE EN 2243-5:2006. Material aeroespacial. Materiales no metálicos. Métodos de ensayo. Parte 5: Ensayos de envejecimiento*. (2006).
- ²⁵ *ASTM D3632. Standard Test Method for Accelerated Aging of Adhesive Joints by the Oxygen-Pressure Method*. (1998).
- ²⁶ *ASTM D1183. Standard Practices for Resistance of Adhesives to Cyclic Laboratory Aging Conditions*. (2011).

-
- ²⁷ *Assumptions for the working life of construction products in guidelines for European technical approvals and harmonized standards. Proposal document TB 96/21/8.* Deutsche Institut für Bautechnik. (1996).
- ²⁸ *Preliminary European Recommendations for Sandwich Panels with additional recommendations for panels with mineral wool core material.* European Convention for Construction Steelwork, TWG 7.4, International Council for Building Research and Documentation, W56. Actualización publicada como CIB Publication 257. (2000).
- ²⁹ Berner, K. *The durability of structural sandwich elements.* Materials and Structures, 27, P. 33-39. (1994).
- ³⁰ Gillespie, R.H. *Accelerated aging of wood-based panel products: a review and commentary.* Workshop on Durability, Pensacola, Florida. (1982).
- ³¹ *ASTM D1828. Standard practice for atmospheric exposure of adhesive-bonded joints and structures.* (1997).
- ³² Kerkkanen, T., Tiainen, T. *Durability of different types of sandwich panels under climatic conditions.* Report 15/1999, Institute of Materials Science, Tampere University of Technology, Finlandia. (1999).
- ³³ Carroll, M.N. *We still don't boil houses: examination of the boil-dry-boil test in plywood standards.* Forest Products Journal. 28(5). P. 23-27. (1978).
- ³⁴ Carroll, M.N. *We still don't boil houses: test procedures for particleboard used in general building construction.* Proceedings Washington State University. Particleboard Symposium N.14, Pullman, Washington. P.39. (1980).
- ³⁵ Clad, W., Schmidt-Hellerau, C. *Behaviour of amino plastic and phenolic resins in particleboard during outdoor exposure.* Holz-Zentralblatt 44/45. P. 349-352. (1965).
- ³⁶ Hann, R.A., Black, J.M., Blomquist, R.F. *How durable is particleboard?* Forest Products Journal 12(12). P. 577-584. (1962).
- ³⁷ Hann, R.A., Black, J.M., Blomquist, R.F. *How durable is particleboard. Part II. The effect of temperature and humidity.* Forest Products Journal 13(5). P. 169-174. (1963).
- ³⁸ Jokerst, R.W. *Long-term durability of laboratory-made Douglas-fir flakeboard.* USDA Forest Service Research. Note FPL-0199. Forest Products Laboratory, Madison. (1968).
- ³⁹ Gressel, P. *Chipboard adhesive durability assessment. A contribution to the formulation of glue-independent test guidelines. Part 1, Statement of the problem, test planning and execution.* Holz als Roh und Werkstoff 38(1). P. 17-35. (1980).

- ⁴⁰ Gressel, P. *Testing and judging the durability of particleboard adhesives. A proposal for the establishment of generally valid testing guidelines. Part 2: Discussion of results.* Holz als Roh und Werkstoff 38(2). P. 61-71. (1980).
- ⁴¹ Gressel, P. *Chipboard adhesive durability testing and assessment. A contribution to the formulation of glue-independent test guidelines. Part 3: Conclusions and proposed test guidelines.* Holz als Roh und Werkstoff 38(3). P. 109-113. (1980).
- ⁴² Guillespie, R.H., River, B.H. *Durability of Adhesives in Plywood.* Forest Products Journal 26(10): P. 21-25. (1976).
- ⁴³ Palmer, R.E., Stashevski, A.M. *The effect of humidity cycling on commercial particleboards.* Division of Building Research, CSIRO, Highett, Victoria, Australia. (1979).
- ⁴⁴ McNatt, J.D., Hunt, M.O. *Creep properties of thick structural flakeboard under constant and cyclic humidity conditions.* Forest Products Journal. 32(5). P. 49-54. (1982).
- ⁴⁵ McNatt, J.D. *How cyclic humidity affects static bending and dimensional properties of some wood-based panel products.* Workshop on Durability, Pensacola, Florida. (1982).
- ⁴⁶ Suchsland, Otto. *Durability.* Workshop on Durability, Pensacola, Florida. (1982).
- ⁴⁷ Oliver, I.F. *Adhesives in cellulosic and Wood-based composites.* Universidad de Queen, Kingston, Ontario. Plenum Press, N.Y. P.235. (1981).
- ⁴⁸ Countryman, D.R. *The performance concept for evaluation of structural panel products.* Canadian Waferboard Symposium proceedings. P443-448. Forintek Canada Corp. (1980).
- ⁴⁹ *Código técnico de la edificación. Documento Basico-SE-M. Seguridad estructural. Madera.* (2009).
- ⁵⁰ *EN 335-1. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Definición de las clases de uso. Parte 1: Generalidades.* (2006).
- ⁵¹ *UNE-EN 1995-1-1. Eurocodigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación.* (2006).
- ⁵² *EN 335-3. Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Definición de las clases de riesgo de ataque biológico. Parte 3: Aplicación a los tableros derivados de la madera.* (1996).
- ⁵³ Just, M. *Zum Langzeitverhalten von Sandwichplatten mit einem Polyurethan-Hartschaumstoffkern.* Bauingenieur, 67, P. 83-89. (1992).
- ⁵⁴ *ASTM C481. Standard Test Method for Laboratory Aging of Sandwich Constructions.* (2011).

-
- ⁵⁵ *UNE-EN 392. Madera laminada encolada. Ensayo de esfuerzo cortante en líneas de adhesivo.* (1995).
- ⁵⁶ *ASTM D3165 - 07 Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies.* (2007).
- ⁵⁷ *ASTM D3762 - 03(2010) Standard Test Method for Adhesive-Bonded Surface Durability of Aluminum (Wedge Test).* (2010).
- ⁵⁸ Percival, D. *Durability problems associated with wood construction.* Workshop on Durability, Pensacola, FL, October P. 5-7. (1982).
- ⁵⁹ *Council Directive 89/106/EEC of 21 December 1988 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products.* Official Journal L 040, 11/02/1989 P. 0012- 0026. (1989).
- ⁶⁰ *Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre, por el que se dictan disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, en aplicación de la Directiva 89/106/CEE.* (1992).
- ⁶¹ *UNE-EN 14509. Paneles sándwich aislantes autoportantes de doble cara metálica. Productos hechos en fábrica. Especificaciones.* (2007).
- ⁶² *ETAG 019. Guideline for European Technical Approval for Prefabricated Wood-bases Loadbearing Stressed Skin Panels.* European Organisation for Technical Approvals, EOTA. (edition November 2004).
- ⁶³ *UNE-EN 1607. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de la resistencia a tracción perpendicular a las caras.* (1997).
- ⁶⁴ *UNE-EN 520:2005+A1. Placas de yeso laminado. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo.* (2010).
- ⁶⁵ *UNE-EN 312. Tableros de partículas. Especificaciones.* (2010).
- ⁶⁶ *UNE-EN 789. Estructuras de madera. Métodos de ensayo. Determinación de las propiedades mecánicas de los tableros derivados de la madera.* (1995).
- ⁶⁷ *UNE-EN ISO 9142. Adhesivos. Guía para la selección de condiciones de envejecimiento normalizadas de laboratorio para someter a ensayo juntas pegadas.* (2004).
- ⁶⁸ *UNE-EN: 12090. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a cortante.* (1997).

- ⁶⁹ *UEAtc Technical Report for the assessment of installations using sandwich panels with a CFC-free polyurethane foam core.* Union Européenne pour l'Agrément Technique dans la Construction. (1996).
- ⁷⁰ *UNE-EN 12089. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a flexión.* (1997).
- ⁷¹ *GUM 1995 with minor corrections. Guide to the expression of uncertainty in measurement.* JCGM en el nombre de BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP y OIML. (2008).
- ⁷² *EOTA Technical report TR 001. Determination of impact resistance of panels and panel assemblies.* European Organisation for Technical Approvals, EOTA. (edition February 2003).
- ⁷³ *UNE-EN 12667. Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y método del medidor del flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica.* (2002).
- ⁷⁴ *Documento de Idoneidad Técnica Europeo DITE 08/0020.* Expedido por Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña, a favor del fabricante Metazinco AISLANT S.A. y sobre el panel Metablock®. (2008).
- ⁷⁵ *Documento de Idoneidad Técnica Europeo DITE 08/0295.* Expedido por Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, a favor del fabricante Thermo chip S.L.U. y sobre el panel Thermo chip®. (2009).
- ⁷⁶ *prEN 14509. Self-supporting double skin metal faced insulating sandwich panels – Factory made products – Specification.* (2002)
- ⁷⁷ *European Recommendations for Sandwich Panels. Part I: Design.* European Convention for Construction Steelwork. (2001).