

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE PANELES SANDWICH DE PLACA DE YESO LAMINADOS Y LANA DE ROCA

Alonso¹ Vera, J.A.* – Gálvez² Ruiz, J.C.– Reyes² Pozo, E.

¹Departamento de Tecnología de la Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, EU de Arquitectura Técnica, Madrid, España.

juanantonio.alonso.vera@upm.es

²Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Universidad Politécnica de Madrid, ETS de Ingenieros de Caminos, Madrid, España.

jcgalvez@caminos.upm.es – ereyes@caminos.upm.es

RESUMEN

1.- Objetivos

Las grietas en tabiques de edificación están relacionadas con el comportamiento en fractura del material que constituye el tabique y con la flecha del forjado.

En este trabajo se ha realizado la caracterización experimental de las propiedades mecánicas de este panel sándwich y sus componentes, proponiéndose un modelo de carácter predictivo que permita determinar las flechas máximas admisibles en forjados, para evitar su fisuración cuando se utilicen como particiones verticales.

2.- Metodología

Se ha obtenido la energía específica de fractura G_F de los paneles sándwich estudiados en este trabajo por método de ensayo descrito en la recomendación 50 – FMC de la RILEM .

La placa de yeso laminado se ensayó a: tracción, flexión y fractura. La placa de yeso y la lana de roca se ensayaron a fractura por separado. Por último, el papel que forma las caras se ensayó a tracción y a fractura, pero en modo III.

Con los parámetros obtenidos, se han realizado simulaciones numéricas del comportamiento en rotura del panel. Los resultados numéricos se han comparado con los valores obtenidos en los ensayos obteniendo un ajuste adecuado.

3.- Resultados

Se han obtenido los valores de la energía de fractura de los paneles sándwich completos y de sus componentes, y las curvas completas de carga aplicada frente a desplazamiento flexión mediante un modelo de fisura cohesiva adaptado a este material.

4.- Conclusiones

En primer lugar se observa que la energía de fractura está condicionada por el espesor de la lana de roca, y no por el espesor de la placa. Esto se debe a la composición de la lana de roca, formada por fibras aglomeradas, lo que genera un gran número de microfisuras que obligan a aumentar la energía necesaria para el avance de la fisura. El mismo proceso se produce en la placa de cartón – yeso, donde la estructura fibrosa de la celulosa del papel, produce el mismo mecanismo.

Por último, con una caracterización de las propiedades de cada uno de los componentes por separado, puede simularse el comportamiento conjunto del panel en fractura, mediante el modelo de elementos finitos adoptado en este trabajo, con un buen ajuste. Este resultado permite extrapolar los resultados de laboratorio al estudio de paneles de otros espesores y dimensiones.

1.- Objetivos

La fisuración de los muros y particiones interiores es un problema frecuente en la edificación de viviendas, siendo una de las causas más usuales la excesiva deformación del forjado en el que apoya, una vez ejecutado el paramento vertical.

La construcción de divisiones interiores con placa de yeso laminado y lana de roca se llevan empleando con éxito, desde hace mucho tiempo en edificación. Se ejecutan "in situ", a partir de un entramado metálico, con separación entre montantes superior a 60 cm, fijándose luego una de las caras realizadas con placa de yeso laminado, posteriormente se coloca el aislamiento y se termina con la segunda cara de placas y el sellado y acabado de juntas. Este tipo de particiones se usa mayoritariamente en Edificación no residencial (oficinas, comercio, etc), siendo muy escaso su empleo como particiones, en vivienda.

La aparición del Código Técnico de la Edificación y, fundamentalmente del Documento Básico. DB – HR "Protección frente al ruido", puede variar de manera considerable este panorama, pues establece unos valores límites de aislamiento el ruido aéreo que, para cumplirlos, tengan que usarse en muchos casos este tipo de solución, en detrimento de las de fábrica. El panel sándwich, debido a su mayor rigidez, puede aportar una disminución del entramado metálico y, por tanto de posibles "puentes fónicos".

Dada la relación entre el comportamiento en fractura de un material y su fisuración, y que no hay datos actualmente sobre sus propiedades en fractura ni del panel ni de sus componentes, se emprende este trabajo, proponiéndose un modelo de carácter predictivo que permita determinar las flechas máximas admisibles en forjados, para evitar su fisuración cuando se utilicen como particiones verticales.

2.- Metodología

2.1.- Introducción

La caracterización de un material en fractura exige, en primer lugar, la obtención de las características mecánicas relacionadas con ella, para, posteriormente, ver si puede adaptarse al modelo de fisura cohesiva, que servirá para poder establecer el modelo predictivo por métodos computacionales.

Las características mecánicas relacionadas con la fractura, y que para su obtención se ha diseñado la campaña experimental son: Energía específica de fractura (G_F), Resistencia a tracción (f_t) y Módulo de elasticidad (E). 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 ese sentido.

Por otro lado, el modelo computacional, basado en el modelo de fisura cohesiva, tiene por base teórica la que se ve en la (fig.1), donde las tensiones en la fisura son cero, en la zona cohesiva, las tensiones son función de la

apertura de fisura, y esta es nula en el ligamento. Esta relación entre las tensiones y apertura de fisura es lo que se conoce como la curva de ablandamiento del material, que es una propiedad del mismo.

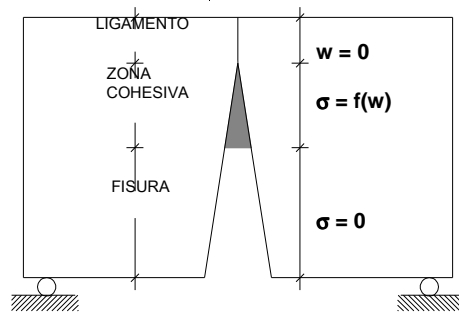


Fig. 1 Modelo de fisura cohesiva

2.2.- Campaña experimental

2.2.1.- Probetas

2.2.1.1.- Paneles

Las probetas necesarias para realizar los ensayos se obtuvieron de los paneles sándwich de placa de yeso laminado y lana de roca, producidos en Logroño dentro de un proceso de fabricación industrial estándar para estos materiales. Para garantizar la uniformidad de los paneles, las placas de yeso laminado y la lana de roca que conforman el panel, se extrajeron de la misma paleta. Los tipos y dimensiones de los paneles son los de la Tabla 1.

Espesores en mm.		
Tipo	Caras de Yeso laminado	Alma de Lana de Roca
10 – 50 – 10	10	50
10 – 60 – 10	10	60
12 – 50 – 12	12	50
12 – 60 – 12	12	60

Tabla. 1 Tipos de paneles ensayados

2.2.1.2.- Componentes

Para la caracterización de los componentes del panel, las probetas se obtuvieron de la siguiente manera:

- Las de yeso laminado, a partir de placas de la misma paleta de la que se empleó para fabricar el panel.
- Las de lana de roca, eliminando las placas de los paneles correspondientes.
- Las placas de yeso, eliminando el papel de la cara de la placa de yeso laminado con una rectificadora.

- El papel, sometiendo a compresión a la placa de yeso laminado para eliminar el yeso de la misma. Posteriormente, los restos de yeso adheridos al papel se eliminaron manualmente.

2.2.2.- Procedimiento experimental

2.2.2.1.- Maquinaria de ensayo

Todos los ensayos se realizaron con una máquina servo hidráulica 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. La máquina de ensayos está dotada de un sistema de control electrónico, modelo SERVOSIS +PCD 2K, que puede recibir la señal analógica de cuatro transductores independientes, a través de cuatro canales de entrada que digitalizan la señal.

Se utilizaron dos células de carga con el objetivo de tener la máxima precisión dentro del rango de medida. La precisión de las mismas eran del $\pm 0,5\%$ del valor medio y una precisión mínima del fondo de escala de $\pm 0,1\%$. Las células empleadas fueron una de 1000 N de capacidad en régimen dinámico y la otra de 15 kN.

2.2.2.2.- Descripción de los ensayos

2.2.2.2.1.- 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, en modo I, de flexión en tres puntos, mientras que la del papel que forma parte de la placa de yeso laminado, se obtuvo en un ensayo de modo III.

El ensayo de flexión entres puntos se realizó siguiendo el procedimiento experimental recomendado por el comité RILEM 50 – FMC (1986), para la medida de la energía de fractura. Durante el ensayo, las vigas se cargaban verticalmente en su centro, coincidiendo con el plano de la entalla, por medio de un rodillo conectado al actuador. La probeta iba apoyada simétricamente respecto al plano de aplicación de la carga, sobre un rodillo en cada extremo. La distancia entre apoyos fue de cuatro veces el canto de la probeta (fig. 2). El espesor de las probetas de panel y lana de roca era igual al canto.

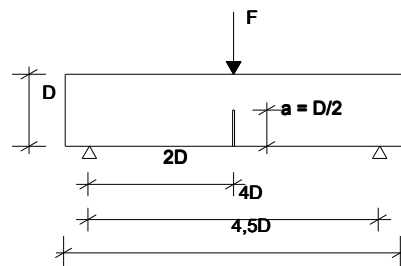


Fig 2 Esquema de ensayo de flexión en tres puntos

En todos los casos la probeta se apoya en cada extremo sobre un cilindro de acero de 10 mm de diámetro. Para facilitar el contacto entre los rodillos y la viga, se la adherieron en estas zonas, unas placas de aluminio de 70 x 20 x 4 mm. Durante el ensayo, la máquina controlaba el desplazamiento del pistón de aplicación de la carga de manera que la velocidad de descenso hasta el final del ensayo era de 0,03 mm/m.

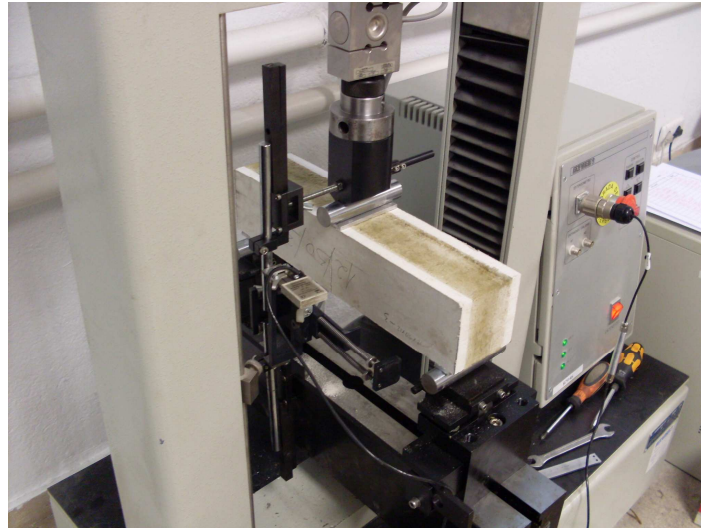


Fig 3 Ensayo de flexión en tres puntos

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

La energía específica de fractura viene dado por el trabajo realizado, por unidad de superficie (W_0), de la curva fuerza desplazamiento obtenida en el ensayo (fig4)

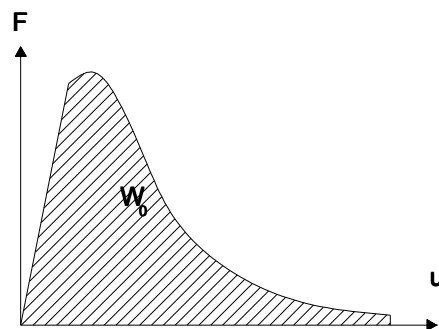


Fig 4 Ensayo de flexión entres puntos: Curva fuerza - desplazamiento

A este trabajo obtenido, se le añade el realizado por el peso de la viga, cuyo valor se estima en el producto de dos veces el peso de la probeta por la deformación máxima alcanzada antes de la rotura.

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 en Modo III, La probeta estaba seccionada en la mitad de su longitud, dividiéndola en dos zonas: una en la que se mantiene la sección inicial de la probeta (Zona A en la fig 5), la otra dividida en dos partes iguales en sentido de su eje longitudinal (Zona B en la fig 5), uniéndose cada una de ellas a las mordazas de la máquina de ensayo (fig5).

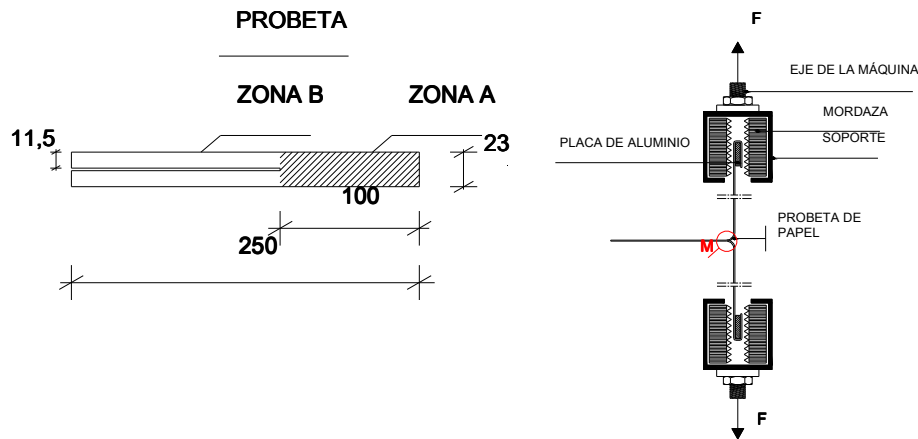


Fig 5 Probeta y ensayo papel en Modo III

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 en Modo III, La probeta estaba seccionada en la mitad de su longitud, dividiéndola en dos zonas: una en la que se mantiene la sección inicial de la probeta (Zona A en la fig 5), la otra dividida en dos partes iguales en sentido de su eje longitudinal (Zona B en la fig 5), uniéndose cada una de ellas a las mordazas de la máquina de ensayo (fig5). Previamente a la aplicación de las tracciones, se comprobó que las distancias desde el punto de unión de las dos mitades a las mordazas fueran iguales (punto M de la fig 5) y, posteriormente, cuando se observó en los gráficos dados por el sistema de adquisición de datos que la probeta entraba en carga, volvió a comprobarse esta distancia.

La tracción fue aplicada, sobre cada parte de la probeta, por medio del desplazamiento del actuador de la máquina, a una velocidad de ascenso constante de 0,02 m/sg hasta el final del ensayo. La carga se midió con una célula de carga de 1 kN. Las variables que se registraron fueron la fuerza y el desplazamiento del actuador. Así mismo se midieron la longitud de la grieta producida y el espesor, con calibre, en tres puntos de la probeta.

La energía específica de fractura se obtiene de igual manera que lo expresado para el Modo I.

2.2.2.2.2.- 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.

Para ambos ensayos, al igual que para el de energía específica de fractura en Modo III, se tuvo que suplementar las mordazas de la máquina universal de ensayos, para asegurar que al aplicar la fuerza de tracción no deslizará la probeta.

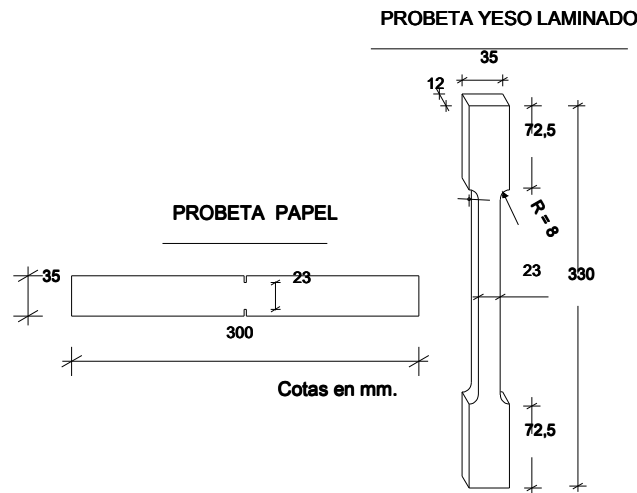


Fig 6 Probetas de papel, de 0,3 mm de espesor, y de yeso laminado, para el ensayo de tracción

Así mismo, y al igual que en el ensayo de energía específica de fractura en Modo III, las probetas de papel se doblaron, previamente al ensayo, sobre una placa de aluminio de 70 x 20 x 4, para que las mordazas de la máquina no dañaran al papel de la probeta durante la realización del ensayo. Las probetas de papel, recibieron una entalla en la zona central, con el fin de que la rotura de la misma, se produjera en esa sección (fig 6)

En estos ensayos se instrumentó un extensómetro resistivo HBM DA1 (tipo clip), para medir el desplazamiento de la sección central, siendo esta la señal que entraba por uno de los canales libres de la máquina. La carga se midió con una célula HBM D1 de 1,5 kN.

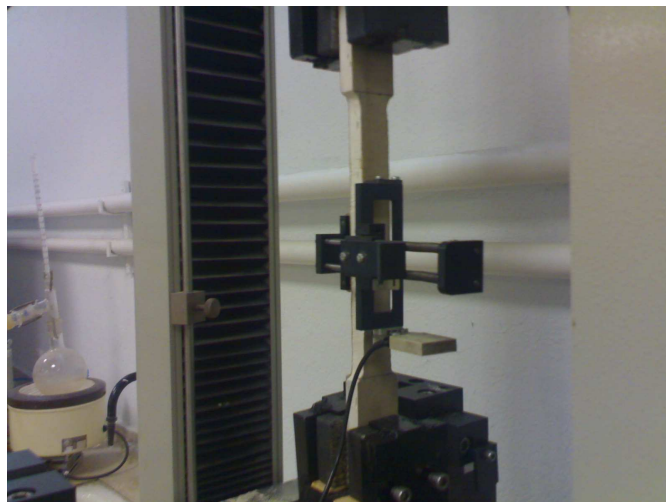


Fig 7 Ensayo de tracción placa de yeso laminado

La tracción fue aplicada por medio del desplazamiento del actuador de la máquina, a una velocidad de ascenso constante de 0,02 m/s hasta el final del ensayo. 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.

2.2.2.2.3.- Compresión

Con el fin de obtener el módulo de elasticidad de la lana de roca, y ante las dificultades de mecanización y fijación a las mordazas en un ensayo de tracción, se realizaron ensayos de compresión. En estos ensayos se instrumentó un extensómetro resistivo HBM DA1 (tipo clip), para medir el desplazamiento de la sección central, siendo esta la señal que entraba por uno de los canales libres de la máquina. Los palpadores, tipo muelle, apoyaban directamente sobre la probeta. La carga se midió con una célula HBM D1 de 1,5 kN.

La compresión fue aplicada por medio del desplazamiento del actuador de la máquina, a una velocidad de descenso constante de 0,02 m/s hasta el final del ensayo. Las variables que se registraron fueron la fuerza y el desplazamiento del extensómetro y actuador. Antes del ensayo se midieron con un calibre, el espesor y ancho en dos puntos de la probeta, uno en cada cara del prisma, y en las dos caras opuestas la altura de la muestra.

2.3.- Curva de ablandamiento

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

Se caracteriza por tener una ley tensión – deformación con ablandamiento, tal como la de la (fig 8).

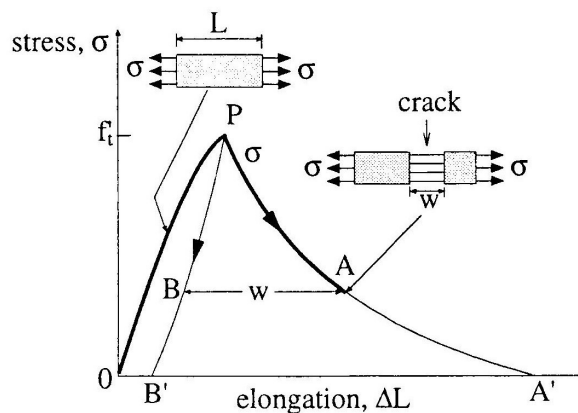


Fig 8 Planas y Bazant

En el momento que se alcanza la tensión última, σ_N , el desplazamiento producido en el ensayo corresponde a la apertura de la fisura. Este modelo fue introducida a principios de los sesenta por Barenblatt y Dugdale, siendo ampliado al hormigón por Hillerborg, Modéer y Petersson a principios de los 70, demostrándose que la curva de ablandamiento es una propiedad del material.

La curva de ablandamiento adimensional, se obtuvo con el programa Splitting-labMini, desarrollado por el Departamento de Ciencia de Materiales de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de la U.P.M. Las características del material, y la geometría de la muestra se introducen a partir de los siguientes parámetros(ver fig 2): relación a / D , y longitud característica dada por:

$$l_{ch} = \frac{E' \cdot G_F}{f'_t} \quad (1)$$

En este trabajo, los parámetros introducidos han sido: $a / D = 0,5$ y l_{ch} la de cada material. De las posibles curvas (fig 9), se ensayaron la exponencial y bilineal

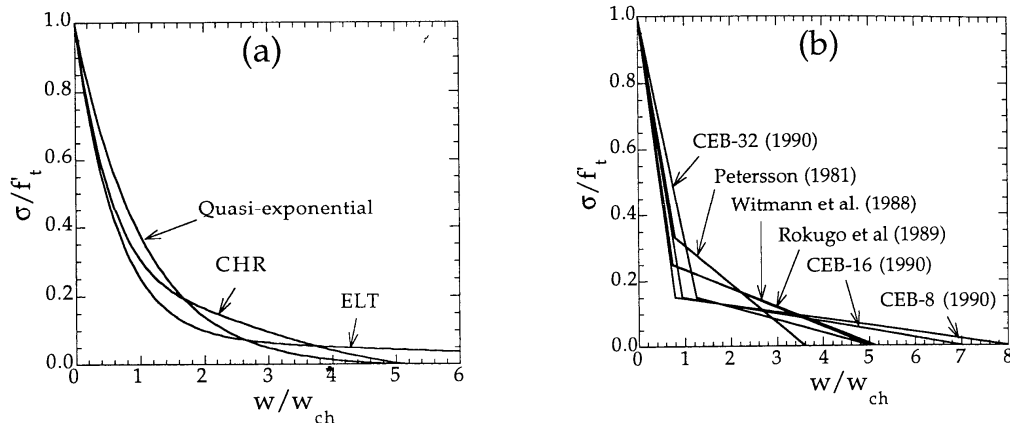


Fig 9 Curvas de ablandamiento

La que mejor se adaptó fue la exponencial (fig 10)

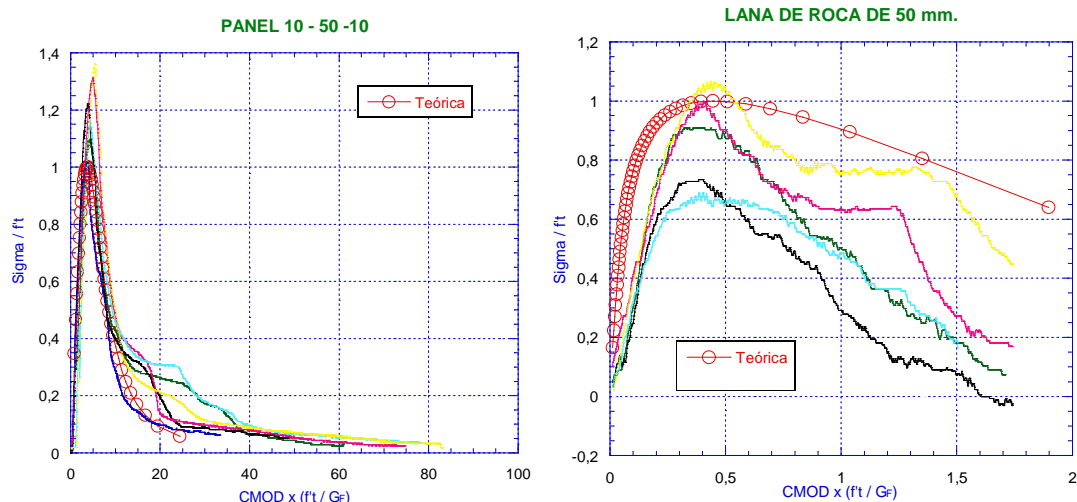


Fig 10 Curva de ablandamiento teórica vs experimental (ejemplos obtenidos)

3.- Resultados

Los resultados obtenidos son uniformes y coherentes con los materiales ensayados, tal y como puede apreciarse, a modo de ejemplo, en las curvas fuerza desplazamiento (fig 11).

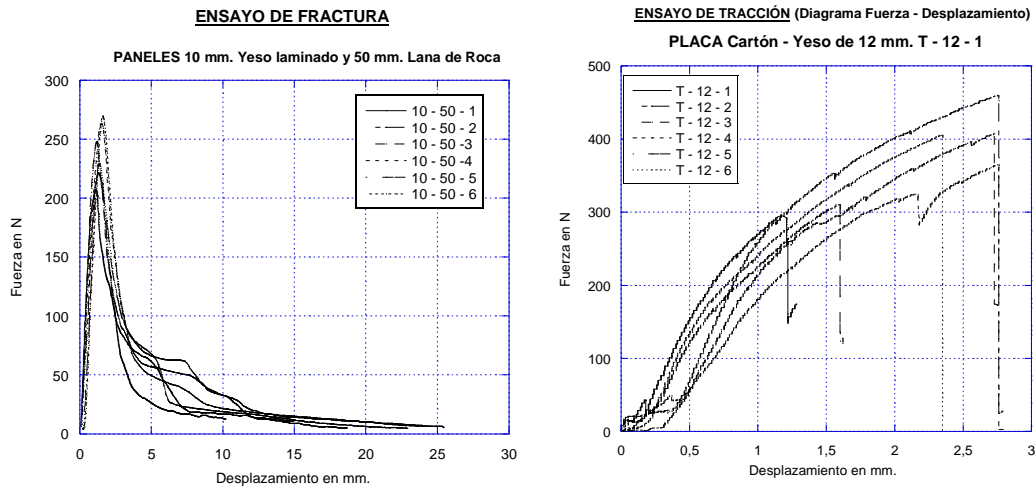


Fig 11 Curvas fuerza desplazamiento experimentales

La resistencia 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 a flexión en modo I (fig 2)

$$\sigma = \frac{f_{\text{máx}}}{t} = \frac{f_{\text{máx}}}{24} \quad (2)$$

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

$$E = \frac{B \cdot f_{\text{máx}}}{\cdot} \quad (3)$$

La (Tabla 2) muestra el resumen de los resultados obtenidos de los constituyentes del panel, y la(Tabla 3), los valores medios de los paneles.

CONSTITUYENTE	G _F en N/m		f _t en MPa		E en MPa	
	Medio	σ	Medio	σ	Medio	σ
YESO LAMINADO	463,16	33,52	1,55	0,22	348,33	64,09
LANA DE ROCA	157,12	31,56	0,085	0,009	98,63	26,63
YESO	17,11	5,10	0,50	0,26	--	--
PAPEL	1.024,67	73,60	10,28	0,60	27,7	11,27

Tabla 2 Resultados de los constituyentes del panel

PANEL	G_F en N/m		f_t en MPa		E en MPa	
	Medio	σ	Medio	σ	Medio	σ
10 – 50 – 10	436,93	80,01	1,08	0,19	140,91	9,20
10 – 60 – 10	919,66	142,54	1,17	0,14	113,82	13,62
12 – 50 – 12	463,30	128,49	1,13	0,24	125,80	11,35
12 – 60 – 12	548,15	118,31	1,01	0,09	106,54	20,14

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

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

PANEL	SENTIDO	G_F en N/m		f_t en MPa	
		Medio	σ	Medio	σ
10 – 50 – 10	LONGITUD.	436,93	80,01	1,08	0,19
	TRANSV.	326,56	28,42	1,23	0,07
12 – 60 – 12	LONGITUD.	548,15	118,31	1,01	0,09
	TRANSV.	612,16 ^(*)	300,13	1,06	0,07

Tabla 4 Valores medios de los paneles en sentido longitudinal y transversal

PANEL	SENTIDO	E en MPa	
		Medio	σ
10 – 50 – 10	LONGITUD.	98,63	26,63
	TRANSV.	79,80	2,00

Tabla 5 Valores medios de la lana de roca sentido longitudinal y transversal

Tal y como se podría esperar, por el sistema de fabricación de la lana de roca, donde se depositan de manera aleatoria las fibras, pero con una cierta orientación hacia el sentido de fabricación (Tablas 4 y 5), ni el panel ni la lana de roca son transversalmente isótropas.

4.- Conclusiones

En lo que respecta a los paneles, se observa en primer lugar, que la energía de fractura está muy condicionada por el espesor de la lana de roca, y no por el espesor de la placa de yeso laminado. Esto se debe a la composición de la lana de roca, formada por fibras aglomeradas, lo que genera un gran número de micro fisuras, lo que obliga a aumentar la energía necesaria para el avance de la fisura.

Este mismo proceso se repite en la placa de yeso laminado, donde los valores de la energía de fractura del yeso son dos órdenes de magnitud superiores al yeso. 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.

Por último, con una caracterización de las propiedades de cada uno de los componentes por separado, puede simularse el comportamiento conjunto del panel en fractura, mediante el modelo de elementos finitos adoptado en este trabajo, con un buen ajuste. Este resultado permite extrapolar los resultados de laboratorio al estudio de los paneles de otros espesores y dimensiones, así como al de particiones fabricadas “in situ” al tener caracterizado sus componentes.

Bibliografía

Mercedes del Río Merino, Jaime Santa Cruz Astorqui. Finite element simulation to design constructive elements an application to Light gypsum plaster for partitions. *Construction and Building Materials*. (Vol 23 pag 14 – 27, 2009).

Sancho JM, Planas J, Gálvez JC, Reyes E, Cendón DA. An embedded crack model for finite elements análisis of mixed mode fracture of concrete. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* (Vol 29, pag 1056 – 1065, 2006)

Hillerborg A, Modeer M, Petersson P. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cem Concr Res* (Vol 6, pag 773 – 782, 1976)

Jaime C. Gálvez, David A. Cendón. Simulación de la fractura en modo mixto. *Rev. Int. Mét. Num, Calc. Dis. Ing.* (Vol 18, pag 31 – 58, 2002).

M. Xie and W. Gerstle. Energy-based cohesive crack propagation modeling. *Journal of Engineering Mechanics*. (Vol 121, pag 1349 – 1358, 1995)

RILEM, 50 – FMC Committee Fracture Mechanics of Concrete. “Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three – point bend test of notched beams”. *Matériaux et Constructions*. (Vol 18, pag 285 – 290, 1986).

Z.P. Bažant y J. Planas. “Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials”. *CRC Press* (1998)

Código Técnico de la Edificación. Documentos Básicos: DB – Seguridad Estructural, DB – Acciones en la Edificación. *Ministerio de la Vivienda*. (2006).

Catálogo de Elementos Constructivos del CTE. *Ministerio de la Vivienda – C.S.I.C (Instituto Eduardo Torroja)*. (2008)

M. Elices. “Mecánica de la Fractura aplicada a sólidos bidimensionales”. *E.T.S.I. Caminos Canales y Puertos. UPM*. (1998).