

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE PANELES SÁNDWICH DE PLACAS DE YESO LAMINADO Y LANA DE ROCA

J. A. Alonso¹, E. Reyes² y J.C. Gálvez²

¹ Departamento de Tecnología de la Edificación, E.U. Arquitectura Técnica. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Juan de Herrera s/n, 28040, Madrid, España.
E-mail: juanantonio.alonso.vera@upm.es

² Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. c/ Profesor Aranguren s/n, 28040, Madrid, España.
E-mail: jcgalvez@caminos.upm.es – ereyes@caminos.upm.es

RESUMEN

En esta comunicación se presenta el trabajo realizado para la caracterización experimental de un panel sándwich de yeso laminado y lana de roca, así como de cada uno de sus componentes: placa de yeso laminado, placa de yeso, lana de roca y papel. Para ello se diseñó una campaña de ensayos destinados a obtener las propiedades resistentes de los materiales estudiados, así como la energía específica de fractura, G_F , y las curvas completas de carga aplicada frente a desplazamientos. A partir de los resultados experimentales se ha observado que la energía de fractura está muy condicionada por el espesor de la lana de roca, y no tanto por el de la placa. Para simular numéricamente el comportamiento en fractura del panel se ha utilizado un modelo de elementos finitos con fisura embebida basado en la fisura cohesiva en el que se introducen como entrada los parámetros obtenidos a partir de la experimentación, obteniéndose una buena aproximación.

ABSTRACT

This communication describes the work done for the experimental characterization of a sandwich panel of laminated gypsum and rock wool, and each of its components: plasterboard, gypsum board, rock wool and paper. We designed an experimental campaign to obtain the strength properties of the studied materials, and its specific fracture energy, G_F , as well as the complete curves of applied load versus displacement. From the experimental results it can be observed that the fracture energy is strongly influenced by the thickness of the wool, rather than the plate. To simulate numerically the fracture behaviour of the panel, we have used a finite element model based on an embedded crack, with the cohesive crack model, in which are introduced as input the parameters obtained from the experimentation, obtaining a good approximation.

PALABRAS CLAVE: placa cartón-yeso, fractura en modo I, fisura cohesiva, elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

La placa de yeso laminado es un material que se viene empleando desde hace varias décadas en la ejecución de paramentos verticales en edificación. En Europa se estima una producción anual de 1.000 millones de m², de los cuales aproximadamente el 75%, va destinado a esta aplicación [1]. En España el empleo de este material es inferior al que tiene en Europa, empleándose sobre todo en edificación no residencial. Sin embargo, el cumplimiento de los valores límites de aislamiento acústico frente al ruido aéreo establecidos en el Código Técnico de la Edificación y, más en concreto del DB – HR: “Protección frente al ruido” [2], de reciente aparición, hace necesario en muchos casos recurrir a

este tipo de soluciones, en detrimento de las fábricas tradicionales [3].

Uno de los problemas más frecuentes relacionados con las particiones verticales, y que además da origen a un considerable número de reclamaciones por parte de usuarios, es el de la fisuración que se produce en ellas. Este fenómeno se debe en la mayoría de las ocasiones a la distinta deformabilidad que tienen estos elementos verticales, muros y tabiques, en comparación con la de los forjados sobre los que se apoyan.

Dado que no existen actualmente datos experimentales sobre el comportamiento en fractura de la placa de cartón-yeso, en el presente trabajo se ha diseñado una campaña de ensayos con el objetivo de obtener las

propiedades de fractura tanto del material compuesto como las de cada uno de sus componentes. Con los parámetros obtenidos se han realizado simulaciones numéricas del comportamiento en fractura del panel utilizando un modelo de elementos finitos con fisura embebida basado en el modelo de fisura cohesiva, obteniéndose una buena aproximación de los resultados experimentales. El objetivo final es proponer un modelo de carácter predictivo que permita estudiar las flechas máximas admisibles en los forjados en función de la tipología y condiciones de contorno del tabique, para evitar la fisuración de estos paneles.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La campaña experimental llevada a cabo en este trabajo se diseñó con el fin de obtener las características mecánicas relacionadas con la fractura del panel sándwich de placas de yeso laminado y lana de roca: resistencia a tracción (f_t), módulo de elasticidad (E) y energía específica de fractura (G_F).

2.1.- Probetas

Las probetas necesarias para realizar los ensayos, se obtuvieron a partir de paneles sándwich de placa de yeso laminado y lana de roca comerciales. Con objeto de garantizar la uniformidad de los paneles utilizados en los ensayos, las probetas de placa de yeso laminado y lana de roca se obtuvieron de la misma partida de material. Los tipos y dimensiones de los paneles se reflejan en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de paneles ensayados

Espesores en mm.		
Tipo $e-E-e$	Caras: yeso laminado	Alma: lana roca
10-50-10	10	50
10-60-10	10	60
12-50-12	12	50
12-60-12	12	60

e = espesor de la placa de yeso laminado (mm)
 E = espesor de la lana de roca (mm)

El panel sándwich está formado por varios materiales de características mecánicas y resistentes radicalmente distintas. Para estudiar la influencia que tiene cada componente en las características del material compuesto, se realizaron ensayos de cada uno de los materiales componentes del panel sándwich de forma independiente. De esta forma se ensayó por un lado el yeso laminado, compuesto a su vez por yeso y papel, ensayados también cada uno por separado, y por otro la lana de roca.

Las probetas de yeso laminado se obtuvieron a partir de placas de la misma partida de material empleada para fabricar los paneles sándwich. Las de lana de roca se prepararon eliminando las caras del panel sándwich. Para estudiar las características del yeso solo se

prepararon probetas eliminando el papel de la placa de yeso laminado, mediante una rectificadora. Por último, el papel se obtuvo sometiendo a compresión la placa de yeso laminado, para eliminar prácticamente todo el yeso de la misma, y acabando el proceso de eliminación a mano, para quitar los restos de yeso que quedaban adheridos al papel.

2.2. Maquinaria de ensayo

Todos los ensayos se realizaron con una máquina electromecánica universal de ensayos mecánicos marca SERVOSIS, modelo mE 405/1 de 1.000 kN de capacidad. Para cada experimento se adaptaron el utillaje y los transductores apropiados.

2.3. Descripción de los ensayos

2.3.1. Energía específica de fractura

La energía específica de fractura, G_F , del panel y sus componentes: yeso, yeso laminado y lana de roca, se obtuvieron por medio de ensayos de fractura en modo I, realizando un ensayo de flexión en tres puntos. Únicamente en el caso del papel que forma parte de la placa de yeso laminado, se realizó un ensayo de fractura en modo III, debido a la imposibilidad de realizar el anterior. También, y con el fin de comprobar la isotropía transversal del panel y la lana de roca, se realizaron ensayos de fractura y compresión en dos direcciones perpendiculares.

El ensayo de flexión en tres puntos se realizó siguiendo el procedimiento experimental recomendado por el comité RILEM 50 – FMC (1986), para la medida de la energía de fractura [4]. Durante el ensayo, las vigas se cargaban verticalmente en su centro, coincidiendo con el plano de la entalla, según una línea de carga materializada por medio de un rodillo unido al actuador. La probeta se apoyaba simétricamente respecto al plano de aplicación de la carga, sobre un rodillo en cada extremo. Para facilitar el contacto entre los rodillos y la viga, se adhirieron unas placas de aluminio de 70 x 20 x 4 mm en estas zonas. El canto de las probetas de panel y lana de roca era igual al espesor en cada uno de los casos estudiados. Las dimensiones parametrizadas en función del espesor, D , de la probeta se indican en la figura 1.

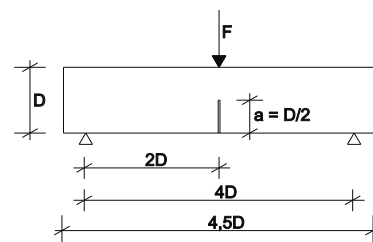


Figura 1. Esquema de ensayo de flexión en tres puntos, y dimensiones de las probetas.

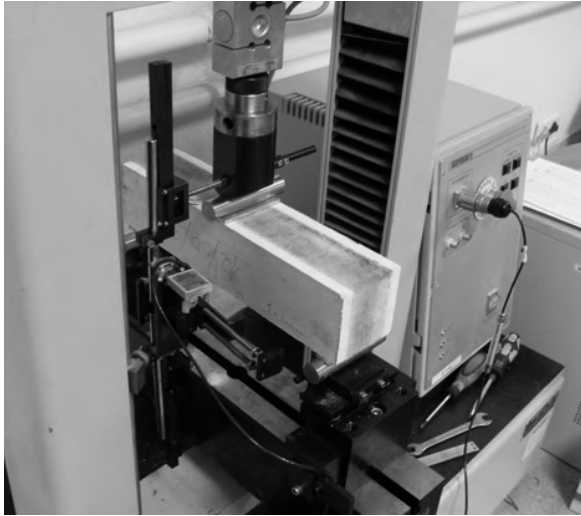


Figura 2. Ensayo de flexión en tres puntos del panel de yeso laminado con lana de roca.

Las variables registradas durante los ensayos fueron la carga y el desplazamiento del punto de aplicación de la carga. Una vez terminado el ensayo, se procedió a pesar la probeta, incluidas las placas de aluminio, así como a medir el espesor, la altura de la probeta y la profundidad de la entalla, por medio de un calibre.

La energía específica de fractura viene dada por el trabajo realizado, por unidad de superficie de rotura, de la curva fuerza desplazamiento obtenida en el ensayo de flexión en tres puntos.

Debido a las dificultades que entrañaba el obtener la energía específica de fractura del papel con ensayos de flexión en tres puntos, se obtuvo por medio de ensayos de fractura en Modo III. En este caso la probeta estaba seccionada a lo largo de su longitud, dividiéndola en dos zonas: una en la que se mantenía la sección inicial de la probeta (zona A en la figura 3 a), y otra en la que la sección se dividía en dos partes iguales en el sentido de su eje longitudinal (zona B en la figura 3 a). Después cada parte de la zona B se unía a las dos mordazas de la máquina de ensayo, tal como se muestra en la figura 3 b.

Previamente a la aplicación de la carga de tracción, se comprobó que las distancias desde el punto de unión de las dos mitades a las mordazas fueran iguales (punto M de la figura 3 b). Las variables que se registraron fueron la fuerza y el desplazamiento del actuador. Así mismo en este ensayo se midieron con calibre la longitud de la grieta producida y el espesor, en tres puntos de la probeta.

La energía específica de fractura se obtiene de forma análoga a lo expresado para el Modo I, es decir, dividiendo la energía de rotura por el área de la superficie de rotura.

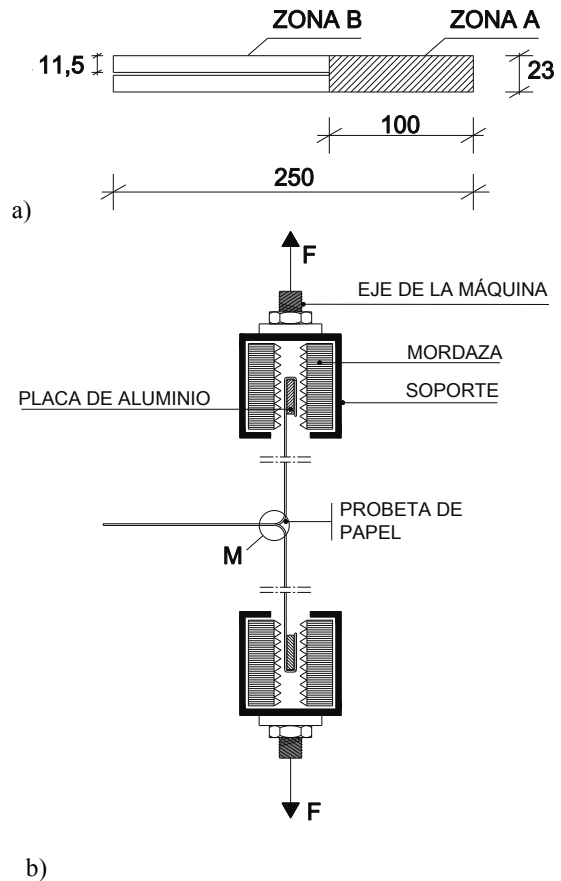


Figura 3. Ensayo del papel en Modo III: a) esquema de la probeta utilizada; b) esquema del dispositivo experimental.

2.3.2.- Tracción

Las placas de yeso laminado y el papel de la misma, se sometieron a ensayo de tracción, con el fin de obtener su resistencia a tracción y módulo de elasticidad.

Durante estos ensayos las variables que se registraron fueron la fuerza y el desplazamiento del extensómetro. Al finalizar el ensayo se midieron con un calibre, el espesor y ancho en dos puntos de la probeta, alrededor de la zona de fractura.

2.3.3.- Compresión

Con el fin de obtener el módulo de elasticidad de la lana de roca, y ante las dificultades de mecanización y fijación de este material a las mordazas en un ensayo de tracción, se realizaron ensayos de compresión.

2.4.- Curva de ablandamiento

El modelo de fisura cohesiva es una aproximación al comportamiento en fractura de materiales cuasi frágiles, que describe completamente la progresión del proceso de rotura. En su origen no es más que una fisura ficticia capaz de transferir tensiones de una cara a otra de la misma.

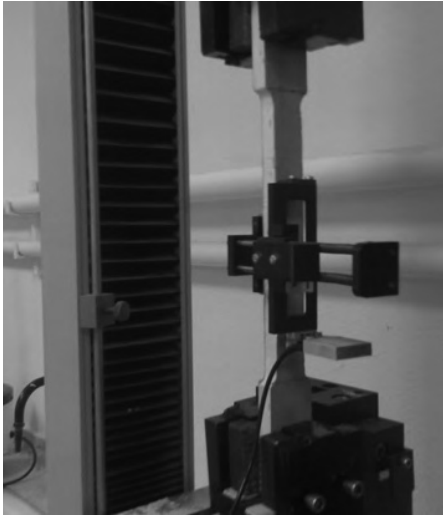


Figura 4. Ensayo de tracción placa de yeso laminado.

Se caracteriza por tener una curva tensión-deformación con ablandamiento, figura 5, donde desde el momento en que se alcanza la tensión última, σ_N , el desplazamiento producido en el ensayo corresponde a la apertura de la fisura. Este modelo fue introducido a principios de los años sesenta por Barenblatt [5] y Dugdale [6], siendo aplicado al hormigón por Hillerborg, Modéer y Petersson a principios de los 70 [7], demostrándose que la curva de ablandamiento es una propiedad del material.

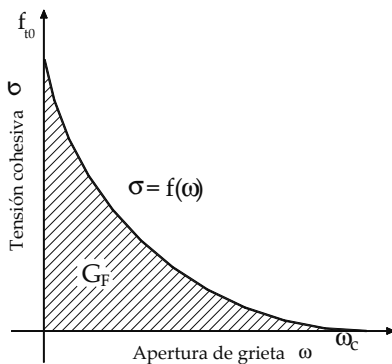


Figura 5. Curva de ablandamiento.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales obtenidos con los materiales ensayados son estables y repetitivos, tal y como puede apreciarse, a modo de ejemplo, en las curvas fuerza - desplazamiento de las figuras 6 y 7.

La resistencia a tracción de los paneles, y la lana de roca, se calculó por medio de la teoría de Resistencia de Materiales, a partir del valor del valor máximo de la carga registrada durante el ensayo de flexión en modo I.

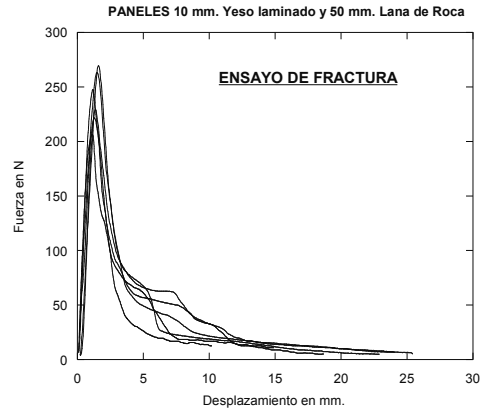


Figura 6. Curvas experimentales fuerza-desplazamiento para los paneles sándwich de yeso laminado y lana de roca.

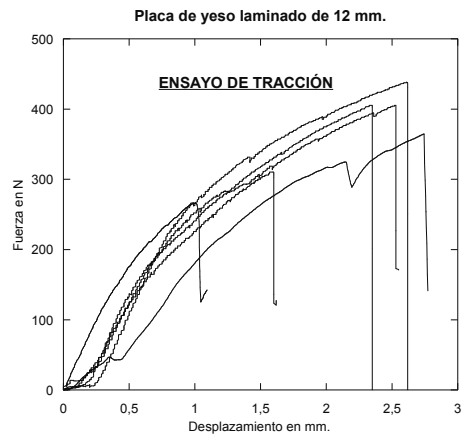


Figura 7. Curvas experimentales fuerza - desplazamiento para la placa de yeso laminado.

El módulo de elasticidad de la placa de yeso laminado y del papel, se obtuvieron a partir del ensayo de tracción, a través de las curvas tensión-deformación, y los de la lana de roca y los paneles, a partir de los mismos ensayos de flexión en modo I, por medio de la teoría de Resistencia de Materiales.

En la tabla 2 se muestra el resumen de los resultados experimentales obtenidos de G_F , f_t y E para cada uno de los constituyentes del panel. Asimismo, la tabla 3 recoge los valores medios obtenidos para los paneles a partir del ensayo de 6 probetas.

Tabla 2. Resultados de los constituyentes del panel.

Material	G_F (N/m)	f_t (MPa)	E (MPa)
	Med (σ)	Med (σ)	Med (σ)
Yeso Laminado	463 (33,50)	1,55 (0,22)	348 (64,1)
Lana de Roca	157 (31,60)	0,085 (0,01)	98,6 (26,6)
Yeso	17 (5,10)	0,50 (0,26)	----
Papel	1.025 (73,60)	10,28 (0,60)	27,7 (11,3)

Tabla 3. Valores medios de los paneles sándwich de yeso laminado y lana de roca.

Panel	G_F (N/m)	f_t (MPa)	E (MPa)
	Med (σ)	Med (σ)	Med (σ)
10-50-10	437 (80,01)	1,08 (0,19)	140 (9,20)
10-60-10	919 (142,5)	1,17 (0,14)	113 (13,6)
12-50-12	463 (128,5)	1,13 (0,24)	126 (11,4)
12-60-12	548 (118,3)	1,01 (0,09)	107 (20,1)

Las tablas 4 y 5 muestran los valores obtenidos en los ensayos de fractura del mismo panel en sentido longitudinal y transversal, así como del ensayo de compresión de la lana de roca, en estas dos direcciones, realizados para comprobar la isotropía del material

Tabla 4. Valores medios de G_f y f_t de los paneles sándwich medidos en sentido longitudinal y transversal.

Panel	Sentido	G_F (N/m)	f_t (MPa)
		Med (σ)	Med (σ)
10-50-10	Longitud.	436,93 (80,01)	1,08 (0,19)
	Transver.	326,56 (28,42)	1,23 (0,07)
12-60-12	Longitud.	548,15 (118,31)	1,01 (0,09)
	Transver.	612,16 (300,13)	1,06 (0,07)

Tabla 5. Valores medios de E de la lana de roca medidos en sentido longitudinal y transversal.

Panel	Sentido	E (MPa)	
		Medio	σ
10-50-10	Longitud.	98,63	26,63
	Transver.	79,80	2,00

4. MODELO DE CÁLCULO

En este trabajo se ha empleado un procedimiento numérico basado en los elementos finitos con una fisura cohesiva embebida que utiliza la aproximación de la discontinuidad fuerte [8], y que ha sido desarrollado para la simulación de la rotura en modo mixto de fábrica de ladrillo por Reyes et al. [9].

Una descripción detallada del modelo se puede encontrar en [9]. La aproximación numérica se ha introducido en el programa comercial de elementos finitos ABAQUS, a través de una subrutina de usuario para el material. En resumen se puede decir que para la modelización se utilizan triángulos de deformación constante que son capaces de romperse cuando cumplen el criterio de rotura de Rankine, introduciendo un salto de desplazamiento en su interior tal como se muestra esquemáticamente en la figura 8.

Estos elementos finitos con fisura embebida se han utilizado para simular los ensayos de flexión en tres puntos para los distintos paneles y sus componentes, a partir de las características mecánicas obtenidas en la

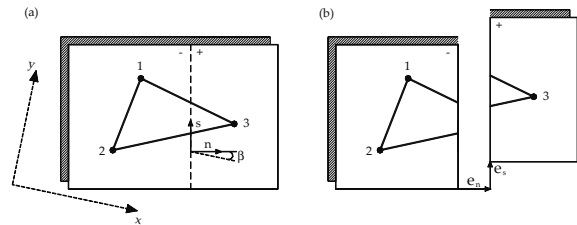


Figura 8. Triángulo de deformación constante: a) sistema de coordenadas globales x-y y de coordenadas locales n-t; b) componentes normal y tangencial del salto de desplazamiento.

campana experimental, utilizando para ello una curva de ablandamiento de tipo exponencial.

La figura 9 muestra la deformada de la malla de elementos finitos utilizada en el cálculo en rotura del panel de yeso laminado y lana de roca 10-50-10. Como se puede apreciar el modelo simula perfectamente la fisuración obtenida en los ensayos.



Figura 9. Malla de elementos finitos deformada correspondiente a la simulación del panel 10 – 50 – 10.

De las simulaciones se han obtenido las curvas fuerza desplazamiento numéricas y se han comparado con las obtenidas en los ensayos, obteniéndose un buen ajuste. En la figura 10 se muestran los resultados de carga-desplazamiento correspondientes a la simulación numérica del panel 10-50-10. Como se puede ver el modelo reproduce adecuadamente los resultados experimentales. De la misma forma la figura 11 muestra los resultados numéricos frente a los experimentales para las probetas de placa de yeso, mostrando una buena aproximación.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de las tablas 4 y 5 se puede ver que ni el panel ni la lana de roca son transversalmente isotrópicas, siendo las propiedades mecánicas como media un 30% superior en el sentido longitudinal. Esto era de esperar por el sistema de fabricación de la lana de roca, en el que las fibras se depositan de manera aleatoria, pero siempre con una cierta orientación preferente hacia el sentido de fabricación.

En lo que respecta a los paneles de yeso laminado y lana de roca, se observa en primer lugar, que la energía de

fractura está muy condicionada por el espesor de la lana de roca, y no tanto por el espesor de la placa de yeso laminado. Esto se debe a la composición de la lana de roca, formada por fibras aglomeradas, que son capaces de generar un gran número de micro fisuras durante el proceso de rotura, e incluso de disipar energía por rozamiento entre las mismas, aumentando la energía necesaria para el avance de la fisura. Es por ello que se obtiene una gran energía específica de fractura.

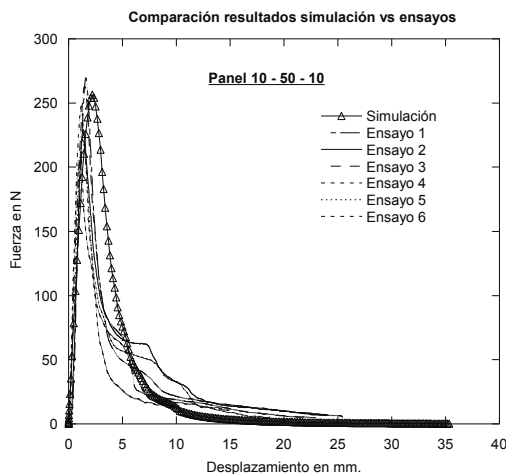


Figura 10. Comparación curvas fuerza-desplazamiento del panel 10 – 50 – 10, obtenidas en ensayos y por el modelo.

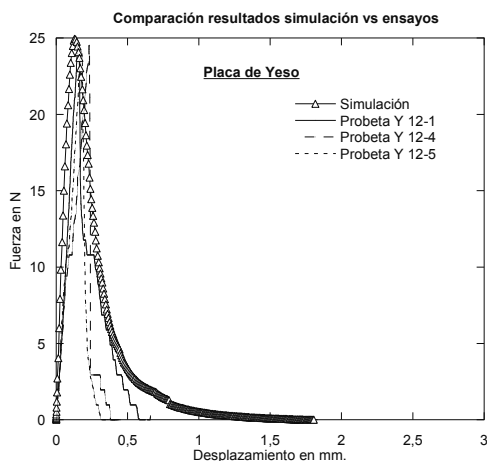


Figura 11. Comparación curvas fuerza-desplazamiento de la placa de yeso, obtenidas en ensayos y por el modelo.

Un mecanismo parecido se presenta en el caso de la placa de yeso laminado, donde los valores de la energía de fractura del yeso laminado son dos órdenes de magnitud superiores al yeso. En este caso el papel ejerce el rol de la lana de roca en el panel, pues sus fibras de celulosa producen el mismo mecanismo a la hora de producirse la fractura.

6. CONCLUSIONES

El modelo de fisura cohesiva, implementado en elementos finitos con fisura embebida, constituye una buena aproximación al comportamiento en fractura de paneles sándwich de yeso y lana de roca. Las figuras 10 y 11 así lo corroboran. Este modelo permitirá limitar la flecha de los forjados para evitar la fisuración de la tabiquería de paneles sándwich de yeso laminado y lana de roca. La caracterización de los componentes individuales ha puesto de manifiesto la gran diferencia de comportamiento mecánico entre ellos, y el importante papel que juegan en el comportamiento conjunto del panel sándwich.

Con una caracterización adecuada de las propiedades mecánicas y resistentes del panel sándwich de yeso laminado y lana de roca, se ha conseguido simular con el modelo propuesto en este trabajo su comportamiento en rotura de forma predictiva.

REFERENCIAS

- [1] Comunicación oral del Departamento de marketing, Placo.
- [2] Ministerio de la Vivienda, “Código Técnico de la Edificación. Documento Básico: Protección Frente al Ruido”. Madrid (2006)
- [3] Ministerio de la Vivienda, C.S.I.C. Instituto Eduardo Torroja, “Catálogo de elementos constructivos del Código Técnico de la Edificación”. Madrid (2008)
- [4] RILEM, 50-FMC Committee Fracture Mechanics of Concrete. “Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-points bend test of notched beams”. Matériaux et Constructions. (Vol 18, pag 285-290, 1986).
- [5] Barenblatt, G.I., “The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture”. Adv. Appl. Mech., (Vol. 7, pag 55-129, 1962)
- [6] Dugdale, D.S., “Yielding of steel sheet sheets containing slits”. J. Mech. Phys, (Vol. 8, pag 100-108, 1960)
- [7] Hillerborg, A., Modéer, M., Petersson, P. E., “Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements”. Cement Concrete Res., (Vol. 6, pag 773-782, 1976)
- [8] Simó, J, Oliver J., Armero F., “An analysis strong discontinuities induced by strain softening in rate-independent inelastic solids”. Comput. Mech., (12:277-96, 1993)
- [9] Reyes, E., Gálvez, J.C., Casati, M.J., Cendón, D.A., Sancho, J.M., Planas, J., “An embedded cohesive crack model for finite element analysis of brickwork masonry fracture”. Engineering Fract. Mech (Vol 76, pag 1930-1944, 2009)