



ÍNDICE

- 1. OBJETO**
- 2. ANTECEDENTES**
- 3. MUESTRAS PARA ENSAYO**
- 4. ACONDICIONADO DE LAS MUESTRAS**
- 5. ENSAYOS**
 - 5.1. Velocidad de fraguado**
 - 5.2. Resistencia a flexión y compresión**
 - 5.3. Dureza por microindentación**
 - 5.4. Dilatación térmica lineal**
 - 5.5. Retracción y expansión**
 - 5.6. Análisis microestructural**
- 6. CONCLUSIONES**

1. OBJETO

El objeto del presente informe es analizar el comportamiento físico-mecánico de probetas de escayola, con relación a productos de referencia, para su utilización en La Alhambra de Granada.

2. ANTECEDENTES

En septiembre de 2008 el peticionario solicitó al Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja” (IETcc) el análisis de distintas propiedades físico-químicas de productos de yeso, para su utilización en el Taller de Restauración de Yaserías y Alicatados de La Alhambra de Granada.

Posteriormente, con fecha 18 de diciembre de 2008, se firmó el contrato de investigación que da origen al presente informe.

3. MUESTRAS PARA ENSAYO

El peticionario preparó las muestras, con las dimensiones adecuadas, para cada uno de los ensayos. A continuación, se recogen las condiciones de preparación de muestras y la identificación de probetas, de acuerdo con las indicaciones del peticionario.

Preparación de las probetas:

Se han preparado en una sola amasada, cada uno de los morteros, para cada tipo de ensayo, con el fin de mantener la misma agua de amasado y la misma cantidad de escayola. Por ejemplo, para las probetas de 4x4x16cm se ha amasado una probeta de 4x12x16 cm, la cual se ha cortado posteriormente, para tener las tres probetas.

Identificación de probetas:

Las probetas fueron empaquetadas en grupo, para cada tipo de ensayo a realizar, y se han marcado en sus caras con la inicial identificativa del producto, que es la siguiente:

- *E = Escayola*
- *M = Mortero de escayola*

Además, todas las probetas estaban marcadas con una X en la cara que ha estado en contacto con el molde.

Para la fabricación de las probetas no se ha utilizado ningún aceite, vaselina, etc. para su despegue del molde.

El tipo de escayola utilizada es de la marca ESCAYESCOS, con la Referencia E-35.

Además, para el ensayo de retracción y expansión se preparó un tercer tipo de probetas con las siguientes características:

- MX: Producto mixto fabricado relleno las dos mitades del molde, inferior y superior, con los dos tipos de productos ensayados (E y M); de tal manera que las probetas están constituidas por la mitad de cada producto, de forma longitudinal.

Las muestras, convenientemente identificadas y embaladas, fueron enviadas por el peticionario al IETcc. Estas probetas fueron preparadas específicamente para cada uno de los ensayos a realizar y se enviaron envueltas con un recubrimiento húmedo y protegidas con material aislante, de tal manera que no se produjera desecación durante el envío. Además de las probetas preparadas, se envió dos bolsas conteniendo en material anhidro para el ensayo de determinación del tiempo de fraguado.

El aspecto de las probetas, tal como fueron recibidas en el IETcc, se recoge en cada uno de los ensayos que se han realizado.

4. ACONDICIONADO DE LAS MUESTRAS

Las probetas fabricadas para los distintos ensayos, recibidas en el IETcc, fueron acondicionadas antes de iniciar los ensayos previstos.

Las condiciones para el acondicionamiento de las probetas son las que se indican a continuación:

- 20 días: Protegidas contra la pérdida de humedad, en contacto con un material absorbente humedecido y con un material impermeable
- 7 días en condiciones de laboratorio: Al ambiente $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ y $60\pm 5\%$ H.R.
- 2 días en estufa a una temperatura de 40°C

Las muestras para el ensayo se pesaron después de cada uno de los procesos indicados anteriormente. En la Tabla 1 se recoge el peso de las probetas después de cada periodo de acondicionamiento.

Tabla 1. Peso de las muestras durante los distintos periodos del acondicionamiento.

PESOS (g)	Inicial (Desembalaje)	7 días acondicionamiento	40°C secado
Retracción 9 probetas 4X4X16			
E1	333,7	315,2	315,0
E2	320,8	305,0	304,9
E3	324,2	307,8	307,6
M1	299,5	280,4	280,3
M2	327,1	306,1	306,0

M3	325,7	303,3	303,0
MX1	329,5	312,4	312,3
MX2	336,4	318,3	312,2
MX3	334,7	321,6	321,4
DILATOMETRIA 1X1X1			
E1	2,47	2,47	2,47
E2	2,62	2,62	2,62
M1	2,38	2,37	2,37
M2	2,48	2,49	2,49
BSE 3X3X3			
E	12,76	12,75	12,75
M	11,70	11,69	11,69
ROTURA 4X4X16			
MR1	324,2	301,5	301,4
MR2	306,3	283,0	283,0
MR3	331,7	307,7	307,6
ER1	333,0	308,3	308,1
ER2	313,8	293,3	293,1
ER3	333,0	311,1	311,0
MICROINDENTACIÓN			
E1	64,13	64,07	64,04
E2	61,81	61,74	61,70
E3	63,92	61,87	63,84
M1	58,29	58,24	58,21
M2	56,75	56,70	56,66
M3	58,86	58,80	58,77

5. ENSAYOS

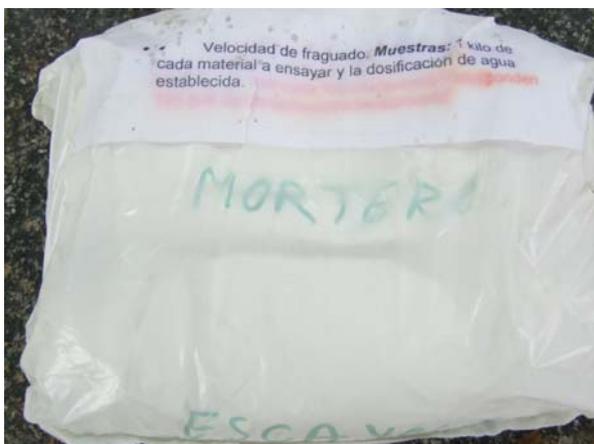
A continuación se recogen los distintos ensayos realizados, para cada tipo de muestra.

5.1. Velocidad de fraguado

Se determinó el tiempo de fraguado de las muestras E y M, amasando con la relación agua/escayola que indica el peticionario.

El ensayo de inicio y fin de fraguado se llevó a cabo de acuerdo con el procedimiento de ensayo descrito en la norma UNE 102031 y el método de la aguja de Vicat. El equipo automático de aguja de Vicat es de la marca IBERTEST Modelo **VICAT FL**. El ensayo se basa en que la penetración del cono o aguja de Vicat dentro de una pasta de yeso se va reduciendo a medida que progresa el fraguado.

En las **Fotografías 1 y 2** se recoge el aspecto de las muestras recibidas para ensayo. Y en las **Fotografías 3 y 4** se puede observar el ensayo de aguja de Vicat.



Fotografía 1. Muestras para ensayo.



Fotografía 2. Muestras para ensayo.



Fotografía 3. Ensayo de aguja de Vicat.



Fotografía 4. Ensayo de aguja de Vicat.

La escayola se amasa con la relación agua/escayola indicada por el fabricante y se amasa durante dos minutos en la amasadora a velocidad lenta, durante dos minutos. Se rellena el molde y se coloca sobre la aguja de Vicat, dejándose caer una aguja con un peso determinado, viéndose la penetración de ésta en la pasta, en intervalos de 1 minuto; determinándose el inicio y el final del fraguado en función de la penetración en la pasta.

En la Tabla 2 se recogen los resultados de inicio y final de fraguado obtenidos para las muestras E y M.

Tabla 2. Tiempo de fraguado en las escayolas E y M.

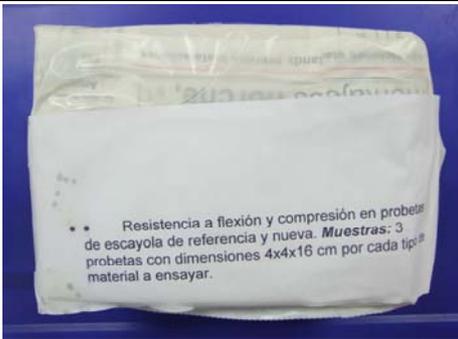
Muestra	Relación agua/escayola	Inicio de fraguado	Final de fraguado
E	13,6	8 min.	12 min.
M	13,6	2 min.	4 min.

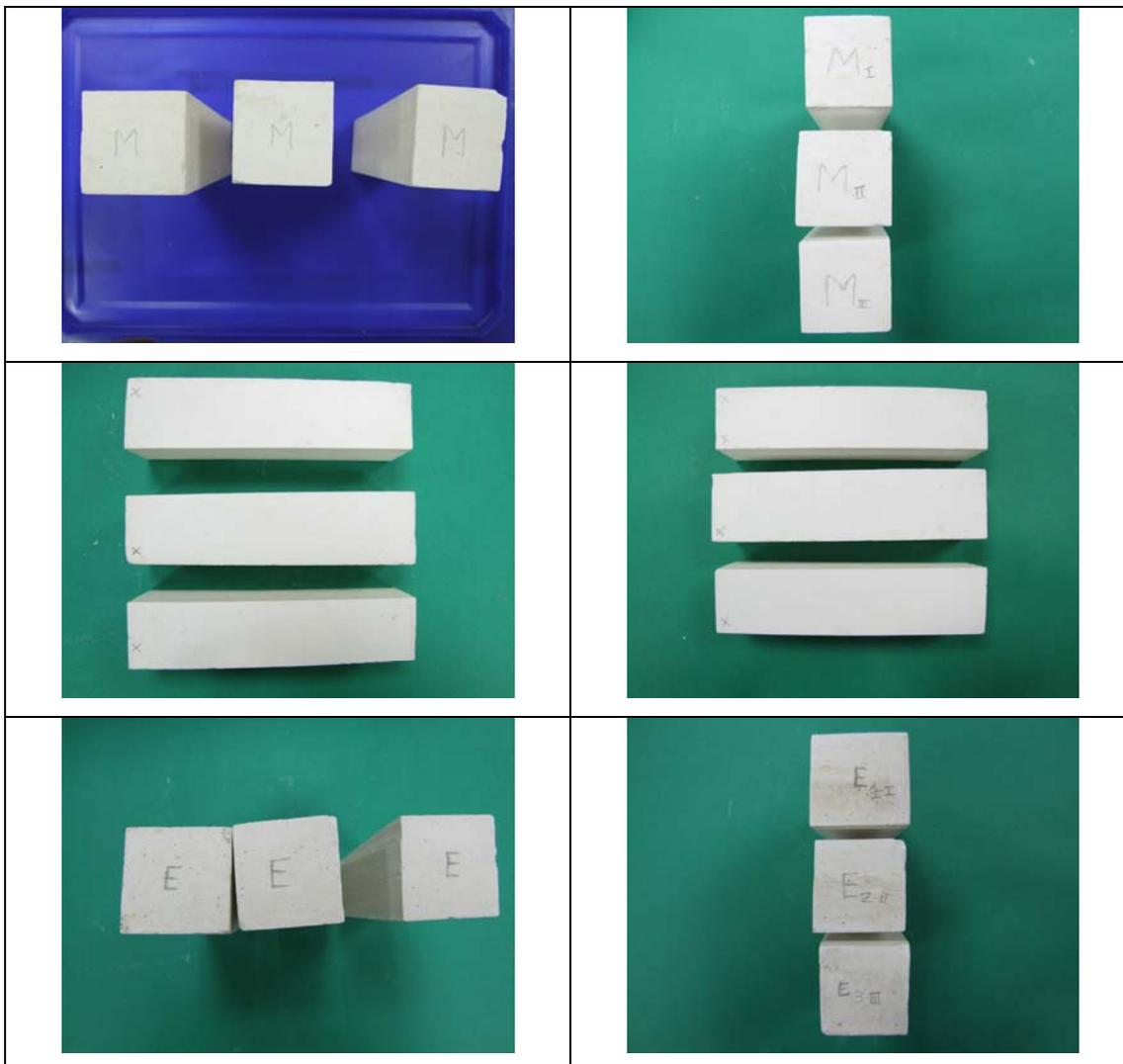
5.2. Resistencia flexión y compresión

Se determinó la resistencia a flexión y a compresión, de acuerdo con las indicaciones de la norma UNE 102031 aplicando cargas de 1 N/mm² s. El ensayo se realizó con una prensa de la marca IBERTEST, Modelo Auto test 200-10-SWC.

En la Tabla 3 se recoge el aspecto de las muestras recibidas en el IETcc, así como el aspecto de las muestras después del periodo de acondicionamiento.

Tabla 3. Aspecto de las muestras recibidas y de éstas después del acondicionado.

ASPECTO DE LAS MUETRAS PARA RESISTENCIA A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN	
Inicial	Después del acondicionado
	
	



Para la determinación de la resistencia mecánica de las muestras, se realiza en primer lugar el ensayo de resistencia a flexión y, posteriormente, se realiza el ensayo a compresión de las dos mitades resultantes del ensayo a flexión.

En las Tablas 4 y 5 se recoge el aspecto del ensayo de flexión y de compresión, respectivamente.

Tabla 4. Ensayo de resistencia a flexión en de las muestras E y M.

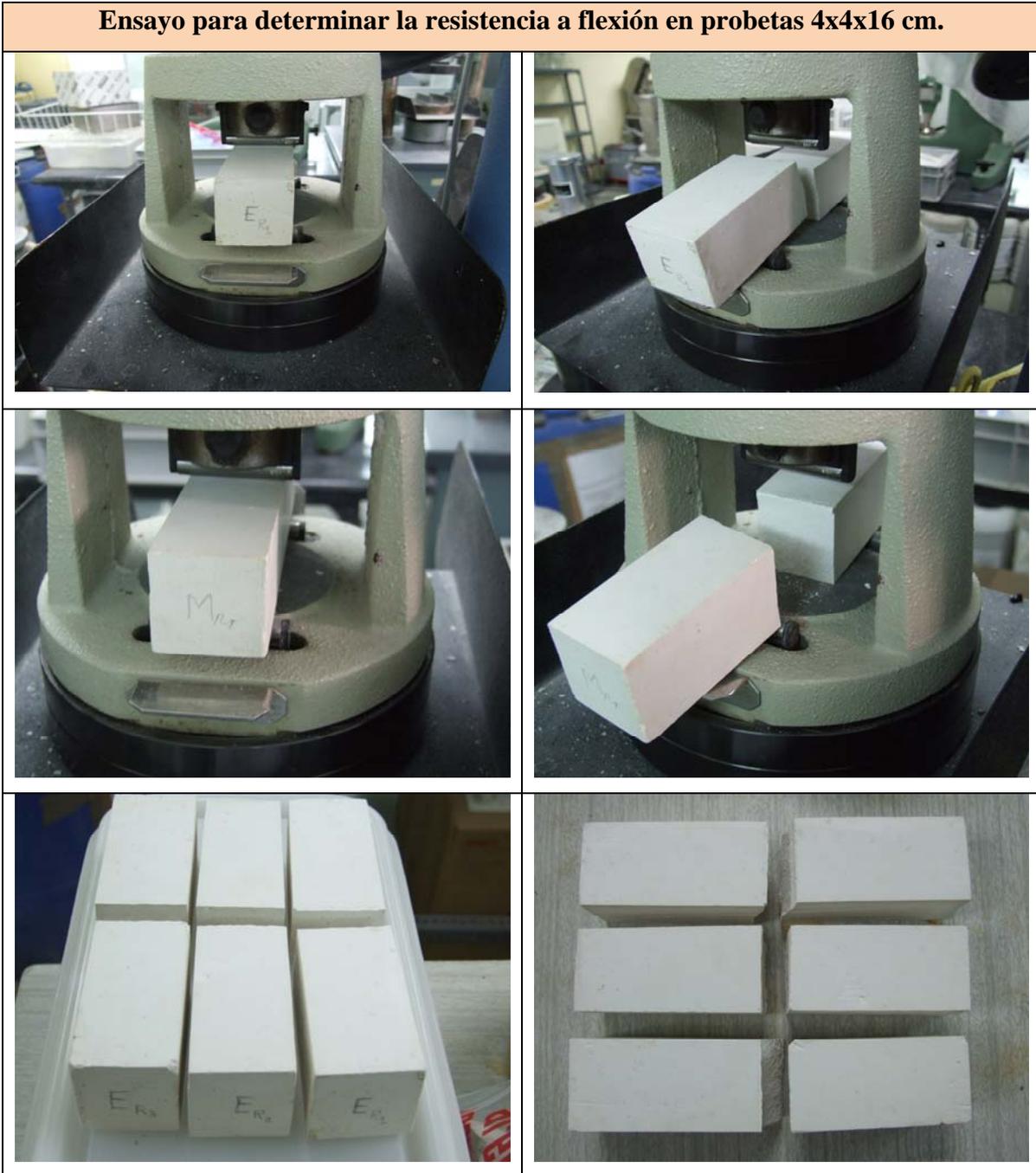
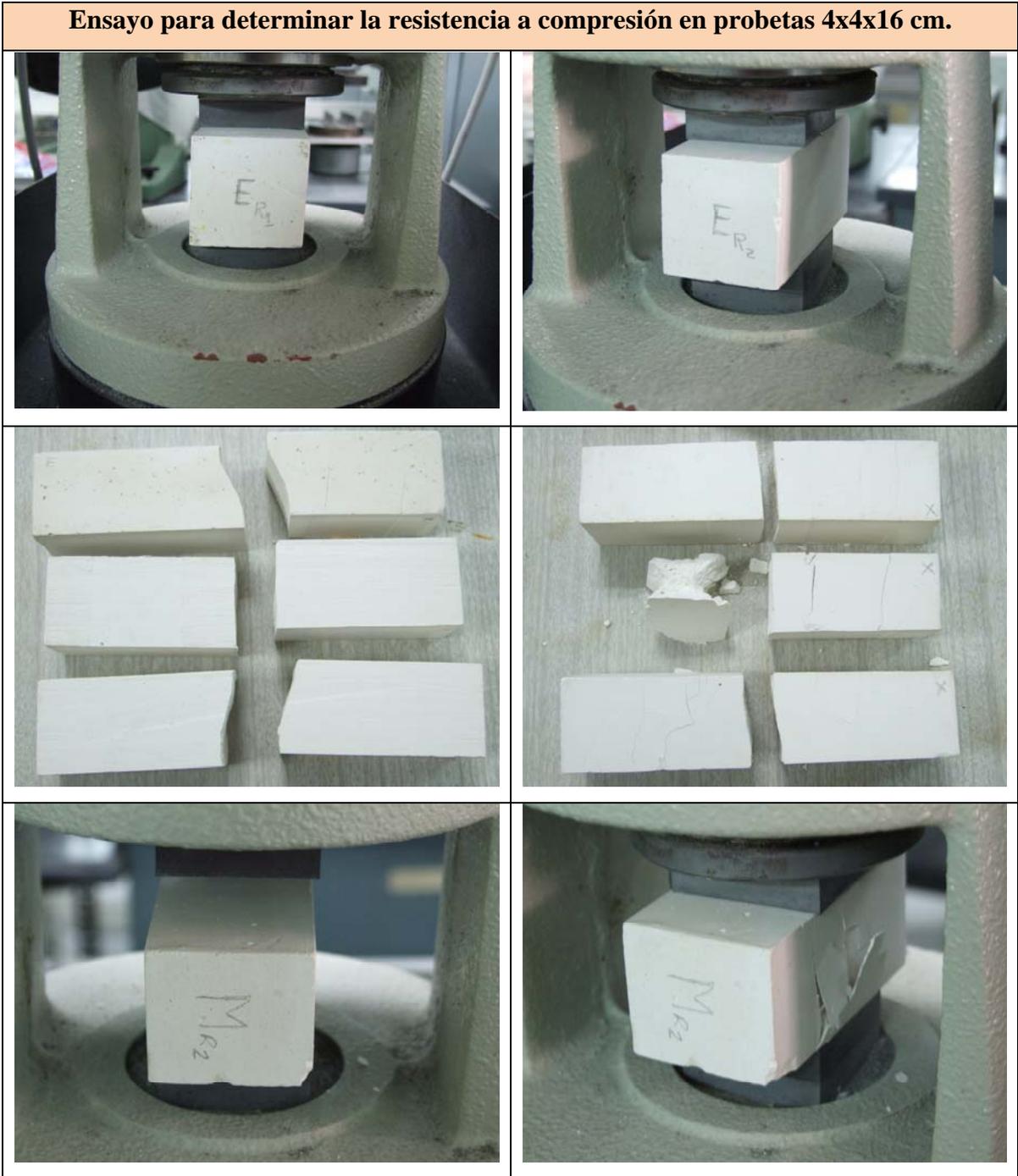


Tabla 5. Ensayo de resistencia a compresión en de las muestras E y M.



En las Tablas 6 y 7 se recogen los resultados relativos a resistencia a flexión y a compresión, respectivamente, de las probetas de escayola E y M.

Tabla 6. Determinación de la resistencia a flexión en las muestras E y M.

Ensayo de resistencia a flexión			
Material E		Material M	
Probeta N°	N/mm ²	Probeta N°	N/mm ²
E 1	6,2	M 1	6,2
E 2	6,0	M 2	5,7
E 3	6,4	M 3	6,8
Media E	6,2	Media M	6,2
Desv. Estándar	0,2	Desv. Estándar	0,2

Tabla 7. Determinación de la resistencia a compresión en las muestras E y M.

Ensayo de resistencia a compresión			
Material E		Material M	
Probeta N°	N/mm ²	Probeta N°	N/mm ²
E 1	15,5	M 1	14,1
E 1	15,7	M 1	15,4
E 2	14,8	M 2	12,9
E 2	13,7	M 2	11,2
E 3	14,9	M 3	14,5
E 3	14,2	M 3	13,3
Media E	14,8	Media M	13,6
Desv. Estándar	0,7	Desv. Estándar	1,5

5.3. Dureza por microindentación

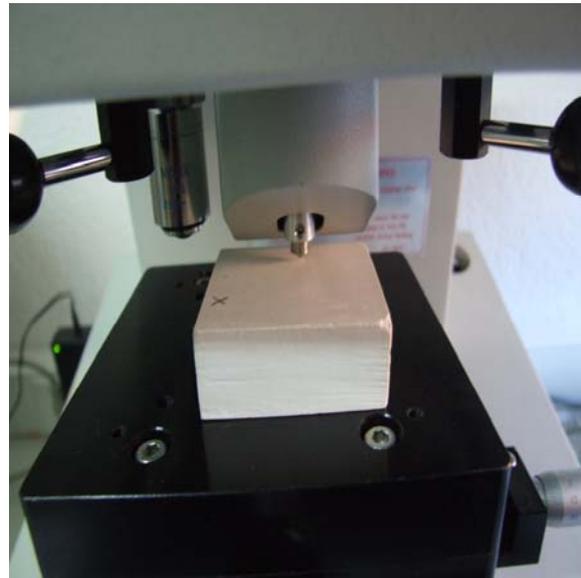
Se determinó la dureza por microindentación en distintas zonas de las muestras ensayadas. Esta determinación se realiza con un Microdurómetro SHIMODZU STRUENS HMV-2 DURAMIN-1.

En las Fotografías 5 y 6 se puede observar el equipo de medida. Las condiciones de medida son las siguientes:

- Dureza: 245,5 mN
- Tiempo de indentación: 5 s



Fotografía 5. Equipo de medida de microindentación.



Fotografía 6. Equipo de medida de microindentación.

Se han analizado tres probetas del material E y tres probetas del material M. En cada una de las muestras ensayadas, se ha determinado la dureza Vickers en 5 puntos distribuidos al azar.

Los resultados obtenidos, expresados como dureza Vickers, se recogen en la Tablas y vienen dados en dureza Vickers.

Tabla 8. Dureza Vickers de la muestra **E1**.

E 1					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
	4,73	6,34	9,18	8,01	7,81
	4,91	10,5	7,39	4,25	6,43
	7,83	6,97	5,03	5,05	9,86
	4,49	6,44	10,03	4,62	10,2
	4,49	6,72	5,59	5,20	11,9
Media	5,29	7,39	7,62	5,43	9,22
S	1,43	1,75	2,11	1,49	2,17
C.V.	27,05	23,72	27,65	27,49	23,53

Tabla 9. Dureza Vickers de la muestra **E2**.

E 2					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
	9,49	6,19	5,17	5,87	7,87
	8,05	5,02	5,04	14,3	7,46
	12,2	5,73	5,02	5,5	8,10
	8,29	6,85	7,5	6,24	6,29
	5,67	5,89	3,46	5,45	5,93
Media	8,74	5,94	5,24	7,47	7,13
S	2,38	0,68	1,45	3,83	0,97
C.V.	27,22	11,47	27,62	51,26	13,57

Tabla 10. Dureza Vickers de la muestra **E3**.

E 3					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
	8,09	11,0	9,04	8,73	7,94
	3,60	16,5	6,32	12,8	4,14
	4,97	4,17	13,8	9,44	7,72
	6,93	9,80	13,3	9,66	7,02
	7,75	6,50	10,8	8,33	4,74
Media	6,27	8,60	10,7	9,79	6,31
S	1,92	4,71	3,09	1,76	1,76
C.V.	30,64	49,01	29,05	18,02	27,81

Tabla 11. Dureza Vickers de la muestra **M1**.

M 1					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
	8,59	8,82	9,79	3,85	19,2
	6,07	12,6	8,58	3,46	6,9
	6,33	6,88	7,72	5,47	4,99
	6,83	3,94	10,4	4,54	10,7
	6,53	3,35	9,48	5,41	8,7
Media	6,87	7,32	9,19	4,55	10,01
S	1,00	3,56	1,05	0,9	5,51
C.V.	14,57	48,59	11,46	19,87	54,57

Tabla 12. Dureza Vickers de la muestra **M2**.

M2					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
	4,49	5,45	9,78	10,8	6,75
	5,36	9,57	12,3	7,90	7,27
	6,59	13,1	10,4	7,71	9,07
	6,20	10,2	6,87	16,5	7,72
	5,55	10,4	8,69	6,17	5,25
Media	5,64	9,88	9,61	9,80	7,25
S	0,84	2,80	2,02	4,11	1,38
C.V.	14,37	28,35	20,97	41,91	19,04

Tabla 13. Dureza Vickers de la muestra **M3**.

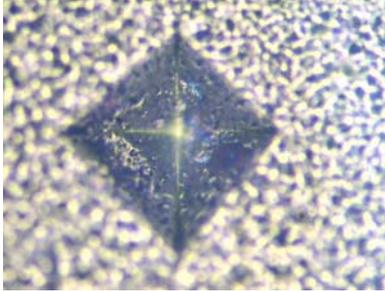
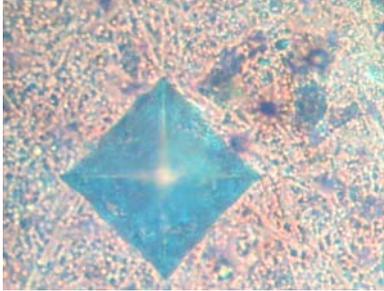
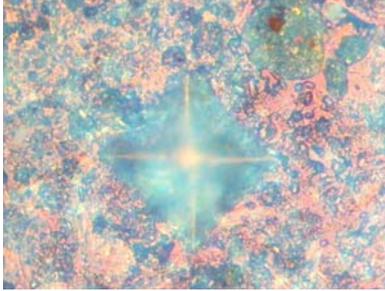
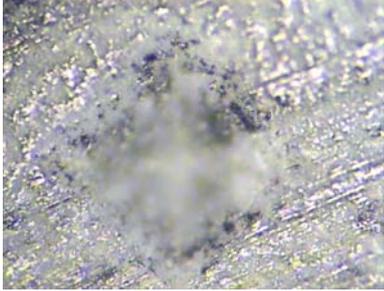
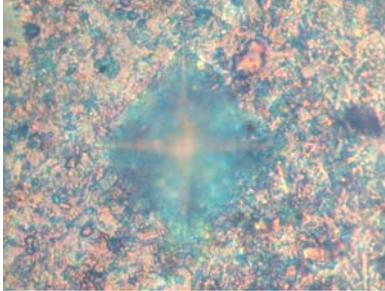
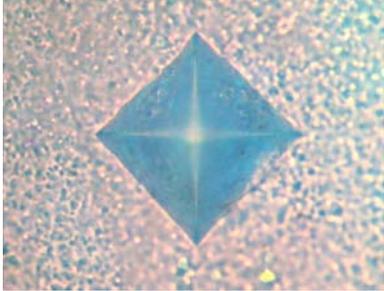
M 3					
	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5
	10,1	7,29	12,0	4,59	14,5
	5,49	9,53	7,06	5,41	11,8
	5,58	5,48	10,9	4,42	17,0
	5,33	5,30	7,58	7,20	11,7
	6,25	7,05	7,26	8,95	10,0
Media	6,55	6,93	8,96	6,11	13,0
S	2,02	1,71	2,31	1,93	2,76
C.V.	30,77	24,64	25,82	31,58	21,2

Los valores medios obtenidos en la muestra E y en la muestra M son los siguientes:

- Muestra E: 7,4
- Muestra M: 8,0.

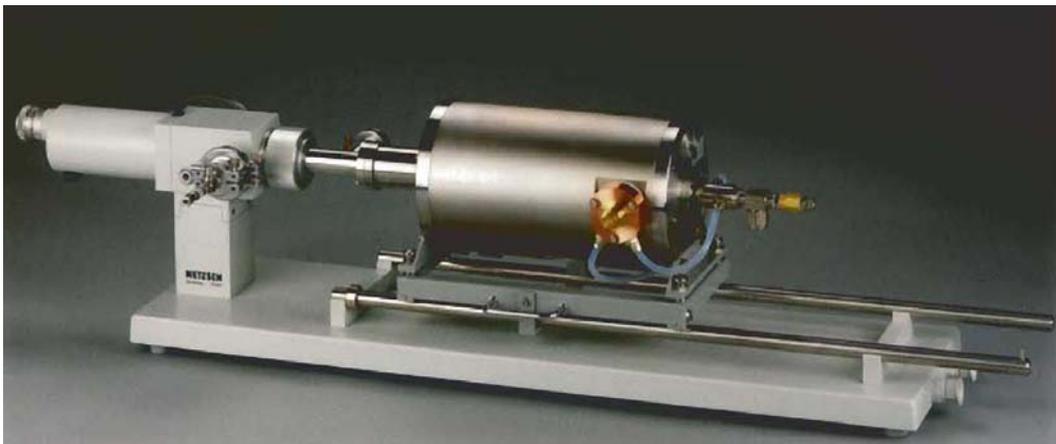
La zona de indentación se marcó con un rotulador azul, con el fin de poder observar esta zona en imágenes, ya que el color blanco intenso de las muestras no facilita la observación de la marca de la huella. Después del ensayo aparece una huella en el punto de ensayo. En la Tabla 14 se recoge el aspecto de la indentación después del ensayo, en uno de los puntos de ensayo de cada material.

Tabla 14. Imágenes de las indentaciones provocadas en el yeso.

Muestra	Después indentación	Muestra	Después indentación
E1		E2	
E3		M1	
M2		M3	

5.4. Dilatación térmica lineal

Se determinó la dilatación térmica lineal entre 20°C y 120°C. Para esta determinación se utilizó un equipo NETSZCH 402E. En la Fotografía 7 se observa el equipo de medida.



Fotografía 7. Equipo de dilatometría.

Se midieron las muestras con unas dimensiones de 1x1x1 centímetros. Se determinó la dilatación térmica lineal de acuerdo con el método instrumental descrito en la norma UNE-EN ISO 10.545-8.

El coeficiente de dilatación lineal de origen térmico, α_1 , se expresa con aproximación de una cifra decimal $\times 10^{-6}$ por grado centígrado ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) según la fórmula:

$$\alpha = \frac{dL/L_0}{\Delta T}$$

Donde,

α , es el coeficiente de dilatación lineal de origen térmico

L_0 , es la longitud de la probeta a temperatura ambiente

dL , es el incremento relativo de longitud entre temperatura ambiente y ensayo

ΔT , es el incremento de temperatura

En las **Figuras 1 y 2** se recogen las gráficas de expansión dilatométrica de las muestras E2 y M2, respectivamente.

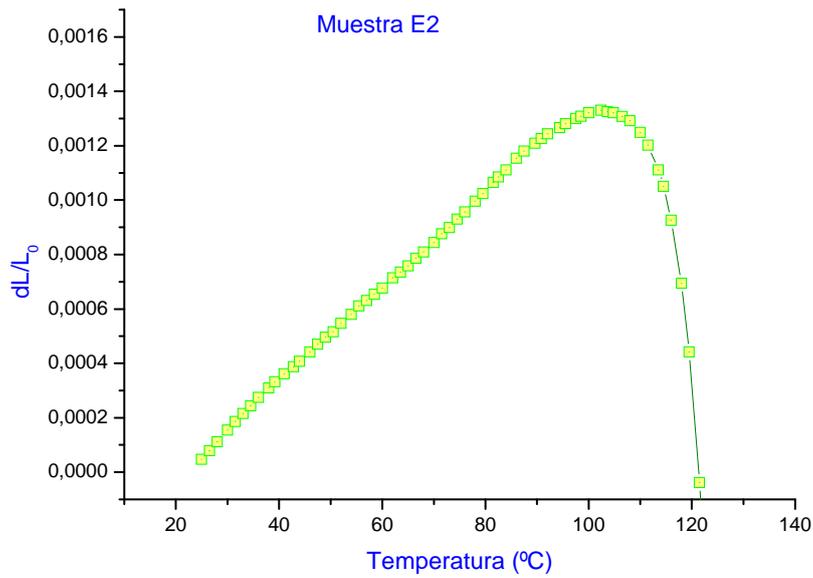


Figura 1. Variación de longitud relativa en función de la temperatura.

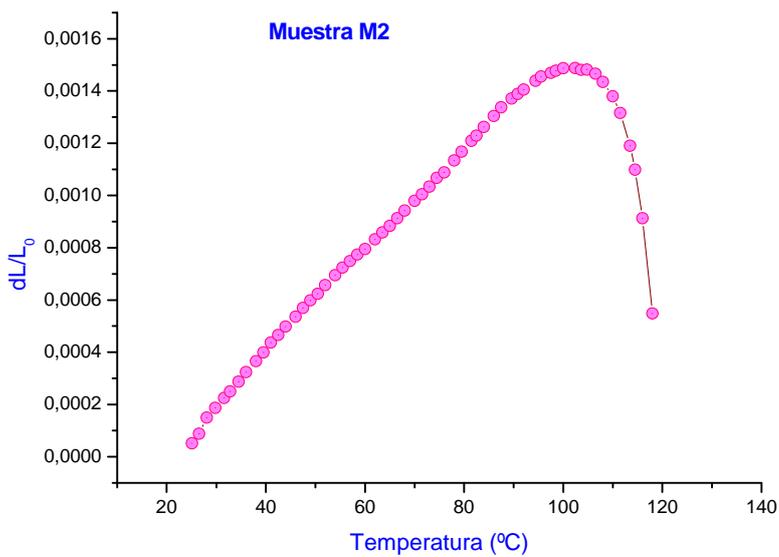


Figura 2. Variación de longitud relativa en función de la temperatura.

En la Tabla 15 se recoge el coeficiente α_1 obtenido para varias temperaturas.

Tabla 15. Resultado de dilatometría lineal a varias temperaturas.

MUESTRAS		TEMPERATURA			
		25°C	50°C	75°C	100°C
Muestra E2	dL/L ₀	$3,69 \cdot 10^{-5}$	$5,16 \cdot 10^{-4}$	$9,30 \cdot 10^{-4}$	$13,2 \cdot 10^{-4}$
	α_1	$1,48 \cdot 10^{-6}$	$10,32 \cdot 10^{-6}$	$12,4 \cdot 10^{-6}$	$13,2 \cdot 10^{-6}$
Muestra M2	dL/L ₀	$5,11 \cdot 10^{-5}$	$6,24 \cdot 10^{-4}$	$10,67 \cdot 10^{-4}$	$14,87 \cdot 10^{-4}$
	α_1	$2,04 \cdot 10^{-6}$	$12,48 \cdot 10^{-6}$	$14,22 \cdot 10^{-6}$	$14,87 \cdot 10^{-6}$

Se observa una dilatación térmica lineal algo menor en la muestra E2, con relación a la muestra M2. Los valores pueden considerarse normales para materiales de yeso.

5.5. Retracción y expansión

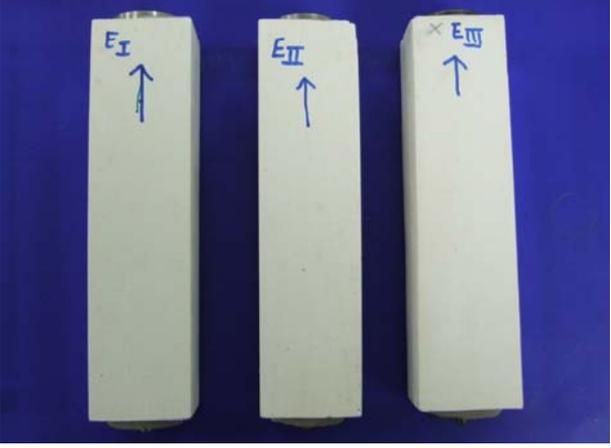
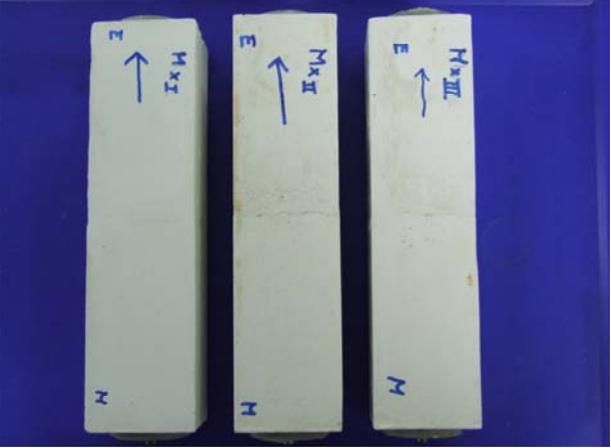
Probetas de cada uno de los materiales ensayados, E, M y MX, fueron sometidos a condiciones de humedad-temperatura-secado, que corresponden a:

- Muestra E: Escayola
- Muestra M: Mortero de escayola
- Muestra MX: Mitad de la probeta con escayola (E) y mitad de la probeta con mortero de escayola (M)

Se ensayaron probetas con dimensiones 4x4x16 centímetros a las que se adhirieron índices para poder determinar la modificación de su longitud.

En la **Tabla 16** se recoge el aspecto de las muestras, con los índices adheridos, antes del ensayo.

Tabla 16. Muestras con índices antes del ensayo.

Muestras	Después indentación
E	
M	
MX	

Las muestras se sometieron a tres diferentes condiciones de ensayo para analizar su comportamiento en cuanto a la posible expansión o retracción que se puede producir con relación a la dimensión inicial.

Se calcula el cambio relativo de longitud mediante la siguiente expresión:

$$\% \Delta L = \frac{L_i - L_0}{L_0} * 100$$

Donde,

$\% \Delta L$, es la variación de la longitud, en tanto por ciento

L_i , es la longitud a un tiempo “i”

L_0 , es la longitud inicial de la probeta

Se ensayo un conjunto de probetas en tres condiciones de exposición diferentes. Durante el ensayo se mide la longitud de las probetas en un puente de medidas IBERTEST, determinándose la variación de longitud con un reloj comparador MITUTOYO N°2119F con una precisión de milésima de milímetro.

A continuación se especifican las condiciones y los resultados obtenidos en cada caso.

- **Temperatura 50°C y humedad relativa 40%:** Las probetas se mantienen durante todo el periodo de ensayo a una temperatura y una humedad relativa constantes.

Las muestras ensayadas en estas condiciones son las denominadas E1, M1 y MX1.

En las **Figuras 3, 4 y 5** se recogen los resultados obtenidos para las muestras E1, M1 y MX1, respectivamente. Y en la **Figura 6** se recogen éstas de forma comparativa.

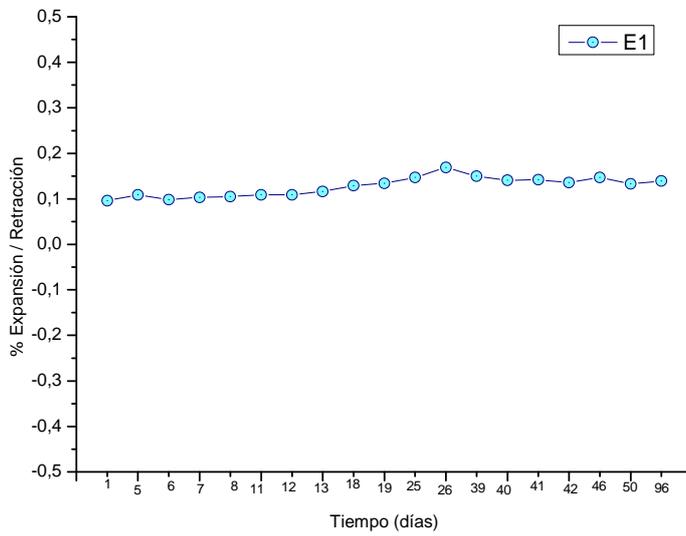


Figura 3. Variación de longitud en la Muestra E1 sometida a 50°C y 40% de H.R.

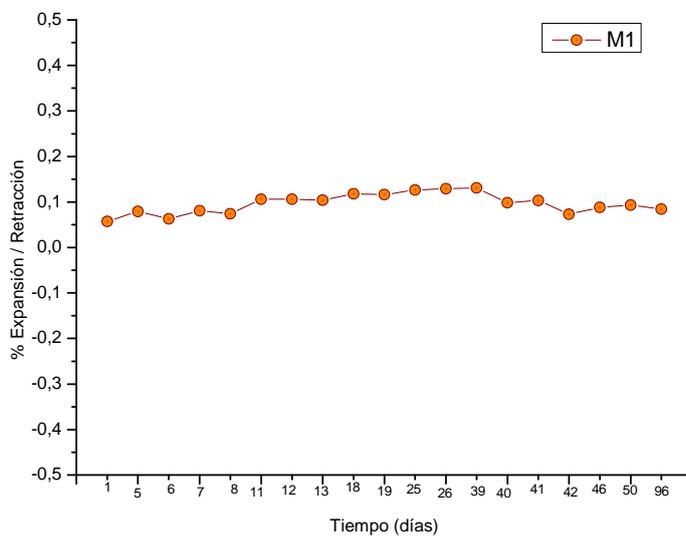


Figura 4. Variación de longitud en la Muestra M1 sometida a 50°C y 40% de H.R.

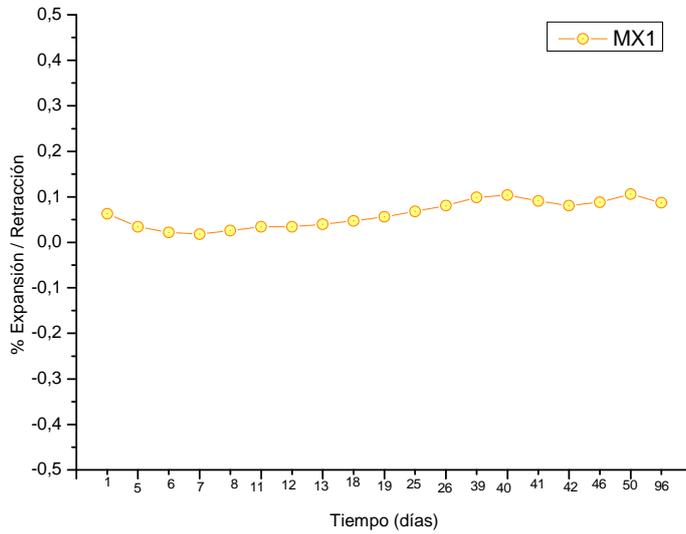


Figura 5. Variación de longitud en la Muestra MX1 sometida a 50°C y 40% de H.R.

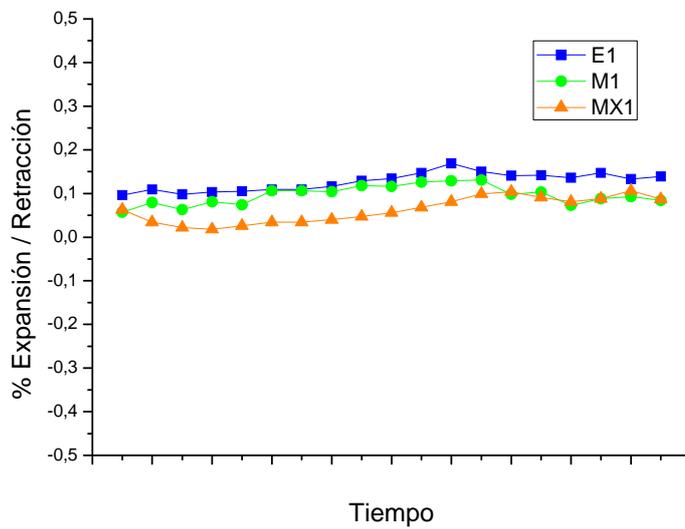


Figura 6. Variación de longitud comparativa de las muestras E1, M1 y MX1 sometidas a 50°C y 40% de H.R.

- **Temperatura 20°C y humedad relativa 60%:** Las probetas se mantienen durante todo el periodo de ensayo a una temperatura y una humedad relativa constantes.

Las muestras ensayadas en estas condiciones son las denominadas E2, M2 y MX2.

En las **Figuras 7, 8 y 9** se recogen los resultados obtenidos para las muestras E1, M1 y MX1, respectivamente. Y en la **Figura 10** se recogen éstas de forma comparativa.

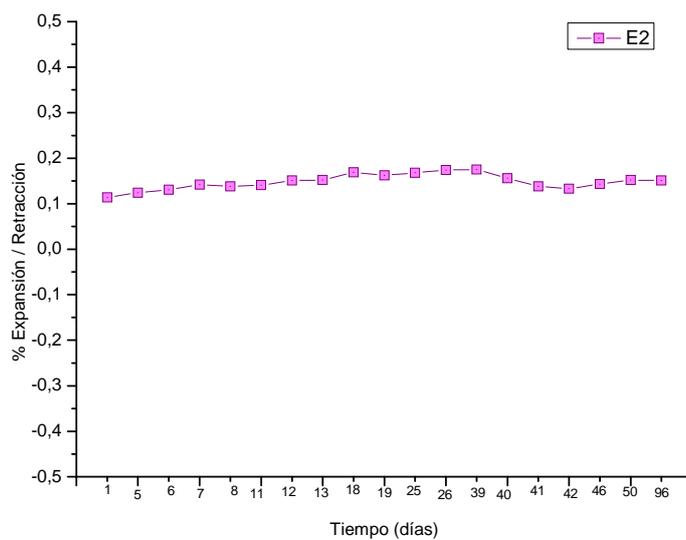


Figura 7. Variación de longitud en la Muestra E2 sometida a 20°C y 60% de H.R.

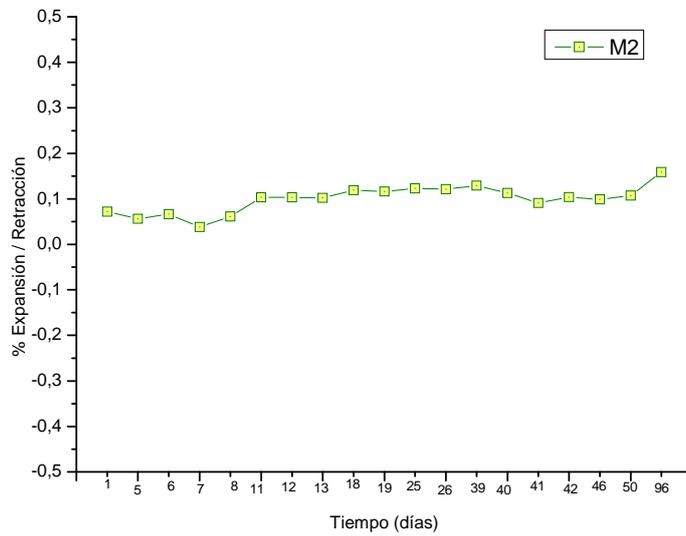


Figura 8. Variación de longitud en la Muestra E2 sometida a 20°C y 60% de H.R.

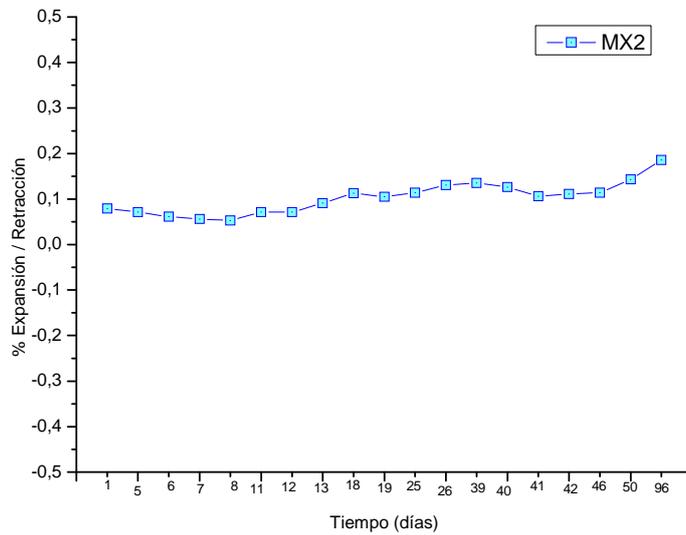


Figura 9. Variación de longitud en la Muestra E2 sometida a 20°C y 60% de H.R.

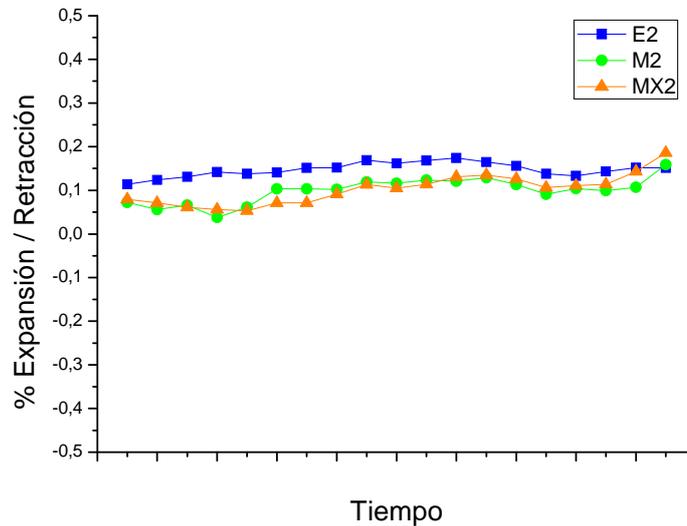


Figura 10. Variación de longitud comparativa de las muestras E2, M2 y MX2 sometidas a 20°C y 60% de H.R.

- **Ciclos: 6 horas a 40°C y 18 horas con agua vaporizada:** Las probetas se someten a ciclos sucesivos de secado y humedad.

Las muestras ensayadas en estas condiciones son las denominadas E3, M3 y MX3. La humedad se aplicó en forma de vapor muy fino, ya que cuando se aplicó en forma de goteo sobre las probetas, éstas comenzaron a deteriorarse superficialmente.

En las **Figuras 11, 12 y 13** se recogen los resultados obtenidos para las muestras E3, M3 y MX3, respectivamente. Y en la **Figura 14** se recogen éstas de forma comparativa.

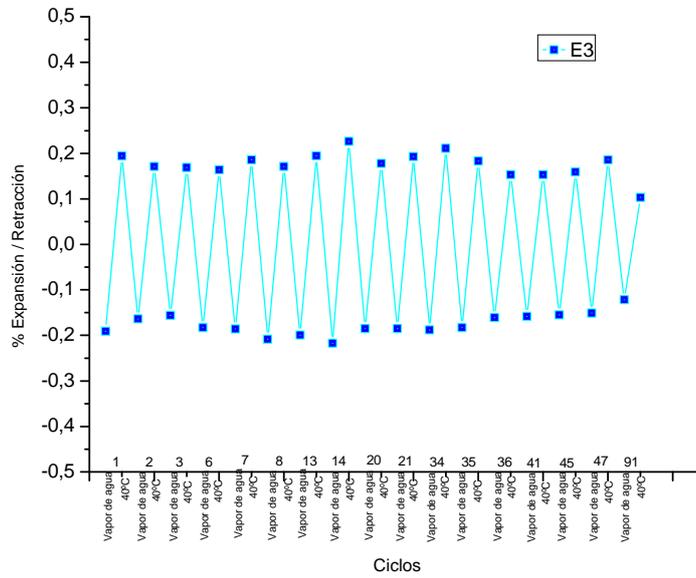


Figura 11. Variación de longitud en la Muestra E3 sometida a ciclos de 6 horas a 40°C y 18 horas con vapor de agua.

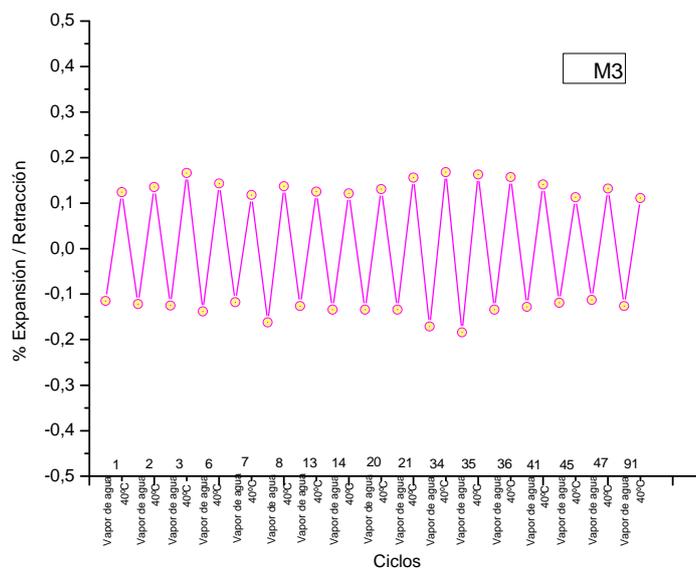


Figura 12. Variación de longitud en la Muestra M3 sometida a ciclos de 6 horas a 40°C y 18 horas con vapor de agua.

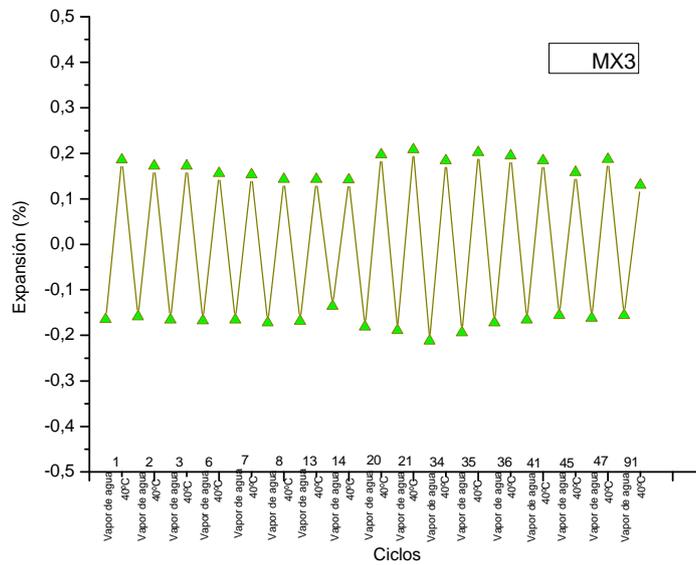


Figura 13. Variación de longitud en la Muestra MX3 sometida a ciclos de 6 horas a 40°C y 18 horas con vapor de agua.

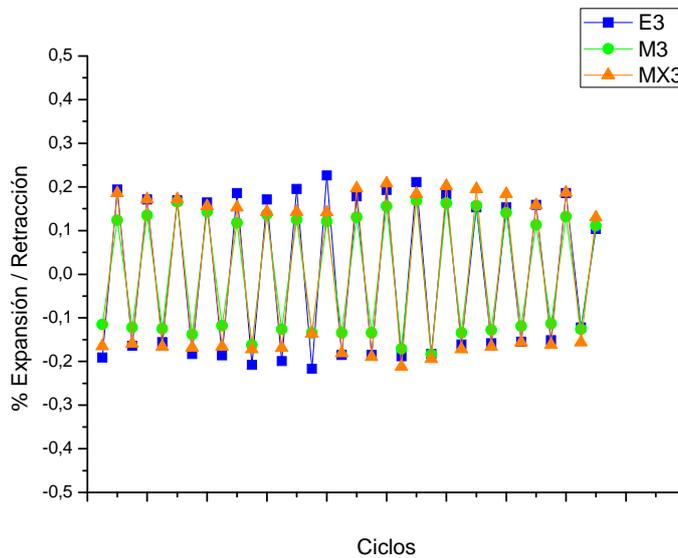


Figura 14. Variación de longitud comparativa de las muestras E3, M3 y MX3 sometidas a a ciclos de 6 horas a 40°C y 18 horas con vapor de agua.

Como se puede observar el comportamiento de las muestras E y M presentan comportamientos similares en las distintas condiciones en que han sido ensayados. Así mismo, en la muestra MX, que es mezcla de ambos materiales, también el comportamiento es similar a los anteriores.

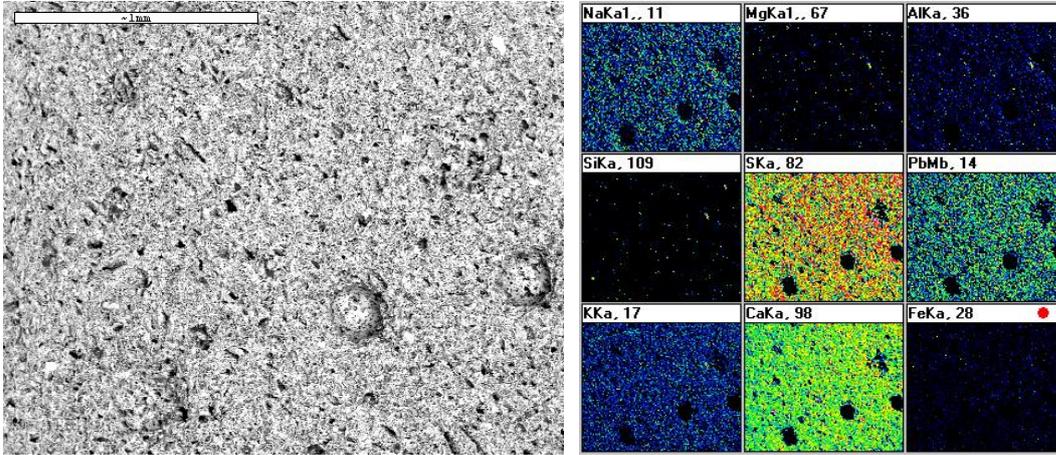
5.6. Análisis microestructural

Se analizaron microestructuralmente muestras pulidas del material E y M, mediante microscopia electrónica de retrodispersados combinada con microanálisis por energías dispersivas de rayos X, con un microscopio equipo JEOL, Modelo 5400 y un microanálisis OXFORD, Modelo LINK.

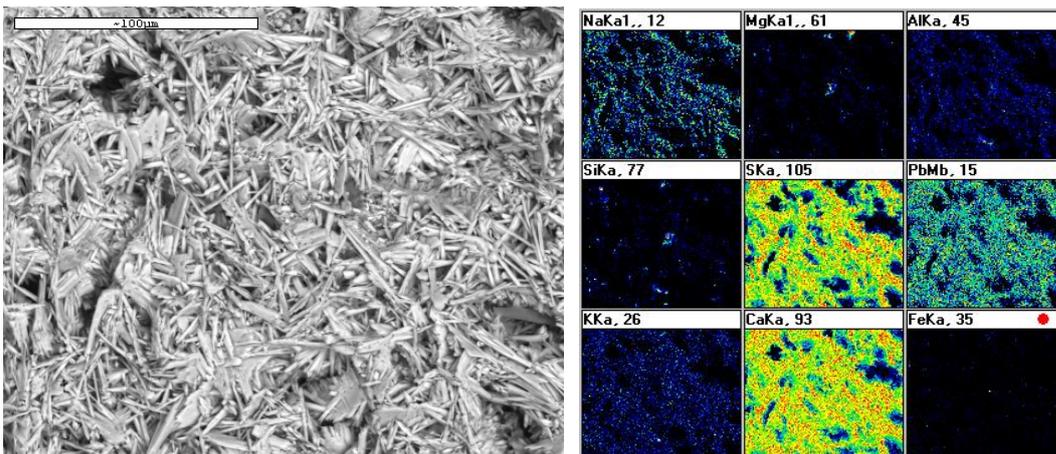
Las principales observaciones realizadas son las que indican a continuación:

- **Muestra E:**

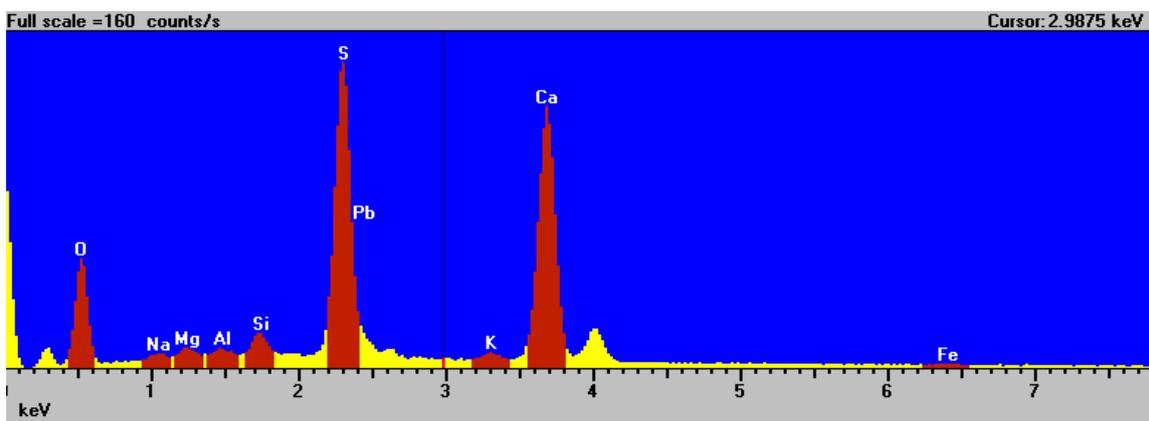
El material presenta un aspecto homogéneo con algunos poros, la composición elemental es la propia de los yesos, fundamentalmente azufre y calcio. También, se observan algunas partículas ricas en plomo, que se asocian con el colorante blanco; así como pequeñas cantidades de sodio, silicio y potasio. El aspecto general y el mapa de composición elemental asociado de la muestra E se observa en la **Micrografía 1**; mientras que en la **Micrografía 2** aparece un aspecto de detalle y el mapa de composición elemental asociado de la muestra E. Por su parte, en el **Microanálisis 1** se recoge la composición elemental del material.



Micrografía 1. Aspecto general de la muestra E y mapa de composición elemental asociado.



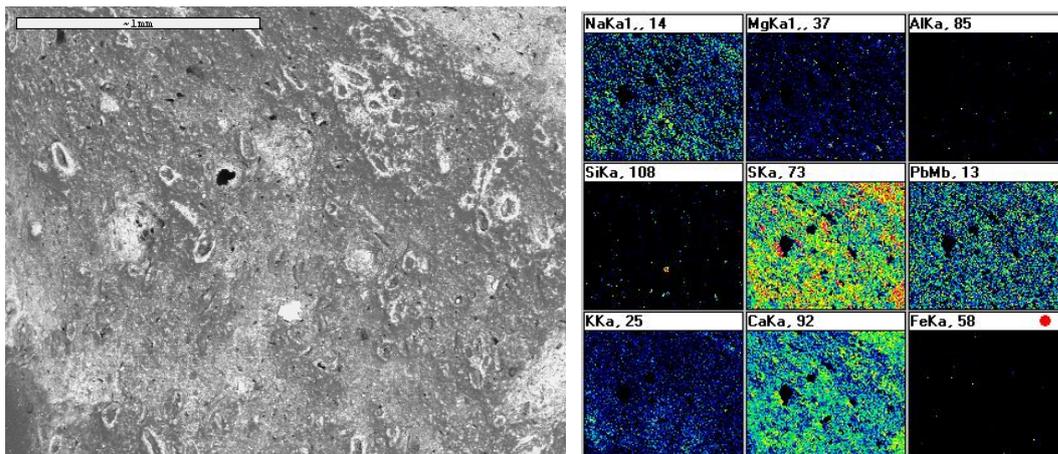
Micrografía 2. Detalle del aspecto de la muestra E y mapa de composición elemental asociado.



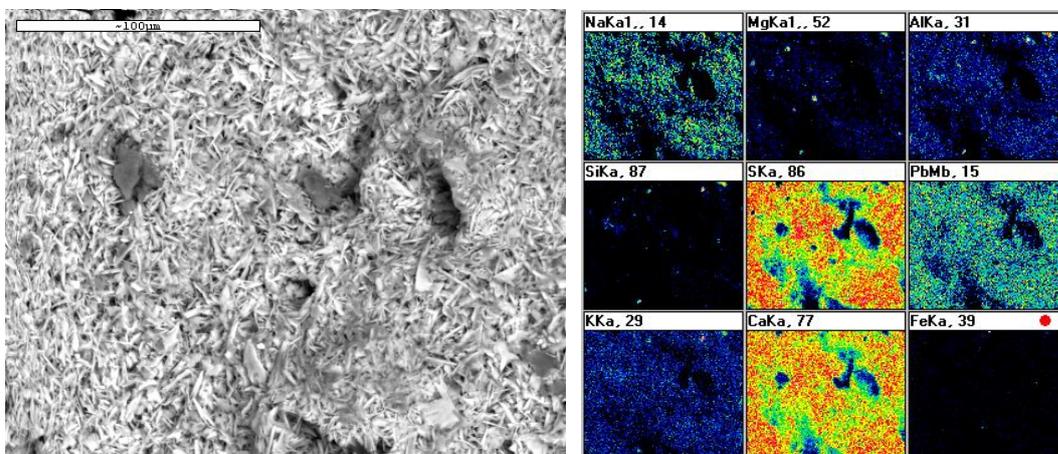
Microanálisis 1. Composición elemental general de la muestra E.

- **Muestra M:**

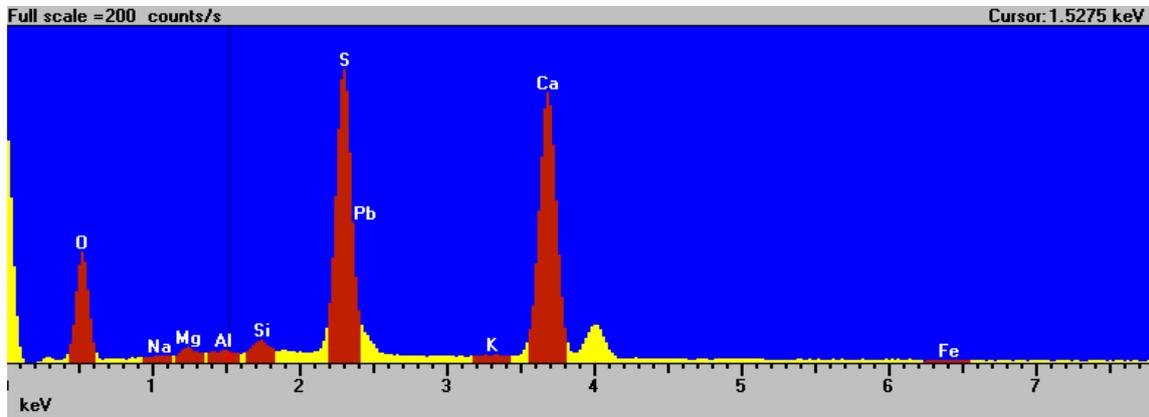
El aspecto general de material presenta un aspecto algo más heterogéneo que el E, con poros y una composición elemental propia de los yesos, fundamentalmente azufre y calcio. El aspecto general y mapa de composición elemental asociada se puede observar en la **Micrografía 3**. Por su parte, analizando en detalle el material M se observan cristales con un tamaño algo menor que el observado en el material E, su aspecto y composición elemental asociada se recoge en la **Micrografía 4**. Y en el **Microanálisis 2** se recoge la composición elemental del material.



Micrografía 3. Aspecto general de la muestra M y mapa de composición elemental asociado.



Micrografía 4. Detalle de la muestra M y mapa de composición elemental asociado.



Microanálisis 2. Composición elemental general de la muestra M.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con los ensayos y determinaciones realizadas se obtienen las siguientes conclusiones:

- Se analizaron muestras representativas de los materiales denominados E y M. Además, en algunos casos se ensayaron probetas fabricadas en parte con material E y en parte con material M y denominadas MX, las probetas con dimensiones 4x4x16 cm se fabricaron con la mitad, aproximadamente, de cada uno de los materiales aplicados longitudinalmente. Se analizó el comportamiento de los materiales E y M y, en su caso, del material MX, analizándose comparativamente los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados.
- La velocidad de fraguado es mucho mayor en el caso del material M, estando entre dos y cuatro veces por encima del valor del material E. El inicio de fraguado del material M es mucho más rápido que el del E, atenuándose en parte esta rapidez hasta el final del fraguado.

- La resistencia a la flexión en ambos materiales ensayados, E y M, presentan el mismo valor ($6,2 \text{ N/mm}^2$). Mientras que la resistencia a compresión es ligeramente más elevada la del Material E ($14,8 \text{ N/mm}^2$) con relación al material M ($13,6 \text{ N/mm}^2$). Los valores obtenidos pueden considerarse normales.
- La dureza Vickers media es mayor en el material M (10,09) con relación al material E (7,6), presentando valores mínimos, en ambos casos, en torno a 4,5; mientras que la dispersión de resultados es algo mayor en el material M, cuyo valor máximo se encuentra en torno a 19. La dureza Vickers algo mayor en el material M se justificaría por el menor tamaño de cristal de este material. Los valores de dureza obtenidos pueden considerarse adecuados en ambos casos.
- La dilatación térmica lineal es similar en ambos productos, E y M, si bien es algo mayor la del producto M. Los valores obtenidos pueden considerarse como normales.
- En los ensayos de expansión/retracción se observaron comportamientos similares en todos los productos analizados, E, M y MX, para las distintas condiciones de ensayo:
 - En las probetas sometidas a 50°C y 40% de humedad relativa se observa un comportamiento estable en el tiempo en todos los productos ensayados, sin que se aprecie disminución ni aumento de longitud.
 - También, en las probetas sometidas a 20°C y 60% de humedad relativa se observa un comportamiento estable en el tiempo en todos los productos ensayados, sin que se aprecie disminución ni aumento de longitud.
 - Por su parte, en las probetas sometidas a ciclos de 6 horas a 40°C y 18 horas en contacto constante con vapor de agua, se observa la variabilidad propia de las situaciones extremas en cuanto a presencia de humedad en las probetas, si bien se observa que los materiales ensayados (E, M y MX) recuperan el equilibrio al

final de cada ciclo; sin que se aprecie una deriva en cuanto a aumento o disminución de longitud.

Se aprecia una ligera variación en la longitud máxima y mínima en función del producto ensayado. Así el producto E presenta una variación de longitud entre +0,2 y -0,2; el producto M una variación entre +0,15 y -0,15 y el MX una variación entre +0,2 y -0,2 lo que indicaría que su comportamiento se rige mayoritariamente por el producto E.

- En el análisis microestructural de los productos E y M se observa un aspecto homogéneo con una composición típica del yeso, rica en calcio y azufre, y con presencia de plomo que se asocia con el colorante. Los materiales están formados por microcristales, en el caso del producto E éstos tienen un tamaño medio de 40µm, mientras que los cristales del producto M presentan un tamaño medio de 13µm. En ambos casos la distribución de los cristales es al azar y el aspecto general es homogéneo. El menor tamaño de los cristales del producto M se relaciona con su menor tiempo de fraguado, lo que impide un mayor crecimiento de estos cristales y su mayor dureza, ya que la mayor reticulación de los microcristales dificulta la penetración del indentador.

En resumen, el comportamiento de los productos E y M en cuanto a las características físico-mecánicas analizadas es similar, no observándose incompatibilidades en el comportamiento de los mismos tampoco cuando se ensayan en probetas fabricadas con ambos. El producto E presenta un mayor tiempo de fraguado, una ligeramente mayor resistencia a compresión y una dilatación térmica algo menor; mientras que el producto M presenta una mayor dureza Vickers que se asocia con el menor tamaño de los cristales que lo forman.

Este informe consta de 36 hojas numeradas y selladas.

Madrid, 25 de marzo de 2009

Esperanza Menéndez Méndez
Ingeniero Técnico en Química Industrial
Ingeniero Superior en Organización Industrial

Vº Bº
LA VICEDIRECTORA

Olga Río Suárez
Dra. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos