

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA INCORPORACIÓN DE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN PANELES DE ESCAYOLA PARA ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA MEDIANTE CALOR LATENTE.

MECHANICAL CHARACTERIZATION OF PCM INCLUSION IN GYPSUM BOARDS FOR THERMAL ENERGY STORAGE THROUGH LATENT HEAT

Departamento: Construcción y Tecnología Arquitectónicas. E.T.S. Arquitectura de Madrid

Autores: Alicia Oliver Ramírez, Alfonso García Santos, F. Javier Neila

RESUMEN

En esta investigación se ha diseñado y fabricado un panel de escayola que incorpora un 45 % en peso de material de cambio de fase, manteniendo las propiedades físicas y mecánicas exigidas en la normativa. Así, un panel de 1,0 m² y 1,5 cm de espesor, contiene 4,75 kg de PCM, cantidad muy superior a la conseguida hasta la fecha (3 kg por m² de panel, o un 26% en peso) Para ello se ha mejorado previamente sus prestaciones mecánicas y físicas mediante adiciones binarias: fibras de polipropileno y dispersión de melamina formaldehído. Este porcentaje, es capaz de almacenar en 1,5 cm de espesor, 5 veces la energía térmica de un panel de cartón yeso con el mismo espesor, y la misma cantidad que ½ pie de fábrica ladrillo hueco sencillo, en el rango de temperaturas próximas a la de confort (20-30°C).

Se ha elegido la escayola como material más adecuado para desarrollar un nuevo producto de construcción

combinado con estos materiales de cambio de fase –por su disponibilidad, profusa utilización en el campo de la edificación y bajo coste.

Experimentalmente se han combinado los agregados entre sí, variando las proporciones para obtener diferentes compuestos, los cuales se han ensayado para conocer sus propiedades: físicas –densidad, porosidad, higroscopicidad, resistencia a fuego, durabilidad...; mecánicas –dureza, resistencia, flexibilidad,...-; estéticas, etc. Se han comparado los resultados obtenidos para obtener un modelo de comportamiento conjunto que sirva para prever las características de los diversos compuestos constituidos por estos agregados.

Se ha elegido la combinación más adecuada para desarrollar constructivamente por la idoneidad de sus características: físicas, mecánicas y térmicas.

ABSTRACT

In this research a gypsum board, including a 44.5% in weight of phase change materials (PCM), has been designed and manufactured, maintaining the mechanical and physical properties required by the regulations in force. So a 1.5 cm board contents 4.75 kg of PCM per square meter. This quantity is much higher than the one achieved to date (3 kg per square meter, or a 26% in weight) It has been improved previously mechanical end physically by incorporating polypropylene fibers and melamine formaldehyde as fluidificant. This board is able to store 5 times the thermal energy of a current gypsum board -with the same thickness-, and the same amount to 12 cm brick layer, in the comfort temperature range (20-30 °C).

Gypsum has been chosen as the most suitable material to develop developing a new construction product combined

with PCM for its availability, profuse use in construction and low cost.

Experimentally different aggregates have been combined varying the proportions to get different compound materials, which have been tested to evaluate their properties: physical -density, porosity, hygroscopicity, durability ... -; mechanical -toughness, endurance, flexibility, -; aesthetic, and so on. There have been compared the results to get a whole behavior pattern to predict the characteristics of different compounds made from these aggregates.

The most suitable combination has been chosen to develop a constructive system according to the adequacy of its features: physical, mechanical and thermal.

1. ANTECEDENTES

Se ha elegido el yeso como material más adecuado para desarrollar un nuevo producto de construcción por su disponibilidad, profusa utilización en el campo de la edificación y bajo coste.

Esta línea de investigación se inició, en el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónica de la E.T.S.A.M., por A. García. Santos en cuya Tesis caracterizaba el comportamiento mecánico del yeso reforzado con polímeros sintéticos. (1988)

En esta línea se han publicado trabajos sobre "Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos". Informes de la Construcción (1988); "Estudio del comportamiento dipolar de las adiciones poliméricas combinadas de fibras y dispersiones, con efectos sinérgicos en los materiales compuestos de matriz conglomerada hidráulica" (1999); "Proyecto de desarrollo y caracterización de material compuesto de yeso y escayola, para revestimientos y paneles prefabricados para divisiones interiores" dentro del Programa PROFIT 2000 o "Caracterización de compuestos de escayola reforzados, en relación con el tipo de refuerzo y la relación A/Y". Informes de la Construcción" (2004).

Respecto a los materiales de cambio de fase y su integración en materiales de construcción se han publicado diversos trabajos en el ámbito internacional desde inicios de los años 80 (hormigón, yeso, cerámica, vidrio,...) En España se ha realizado una investigación basada en la incorporación de estos materiales en módulos prefabricados de hormigón (Zalba, Cabeza 2004), y se está investigando en la integración de PCM en ladrillo perforado (Instituto del Frío).

Comercialmente existe un producto basado en la incorporación de PCM a paneles de cartón yeso (Smart Board, de BASF) que incorpora un 26% en peso del material, es decir, 3 kg/ m² de panel, con 1,5 cm de espesor.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

MATERIALES COMPUESTOS

Un material compuesto es un producto formado por varios componentes con las siguientes propiedades.

- Están formados de 2 o más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente.
- Presentan varias fases químicamente distintas, (no forman sistema: ante variaciones cuantitativas de las fases aparecen variaciones cuantitativas de las propiedades). Éstas son completamente insolubles entre sí – aunque separables por medios físicos- y separadas por una intercara.
- Sus propiedades mecánicas pueden ser superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes produciendo los denominados efectos sinérgicos.
- Sus componentes deben ser compatibles; teniendo diferente forma y siendo separables por medios físicos.

Cuando sus componentes son muy diferentes hablamos de:

- **Fase matriz** o simplemente matriz: tiene carácter continuo y es la responsable de las propiedades físicas y químicas. Transmite los esfuerzos al agente reforzante. También lo protege y da cohesión al material.
- **Agente reforzante**: es una fase de carácter discreto y su geometría es fundamental la hora de definir las propiedades mecánicas del material.

Las limitaciones de estos materiales son las dificultades en la fabricación, las incompatibilidades entre materiales y el elevado coste.

Los materiales compuestos se pueden dividir en:

- **Materiales Compuestos reforzados con partículas**: un material duro y frágil dispersas discreta y uniformemente, rodeadas por una matriz más blanda y dúctil.

En el caso del yeso, se utilizan **plastificantes** o **fluidificantes**, que disminuyen la cantidad de agua necesaria para el amasado, y por tanto reduce su porosidad interna y capilaridad, aumentando la compactación, es decir, la reducción en la separación entre cristales. Además contribuyen a la homogenización del material, en el reparto de cargas.

- **Materiales Compuestos reforzados con fibras**: que en caso de ser plásticas poseen macromoléculas presentan directriz lineal que facilite el proceso de transformación. En estos compuestos la matriz envuelve y liga las fibras, transfiriendo la carga de las fibras rotas a las intactas y entre las que no están alineadas con las

líneas de tensión. También evita el pandeo de las fibras por compresión.

Si el agregado está dispersado o granulado, se conseguirá un material isótropo. Por el contrario, el relleno puede tener una estructura localizada: *armado*: (unidireccional), *tejido* (bidireccional)

También puede ser un agregado de refuerzo a través de fibrado aleatorio: fibra larga (rotura a tracción), fibra corta (rotura por adherencia)

Las fibras (responsables de las propiedades mecánicas) sirven para resistir la tracción, la matriz (responsable de las propiedades físicas y químicas) para resistir las deformaciones, y todos los materiales presentes sirven para resistir la compresión, incluyendo cualquier agregado.

La resistencia del material reforzado frente a la tensión es el resultado de un **efecto sinérgico entre la fibra y matriz**, debido a la complementariedad entre las propiedades de ambas y la compatibilidad necesaria para permitir el trabajo conjunto. Por ello es necesario realizar un análisis de compatibilidad en función del contacto que se establece entre sus superficies de todos los componentes de un material reforzado.

COMPORTAMIENTO CONJUNTO

El comportamiento conjunto de los materiales compuestos depende tanto de las propiedades intrínsecas de cada agregado, del estado físico que posean en el momento de producirse la agregación, como de las relaciones que se establezcan entre ellos, fundamentando los fenómenos de adherencia en base a las tensiones superficiales de los agregados, producidas por la energía superficial de los límites de cada fase existente, en función de la superficie de cada elemento constitutivo.

En cuanto la **relación físico-mecánica** de los componentes del compuesto es importante tener en cuenta:

- En la superficie de una fase existe una resultante de las fuerzas que actúan sobre una molécula, tendente a empujarla perpendicularmente hacia el interior debido a la ausencia de equilibrio de fuerzas, intentando la fase asumir la forma que presente menor área.
- Esta energía puede ser cuantificable, aportando energía calorífica hasta producir el cambio de estado de las moléculas superficiales. En valor absoluto coincide con la tensión superficial, ya que las superficies actúan como si una fuerza estuviera siendo ejercida tangencialmente a ellas, o como si existiera una capa superficial comprimida en la superficie de la fase que produjera su minimización.
- Cuando un líquido y un sólido insoluble se ponen en contacto, las moléculas de ambas fases se atraen a lo largo de toda la superficie de contacto,- fuerzas de adhesión- siendo contrarrestada por las fuerzas de cohesión interna. En función de la diferencia de tensiones superficiales, se producirá una mayor o menor *bañabilidad* de un cuerpo sobre otro. Este efecto está relacionado con la sustitución de los posibles enlaces superficiales que el sólido posea y con la adhesión específica entre fases.
- Cuando se produce una solución con varios tipos de moléculas que poseen diferentes estados cohesivos, aquéllas de menor energía cohesiva serán expulsadas hacia la superficie, disminuyendo la energía superficial de ésta. Esta tendencia a contraerse es conocida como *efecto Gibbs*.

- Las adiciones modifican el estado de energía superficial, denominándose sustancias *tensoactivas*.
- Las fibras absorben las tensiones internas que se generen en el interior de un material diferenciándose su comportamiento según sean las características de la matriz (elástica o frágil)
- Aunque existe una gran documentación sobre los efectos de los polímeros sintéticos como aditivos con efectos fluidificantes sobre morteros pastas y hormigones, y sobre los efectos mecánicos que producen las fibras de polímeros sintéticos, no ocurre lo mismo sobre los efectos que sinérgicamente produce el comportamiento conjunto de ambos aditivos y menos aún con la escayola.

3. ENSAYOS

Condiciones de los Ensayos: Según la EN 13279.2, para una correcta ejecución de los ensayos las condiciones han de cumplir las siguientes especificaciones:

- Temperatura de laboratorio = $20^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$
- Humedad relativa > 65%
- Materiales y herramientas para la fabricación de probetas estancas serán impermeables y resistentes al Ca_2SO_4
- Materiales y herramientas de realización de ensayos estarán limpios.

Materiales utilizados:

- Matriz: Escayola E.30.L, "La Maruxiña". Dosificación: Sacos de 30 kg
- Fibras: Polipropileno (25 mm y 7 deniers), "Propilan". Dosificación: Sacos de 15 kg
- Dispersión: Policondensado de melamina-formaldehído, "Bettor", Melment L-10. Dosificación: Recipiente de 20 l
- Material de cambio de fase: Micronal DS 5001X. Dosificación: Sacos de 15 kg

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS CON PROBETAS

LETRAS GRIEGAS		
ρ	Densidad	[Kg/m ³]
σ	Tensión	[MPa]
UNIDADES		
L	Longitud	[m]
m	Masa	[kg]
q	carga	kN
t	Tiempo	[s]

ABREVIATURAS

A	Agua
D	Dispersión (Melamina Formaldehído)
F	Fibra (polipropileno)
G	Gel, material de cambio de fase
PCM	Phase Change Material, material de cambio de fase
PR	Probeta
Y	yeso

Ejemplo de nomenclatura de las probetas

100Y-90A-4F-5D-80G, posee 100% de Yeso, 90% de Agua, 4% de Fibra, 5% de Dispersión, y 80% de PCM, en proporciones relativas a la cantidad de yeso, que se toma como 100%.

Así para hacer esta muestra, si ponemos por ejemplo 1000 g de yeso, necesitaríamos, 900 g de agua, 40 g de fibra, 50 g de dispersión, y 800 g de PCM.

ENSAYOS MECÁNICOS

DUREZA SHORE C

Las gráficas de Dureza Shore C, tienen forma parabólica con una pendiente más acusada en el primer tramo, que va suavizándose paulatinamente hasta llegar a ser 0 prácticamente a con dosis de PCM superiores al 80%

Esta cierta complejidad en la formulación del comportamiento de las muestras en lo que a dureza shore C se refiere, es debida a la participación de varios agentes –las distintas adiciones de la mezcla- y a las diferentes relaciones intrínsecas que se producen entre ellos en las distintas dosificaciones de las muestras.

Así se puede decir que:

- El aumento de la cantidad de **PCM disminuye de la dureza superficial** del compuesto.

Así para la serie 100Y-70A-2F-0,5D, la dureza Shore C inicial –con 0 % de PCM- es de 73,3 ud., que correspondería al 100% de su resistencia. Con el 30 % de PCM, disminuye ligeramente hasta un 75,76 %, con el 40% baja hasta el 71,7%.

Para la serie 100Y-70A-2F-1D, la dureza Shore C inicial –con 0 % de PCM- es de 68 ud. Con el 30 % de PCM, disminuye ligeramente hasta un 80,05 %, con el 50 % baja hasta el 71,07%.

En la serie 100Y-100A-3,5F-4D, la dureza Shore C inicial –con 0 % de PCM- es de 80 ud. Con el 80 % de PCM, disminuye ligeramente hasta un 73,78 %, con el 100 % baja hasta el 72,43%.

- La adición de fibra y dispersión a la mezcla mejora la dureza superficial del conjunto.

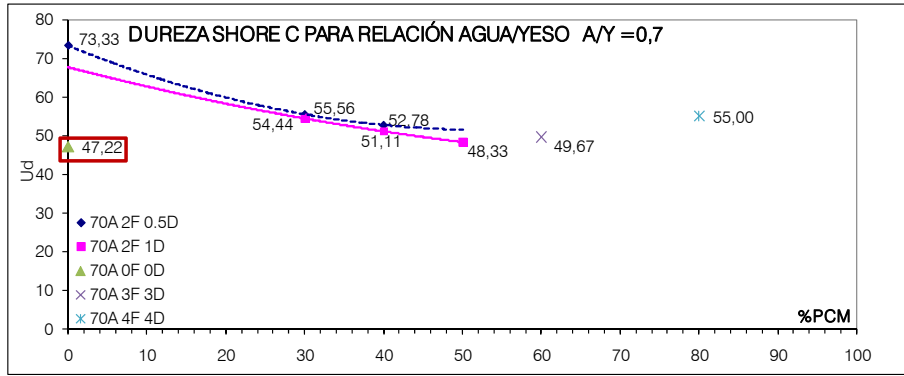
- La mayor proporción de fibra y dispersión en la mezcla, suaviza la reducción del valor de dureza Shore C, que se produce con el aumento de proporción de PCM.

- La mayor proporción de agua disminuye la dureza superficial.

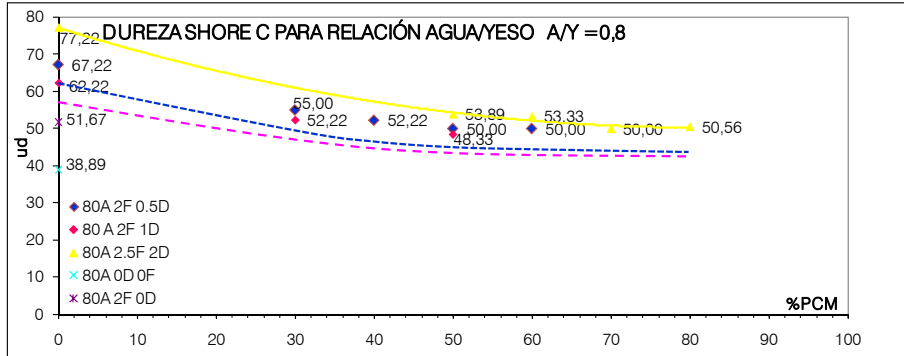
- Este es el caso de la mezcla 100Y- x A- 2F-0,5D-0G, en la que para una relación A/Y = 0,7 (x=0,7), su dureza Shore C es de 72,3 ud, o la 100Y- x A- 2F-1D-30G, en la que para un 70 % de agua se obtienen valores de 59,67 ud, ligeramente superiores a las que contienen un 80 %, y éstas a su vez superiores a las que cuentan con un 90 % de agua. De ello se puede obtener la siguiente conclusión:

- La norma UNE 102-039 "Yesos y escayolas de construcción", establece que la dureza Shore C, para una muestra de yeso sin adiciones, debería ser superior a 45 ud. dependiendo de la densidad del yeso, debiendo ser esta superior cuanto más denso sea aquel.

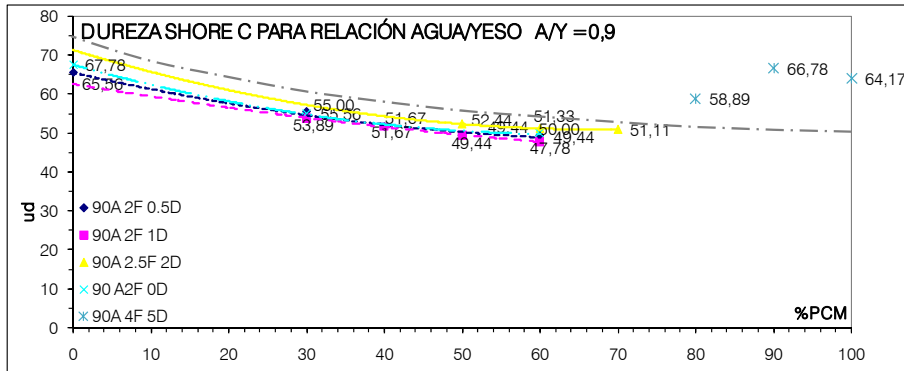
- Así podemos decir que los valores obtenidos con las adiciones binarias, incluso con la incorporación de cantidades elevadas de PCM (80-100%), están por encima de los resultados exigidos por la normativa. Muestra es de ello las 52.78 ud de dureza Shore C obtenida en la muestra 100Y-80A-2F-1D-80G, o 56,11ud en la mezcla 100A-3.5F-4D-100G, con un 100% de PCM.



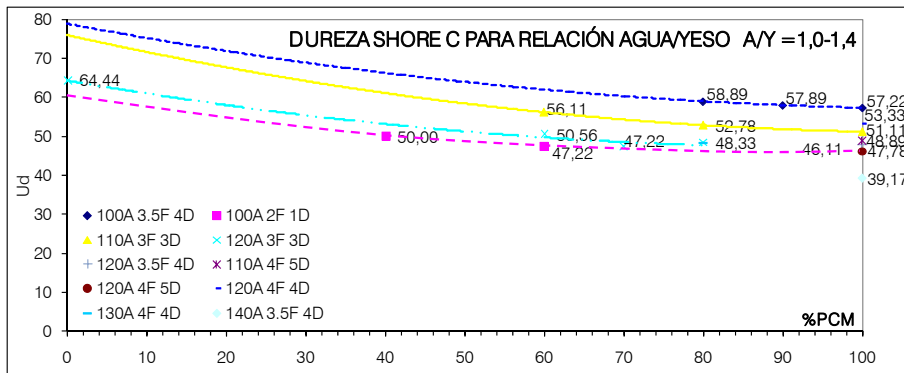
Gráfica 4-1 Dureza Shore C con 70% de agua



Gráfica 4-2 Dureza Shore C con 80% de agua



Gráfica 4-3 Dureza Shore C con 90% de agua



Gráfica 4-4 Dureza Shore C con 100-140% de agua

RESISTENCIA A FLEXIÓN:

En el resultados obtenidos en los ensayos para la muestra patrón, se ha alcanzado un valor medio de **4,78 MPa superior al valor mínimo recomendado** por la norma EN 13279, que establece 1 MPa, para los yesos de construcción, y 3 MPa para los yesos con fibras.

Las muestras que incorporan fibra en un 2% y dispersión en un 0,5%, como las de la siguiente tabla, mejoran hasta 1,5 veces los resultados, debido al trabajo de las fibras y de la dispersión, así como una reducción paulatina en relación a la cantidad de agua aportada.

Y	A	F	D	G	$\sigma_{flexión}$
100	70	2	0,5	0	7,27

100	80	2	0,5	0	6,40
100	90	2	0,5	0	5,75

Se puede enunciar así unas líneas generales de comportamiento:

- Las fibras mejoran considerablemente el comportamiento físico-mecánico de la matriz.
- La dispersión –fluidificante- mejora el comportamiento del conjunto.

Esto coincide con lo aportado en investigaciones anteriores (García-Santos 88), y se debe en primer lugar a que:

- La matriz mantiene unidas las fibras, protege su superficie durante la fabricación y manipulación del compuesto, y transmite el esfuerzo a las fibras por adherencia o fricción.
- Se produce una adherencia mutua entre los diferentes elementos del compuesto gracias a las fuerzas electrostáticas que se generan entre la estructura cristalina de los diversos componentes de la escayola y la estructura molecular de las fibras de polipropileno, así como por la relación física de tamaños entre la fibra y la estructura cristalina de la escayola hidratada.
- Se produce una deformación armónica bajo carga, relacionada con los sistemas estructurales de absorción de energía, con la adherencia mutua entre componentes del material reforzado, con el acoplamiento de cristales de la escayola, con la deformación de los cristales de la escayola y con la deformación intrínseca de las fibras de polipropileno.

El segundo punto se explica por un aumento de la cohesión intercrystalina, es decir:

- Se modifica la estructura de la escayola y su comportamiento intrínseco, al actuar estas fuerzas electrostáticas desde el inicio del proceso de hidratación de los componentes de la escayola y durante el crecimiento cristalino.
- Aumenta la superficie de contacto de los agregados cristalinos de la escayola al disminuir la porosidad interna –las fibras y la dispersión rellenan los huecos intersticiales entre las partículas de escayola-, lo que eleva las resistencias mecánicas.

Para mejorar las prestaciones mecánicas ha sido necesario un trabajo previo de activación de las fibras para mejorar la adherencia electrostática del resto de los elementos, así como un proceso de amasado y mezcla de los diferentes materiales del compuesto en aras de conseguir una

distribución adecuada de los agregados fibrosos y garantizar una especialización de la absorción de tensiones internas: tracción para las fibras y compresión para el agregado cristalino de la escayola.

Si se observan las gráficas y las líneas de tendencia, se puede apreciar su carácter parabólico, que muestra al principio un rápido descenso –al entrar los PCM en el juego- para suavizar esta tendencia, estabilizando su resistencia a flexión a partir de un porcentaje de PCM, que varía en función de las proporciones del resto de los agregados.

- El aumento de la cantidad de PCM supone una disminución de la resistencia a compresión

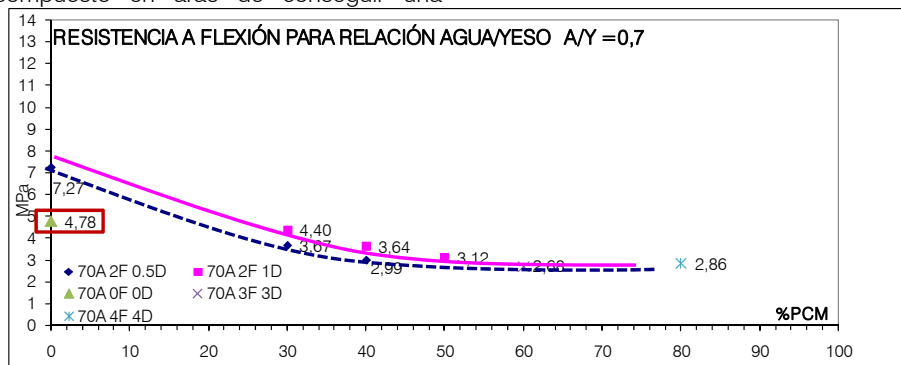
Se puede observar que las series que contienen más cantidad de fibra tienen un comportamiento más lineal, es decir, no existe un tramo inicial en el que la inclusión de PCM en el conjunto baje significativamente los valores de resistencia a flexión. Ello se debe a la adherencia mutua que se produce éstas y los diferentes elementos del compuesto así como por la relación física de tamaños entre la fibra -25 mm- y la estructura cristalina del compuesto, contrarrestando el efecto de los PCM.

Para cantidades de PCM de 80%, se obtienen unos valores próximos a 3 MPa, gracias a la adición de fibras y dispersión hasta en 4% y 5% respectivamente, como se observa en la siguiente tabla comparativa.

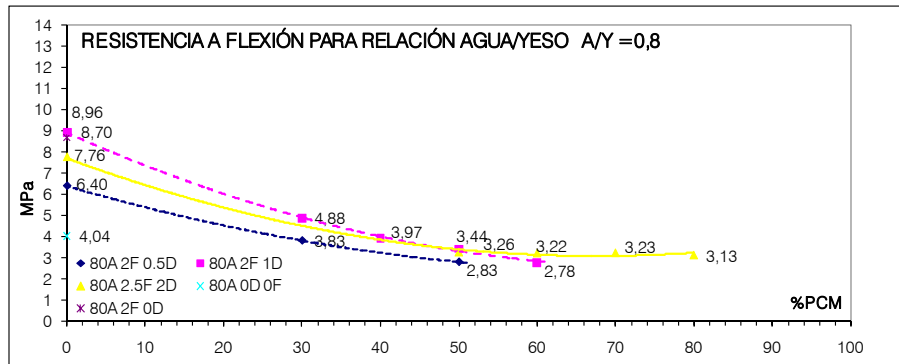
Y	A	F	D	G	$\sigma_{flexión}$
100	90	3,5	4	80	2,64
100	90	4	5	80	2,5

Con todo ello, se puede afirmar que todas las muestras realizadas durante la fase experimental –incluso las que contienen un 100% de PCM- superan la capacidad de resistencia a flexión de los valores, que según la UNE EN 13279, que establece 1 MPa, para los yesos de construcción. Se podrían utilizar dosificaciones con hasta un 80% de PCM, para realizar trabajos de yeso con fibras.

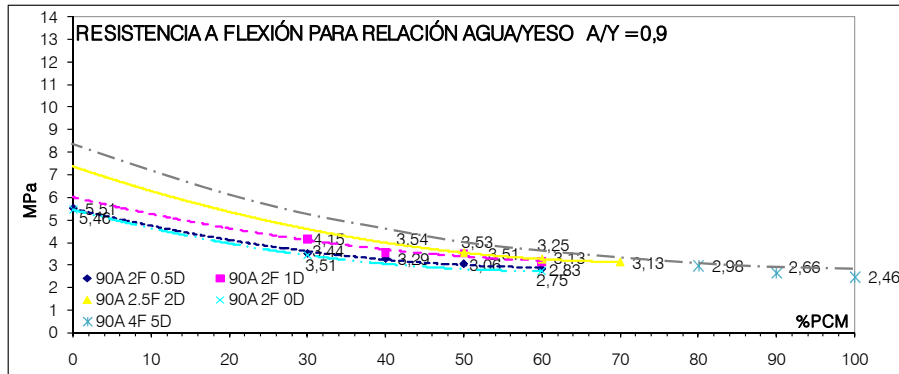
Para conocer con precisión como influyen por separado cada una de las adiciones sería necesario realizar más probetas, en las que participase cada una por separado con la escayola, y otras con adiciones dos a dos, para ver cómo interactúan entre sí en conjunto e individualmente. Con ello se obtendría un análisis del comportamiento tensión – deformación- plastificación-rotura del compuesto en aras de optimizar las cantidades de cada agregado.



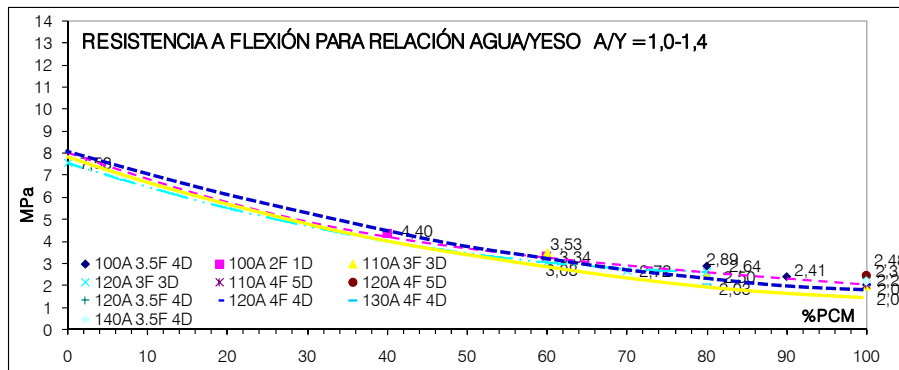
Gráfica 4-5 Resistencia a Flexión con 70% de agua



Gráfica 4-6 Resistencia a Flexión con 80% de agua



Gráfica 4-7 Resistencia a Flexión con 90% de agua



Gráfica 4-8 Resistencia a Flexión con 100-140% de agua

Para el ensayo de placas se ha considerado más interesante seguir las instrucciones del Pliego de Recepción de Yesos que –aunque está derogado- es el único que fija para la escayola tipo E-30 –material con el que he trabajado en el Laboratorio- una resistencia mínima a flexión y es referencia de muchos trabajos de investigación en este campo.

Sería posible fabricar industrialmente placas de yeso laminado, en cuyo caso la normativa de aplicación sería la UNE 520 –en vigor desde marzo de 2007- que recomienda para las placas de yeso laminado del tipo A-D-E-F-H-I, con un espesor nominal de 9,5 mm, una carga de rotura en sentido transversal de 160 N, y 400 N en sentido longitudinal. Para las del tipo R (de resistencia mejorada), 300 y 725 N respectivamente, y 125 N-180 N para las del tipo P (placa base de yeso).

TENSIÓN A COMPRESIÓN

En los ensayos de resistencia a compresión, el valor obtenido para la probeta de referencia (100Y-70A-0F-0D-0G) ha sido 10,76 MPa.

Y	A	F	D	G	$\sigma_{compresión}$
100	70	0	0	0	10,76

Tomando como referencia las exigencias mecánicas a compresión establecidas por la EN 13279 para los yesos de construcción, de 2 MPa, se puede apreciar que las prestaciones mecánicas de la probeta base superan con creces este valor, con lo que existe un gran margen para añadir otros agregados –en este caso, material de cambio de fase-, respetando los valores recomendados por la norma.

Este valor inicial, aumenta al añadir más dispersión, y disminuye con la mayor cantidad de agua, aunque existen unas proporciones entre los distintos elementos para las cuales se mejora la resistencia a compresión, fuera de las cuales disminuyen las prestaciones.

Y	A	F	D	G	$\sigma_{compresión}$
100	70	2	0,5	0	8,21
100	80	2	0,5	0	5,01
100	90	2	0,5	0	5,18

Al añadir PCM al conjunto, nos da los siguientes valores:

Y	A	F	D	G	$\sigma_{compresión}$
100	80	2	0,5	30	3,93
100	90	2	0,5	30	3,19

Un ligero incremento en la dispersión, hasta 1% mejora los resultados, para iguales proporciones del resto de los elementos.

Existen unas proporciones entre los distintos elementos para las cuales se mejora la resistencia a compresión, fuera de las cuales disminuyen las prestaciones. No es posible determinarlas con los ensayos realizados, y sería necesario realizar una investigación particularizada en determinar cual es el efecto específico que produce cada adición, y como afecta a los resultados de resistencia a compresión.

En este caso las líneas de tendencia que se obtienen de las gráficas son también polinómicas, lo que indica que todos los elementos integrantes del compuesto influyen en los resultados del ensayo. Las parábolas de las curvas son muy abiertas, casi tendentes a rectas y convergen en unos valores comunes a medida que se incremente la proporción de PCM.

Se observa como la adición de porcentajes más elevados de PCM al conjunto, la reducción de la resistencia a compresión es menor, donde la curva es casi paralela al eje X.

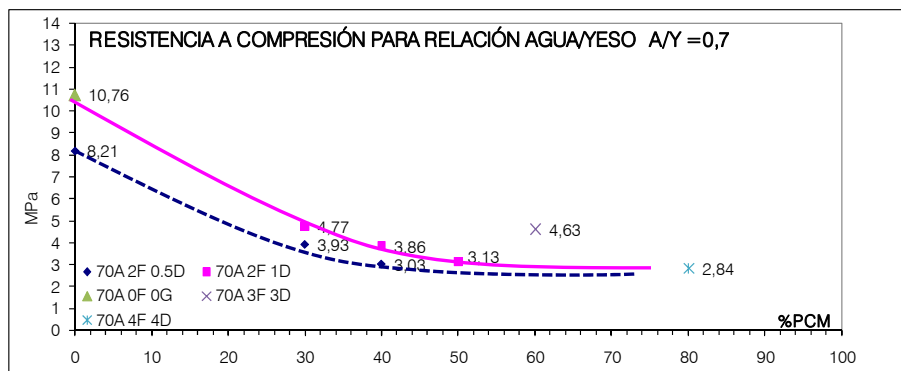
Así por ejemplo en las series que tienen un 80% de PCM, se obtienen valores a compresión de más de 2,5 MPa, que se mejoran ligeramente cuanto más fibra tienen y disminuyen cuanto mayor es la proporción de agua en el compuesto.

En las series que contienen un 100% de PCM, este valor desciende hasta 2,21 MPa.

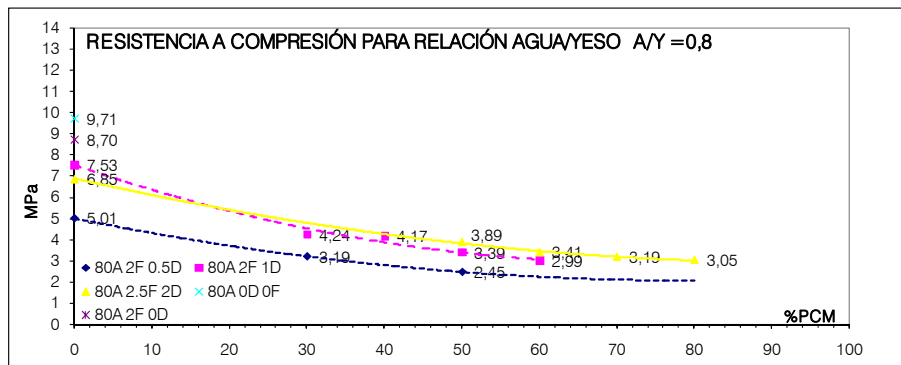
Todos estos valores son superiores a los exigidos por la norma.

La UNE EN 13279 exige al menos 2 MPa, por lo que **todas las muestras realizadas serían válidas para trabajos en construcción.**

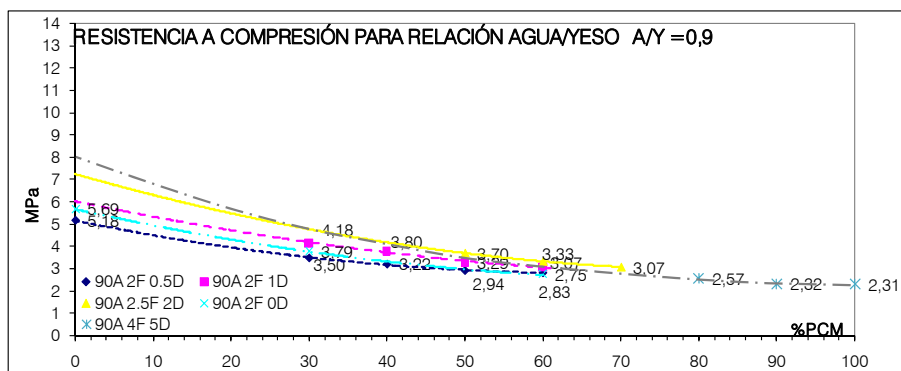
- El aumento de la cantidad de PCM, así como de agua supone una disminución de la resistencia a compresión.
- La adición de fibras y dispersión mejora la capacidad mecánica a compresión del compuesto.



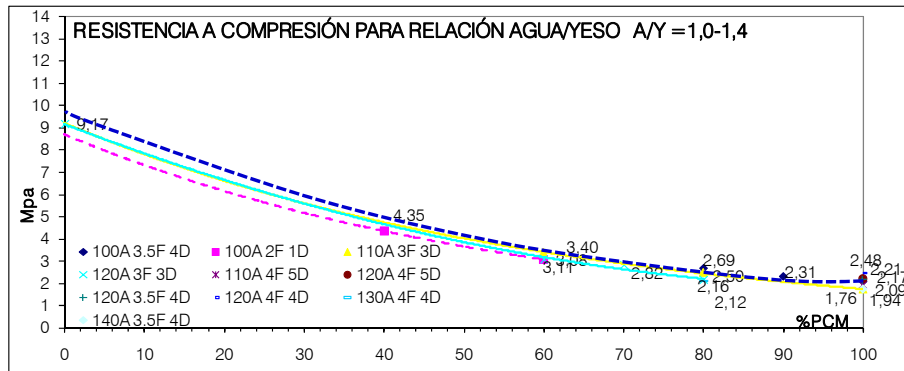
Gráfica 4-9 Resistencia a Compresión con 70% de agua



Gráfica 4-10 Resistencia a Compresión con 80% de agua



Gráfica 4-11 Resistencia a Compresión con 90% de agua



Gráfica 4-12 Resistencia a Compresión con 100-140% de agua

ANÁLISIS DE LAS LÍNEAS DE ROTURA

De entre todas las muestras realizadas y ensayadas en el laboratorio se va a exponer el análisis de las líneas de rotura de la probeta 100Y 100A 3.5F 4D 80G, por ser la propuesta para industrializar, con lo cual la documentación gráfica aportada, es más relevante, si cabe que en el resto de probetas.

ACABADO

Esta muestra, que contiene un porcentaje elevado de PCM y de fibras, aunque también mayor proporción de agua y dispersión, nos revela ciertos signos de pérdida de trabajabilidad. Para estas dosis de agregados, sería recomendable utilizar medios mecánicos, que faciliten el amasado de los elementos, y una distribución más homogénea de éstos en el compuesto final.

Superficialmente, presenta un aspecto algo rugoso, por lo que quizás necesitaría una capa fina de acabado de escayola, que le devolviese una imagen más lisa y uniforme, para poder utilizarse como elemento de acabado interior de un edificio.

Los bordes presentan cierta disgregación, debida a una insuficiente distribución del agua en esas zonas, que han dejado el conglomerante apenas mezclado con la fibra, por lo que no se ha producido todo el proceso de cristalización de la molécula de semihidrato.

Conserva la definición de aristas y planitud de las caras, por lo que sería recomendable para fabricar placas, tabiques y piezas de pequeño y gran formato.

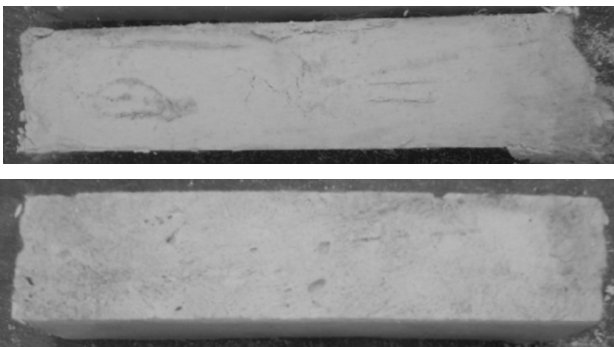


Figura 4-13 Aspecto visual de las probetas tras el secado. Cara anterior y posterior

La parte posterior, presenta algunas pequeñas irregularidades, lo que revela que la compactación de la masa, ha sido insuficiente. Para estas cantidades de residuo seco, en relación al agua, tan elevadas, deberían utilizarse medios mecánicos de compactación, que

permitiese que la masa, menos plástica, llegase a todas las esquinas.

ENSAYO A FLEXIÓN

En los resultados obtenidos aparecen fisuras en dos probetas, con algunas microfisuras superficiales, y algunas microfisuras en la probeta tres. Esto revela una distribución heterogénea de las fibras, por la dificultad de trabajar en el amasado.

Estos resultados son similares a los de las probetas sin dispersión, lo que hace suponer que se debería añadir más cantidad de ésta, no sólo para mejorar la trabajabilidad de la mezcla durante el amasado, y aumentar el tiempo de fraguado, sino para obtener una distribución más homogénea de las fibras, y recuperar el efecto sinérgico entre los diferentes agregados, y su trabajo en conjunto.

En las tres probetas coincide la línea de fisura, situadas entre -1 cm y +1 cm respecto del centro de la cara más larga.

La fisura de la probeta 1 supera la mitad del grosor de la pieza, mientras que la 2 y la 3 apenas llegan a éste.



Figura 4-14 Análisis de la rotura a flexión de las tres muestras

ENSAYO A COMPRESIÓN:

Al igual que en el caso anterior se observa la capacidad plástica de las probetas, es decir su capacidad de deformación, sin llegar a la rotura.

Presenta ciertas descamaciones o laminaciones superficiales, aunque no tantas como la anterior serie, debido a la disminución de la relación de fluidificante, que ha recortado su periodo de deformación plástica. Se detecta en este ensayo, una vez más, la necesidad de

aumentar la dosis de fluidificante, en pro de una mejora de las prestaciones físicas y mecánicas de la muestra.

Aparecen microfisuras junto a las huellas de la prensa de ensayo.

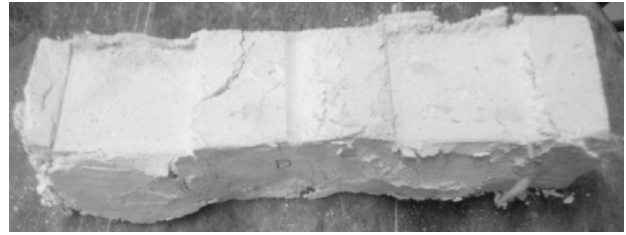


Figura 4-15 Imagen de una de las probetas tras el ensayo a compresión

ANÁLISIS DE LAS LÍNEAS DE ROTURA EN PLACAS:

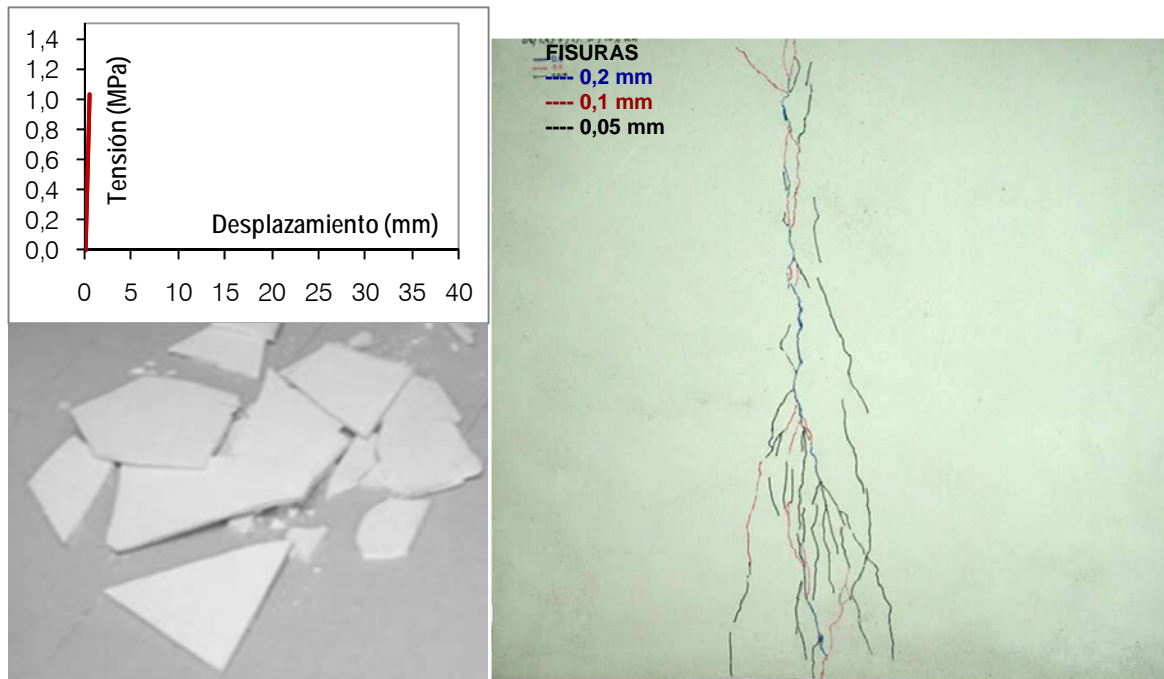


Figura 4-16 Comparación de la rotura de la placa de referencia (70A-100Y-0F-0D-0G) con la microfisuración producida en la placa (100A-100Y-3.5F-4D-80G) tras el ensayo a flexotracción en el laboratorio

5. CONCLUSIONES

DUREZA SHORE C:

- La adición de fibra y dispersión a la mezcla mejora la dureza superficial del conjunto.
- La mayor proporción de fibra y dispersión en la mezcla, suaviza la reducción del valor de dureza Shore C, que se produce con el aumento de proporción de PCM.
- La mayor proporción de agua disminuye la dureza superficial.
- El aumento de la cantidad de PCM disminuye de la dureza superficial del compuesto.

RESISTENCIA A FLEXIÓN:

- Las fibras mejoran el comportamiento físico-mecánico de la matriz.
- La resistencia de un material supone deformaciones más allá del límite elástico con aparición de agrietamiento y finalmente fallo total del mismo, y al igual que la rigidez, depende de las características de la matriz y el refuerzo, así como de la adhesión de la interfase, ya que a través de ella se transmiten los esfuerzos a la fibra.
- La dispersión –fluidificante- mejora el comportamiento del conjunto.

TENSIÓN A COMPRESIÓN

- La mayor proporción de agua disminuye la resistencia a compresión, aunque existen unas proporciones entre los distintos elementos para las cuales se mejora la resistencia a compresión, fuera de las cuales disminuyen las prestaciones.
- La adición de fibras y dispersión mejora la capacidad mecánica a compresión del compuesto, siendo su comportamiento más lineal, es decir, no existe un tramo inicial en el que la inclusión de PCM en el conjunto baje significativamente los valores de resistencia a flexión
- El aumento de la cantidad de PCM, así como de agua, supone una disminución de la resistencia a compresión. Siendo la reducción de la resistencia a compresión inferior en porcentajes elevados de PCM.
- La dificultad de obtener una mezcla totalmente homogénea afecta a la resistencia del material.

RELACIÓN ENTRE LOS AGREGADOS DEL COMPUESTO

- Se modifica la estructura de la escayola y su comportamiento intrínseco, al actuar fuerzas electrostáticas desde el inicio del proceso de hidratación de los componentes de la escayola y durante el crecimiento cristalino.
- Aumenta la superficie de contacto de los agregados cristalinos de la escayola al disminuir la porosidad interna

- las fibras y la dispersión rellenan los huecos intersticiales entre las partículas de escayola-, lo que eleva las resistencias mecánicas.
- La matriz mantiene unidas las fibras, protege su superficie durante la fabricación y manipulación del compuesto, y transmite el esfuerzo a las fibras por adherencia o fricción.
- Se produce una adherencia mutua entre los diferentes elementos del compuesto gracias a las fuerzas electrostáticas que se generan entre la estructura cristalina de los diversos componentes de la escayola y la estructura molecular de las fibras de polipropileno, así como por la relación física de tamaños entre la fibra y la estructura cristalina de la escayola hidratada.
- Si la adhesión es buena, aumenta la resistencia y la unión fibra-polímero dificulta la formación de huecos y por lo tanto su deformación. La deformación del material a rotura es controlada por la resistencia del propio material y por la adhesión fibra-matriz.
- Se produce una deformación armónica bajo carga, relacionada con los sistemas estructurales de absorción de energía, con la adherencia mutua entre componentes del material reforzado, con el acoplamiento de cristales de la escayola, con la deformación de los cristales de la escayola y con la deformación intrínseca de las fibras de polipropileno.

6. BIBLIOGRAFÍA

- A State-of-the-Art. Report. Smart Energy-Efficient Buildings Research Program at NTNU and SINTEF 2002-2006, Trondheim, December 2002,
- Abhat (1978). " Latent Heat Thermal Energy Storage in the Temperature range 20-80°C." (Bericht IKE 5-209, Institut für Kernenergetik und Energiesysteme, Universität Stuttgart).
- Abhat, A. (1983). "Low temperature latent heat thermal energy storage-Heat storage materials." Solar Energy 30(4).
- Antequera, P.; Jiménez, L.; Miravete, A.: "Los materiales compuestos de fibra de vidrio". Edit: secretariado de publicaciones. Zaragoza, 1991.
- Banu D, Feldman D, Haghghat F, Paris J, Hawes D. Energy storing wallboard—flammability tests. J Mater Civil Eng 1998;10(21):98–106;
- BASF. How Phase Changing Materials Work. .
- Egli, P.H. & Johnson, L.R. «The Art and Science of Growing Crystals». J.J.Gilman, Ed., Wiley, N.Y. 1963. Pág. 194.
- Energy For The Future: Renewable Fuentes Of Energy - White Paper for a Community Strategy and Action Plan 2003,
- Feldman D, Banu D, Hawes D, Ghanbari E. Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard. Sol Energy Mater 1991; 22:231–42,
- Feldman D., Banu D., Hawes D.W. 1994, Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard Centre for Building Studies, Concordia University, Canada
- Feldman, D., D. Banu, et al. (1995). "Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard." Solar Energy Materials and Solar Cells 36(2): 147-157,
- Feldman. D. "Polymeric Building Materials" (Elsevier, London, 1989),
- García Santos "Comportamiento mecánico de yeso reforzado con polímeros sintéticos", Informes de la Construcción, Vol. 40 N° 397. págs. 67-91. 1988.
- García Santos, "Caracterización de compuestos de escayola reforzados, en relación con el tipo de refuerzo y la relación a/y". Informes de la Construcción, Vol. 56, n° 493, septiembre-octubre 2004. Pg 19-31
- García Santos, A. "Apuntes de la asignatura Materiales de Construcción". Cursos 1999-2000-2001
- García Santos, A. "Los plásticos en la construcción (I) y (II)". Estructura y propiedades. "Cuadernos del Instituto Juan de Herrera". Madrid, 1999.
- Gunn, D.J. "Mechanism for the Formation and Growth of Ionic Precipitates from Aqueous Solution". 1976. Pág. 133-140.
- Gurney, R.W. "Ionic Processes in Solution". Mc. Graw Hill
- Hawes, D. W., D. Feldman, et al. (1993). "Latent heat storage in building materials." Energy and Buildings 20(1): 77-86,
- Houle, J.-F. (1991). Process for Incorporation of a Phase Change Material into Gypsum
- Ilston, J.M. Construction materials. London, 1994.
- International Energy Agency (IEA). Implementing Agreement (IA) on Energy Conservation through Energy Storage (ECES).
- Kaasinen, H. (1992). "The absorption of phase change substances into commonly used building materials."
- Krenchel, H. "Fibre Reinforcement". Akademisk Forlag, Copenhagen. 1964. Pág. 159.
- Kroschwitz J.I. "Polymers: Fibers and textiles". A. Compendium.Ed. John Wiley, New York. 1990.
- Kuntze, R.A. "Retardation of the Crystallisation of Calcium Sulphate Dehydrate". Nature n° 5047, vol. 211, 1966. Pág. 406- London. 1961.
- Martínez-Jiménez, A. "Los Tensoactivos en el Campo del Yeso". Hoecht Ibérica, S.A.1994
- Moillet, J.L.Collie, B. & BLACK, W. "Surface Activity". Spon
- Murat Pusztaszeri y Gremion. "Correlación entre la Estructura Cristalina y Propiedades Mecánicas de los Yesos Endurecidos". Rilem. Budapest 1974. Pág. 377-385.
- N.Y. 1953
- Peippo K., K. P., Lund P. D. (1991). A Multicomponent PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating. Energy and Building. 17: 259-270,
- Rudd, A. F. (1993). "Phase-change material wallboard for distributed thermal storage in buildings." ASHRAE Transactions 99(2): 339-46,
- Salyer, I. O. (1998). Building Products Incorporating Phase Change Materials and Method of making them. US. 5,755,216,
- Sanders, B.A. "Short Fiber Reinforced Composite Materials" ASTM, 1982.
- Šarlah A. - Stritih U. - Medved S. The Role Of PCMs On Thermal Storage For Panel Heating – Time Dependance Of Temperatures Within The Wall. University of Ljubljana - Faculty of Mechanical Engineering
- Scalat S, Banu D, Hawes D, Paris J, Haghghata F, Feldman D. Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard. Sol Energy Mater Sol Cells 1996; 44(1):49–61,
- Schossig, P., H. M. Henning, et al. (2005). "Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials." Solar Energy Materials & Solar Cells 89: 297-306,
- Sholze, H. "Comportamiento en Mojado y Adherencia de yeso". Eurogypsum. Würzburg. 1982.

- Sholze, H. "La estructura en la zona de contacto y de la superficie en los enlucidos de yeso". Munich. 198
- Smith, B.R. & Alexander, A.E. "The Effect of Additives on the Process of the Crystallisation". Journal of Colloid and Interface Science, vol. 34. 1976. Pág. 81-90.
- Villanueva Domínguez, L. "Influencia de los movimientos diferenciales y del módulo de elasticidad en el comportamiento del yeso". Artículos Técnicos. 1985. Pág. 2-8.
- Wallboards and other Aggregate Construction Panels. US 4,988,543,
- Zalba, Lázaro, Cabeza. Experimental Study On Phase Change Materials And Plastics Compatibility (Plan Nacional De Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003
- Zhang Y, Faghri A. Heat transfer enhancement in a latent heat thermal storage system by using internally finned tube. Int J Heat Mass Transf 1996; 39:717–24.