

**INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL INFORME DTT 17/0013**

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL INFORME DTT 17/0013

	<b>Páginas</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Muestras</b> .....	<b>1</b>
<b>3. Metodología, ensayos de caracterización y resultados</b> .....	<b>1-8</b>
- Determinación de la velocidad de propagación del sonido (UNE - EN 14579:2005).....	2
- Determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta (UNE - EN 1936:2007).....	2-3
- Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica (UNE-EN 13755:2008).....	3-4
- Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad (UNE - EN 1925:1999).....	4
- Determinación del coeficiente de desorción libre de agua por evaporación.....	4-5
- Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial (UNE-EN 1926:2007).....	5-6
- Determinación de la resistencia a la heladicidad (UNE-EN 12371:2011).....	6-7
- Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico (UNE-EN 14066:2003).....	7-8
<b>4. Conclusiones</b> .....	<b>8-9</b>
<b>Anexo</b> .....	<b>10-15</b>

## 1. Introducción

A partir de la identificación, localización de las áreas extractivas y estudio petrográfico de los materiales empleados en la iglesia de San Pedro de La Mata, Sonseca (Toledo) (Fig. 1, anexo), realizada en la fase I del Proyecto: *Arqueología de la Arquitectura de la iglesia de San Pedro de la Mata, Sonseca (Toledo)*, se ha realizado en esta segunda fase la determinación de las propiedades físicas fundamentales, propiedades mecánicas y durabilidad de los materiales empleados en la construcción de este edificio histórico, con el fin de conocer su comportamiento, el estado actual de deterioro y evaluar futuras estrategias para su conservación.

Se han seleccionado en las áreas extractivas muestras de gran tamaño para la realización de los ensayos de caracterización (Fig. 2, anexo), de los dos materiales empleados mayoritariamente en la construcción del edificio, clasificados como monzogranito biotítico (*referencia: 5986-01*) y monzogranito (*referencia: 5986-02*), en el estudio petrográfico realizado en la fase I del proyecto.

## 2. Muestras

### - Referencia 5986-01

#### *Descripción macroscópica:*

Roca homogénea, compacta y coherente, leucocrática, inequigranular, con textura porfídica, con fenocristales prismáticos de feldespato y tamaños que en ocasiones superan los 3 cm, con cuarzo de tamaño medio y micas con cierta tendencia al agrupamiento.

#### *Descripción macroscópica:*

Textura porfídica, hipidiomórfica, holocristalina e inequigranular. El tamaño de la mayoría de los cristales es medio (2-3mm), los feldespatos presentan tamaños mayores. Como minerales esenciales presenta: cristales de plagioclasa (36%) como fenocristales o como componentes de la matriz de grano medio; cuarzo alotriomorfo (30%) que en ocasiones aparece como agregados policristalinos formados por individuos de hábito con cierta tendencia al redondeamiento; secciones subidiomorfas de feldespato potásico (25%); y como mineral máfico principal, biotita pardo-rojiza formando láminas subidiomorfas de buen tamaño, o bien moscovita en forma de agregados (9%). Como minerales accesorios, se ha identificado circón, como inclusiones en los cristales de biotita, con frecuentes halos de desintegración; y como secundarios, sericita por alteración de los feldespatos plagioclasas, más común en sus núcleos y clorita por alteración parcial de la biotita (Fig. 3, anexo).

*Clasificación: monzogranito*

### - Referencia 5986-02

#### *Descripción macroscópica:*

Roca homogénea, compacta y coherente, mesocrática, con textura fanerítica, equigranular de grano fino, con un mayor porcentaje en máficos que la muestra 5986-01, presenta oxidaciones apreciables.

#### *Descripción microscópica:*

Textura hipidiomórfica, holocristalina y equigranular, estando el tamaño de los cristales en el rango de grano fino (< 1 mm). En cuanto a su composición, se identifican como minerales esenciales: cristales de plagioclasa (35%), cuarzo subredondeados (30%), feldespato potásico (10%) y un gran porcentaje de minerales máficos, biotita (25%), en ocasiones con tendencia a estar agregados (Fig. 4, anexo).

*Clasificación: monzogranito biotítico*

## 3. Metodología, ensayos de caracterización y resultados

La metodología de trabajo dentro el campo de la Piedra Natural como material de construcción es muy variable en función de los objetivos del trabajo, en nuestro caso el plan de trabajo parte de la necesidad de caracterizar los materiales pétreos de uso constructivo histórico con el fin de obtener criterios e indicadores de la calidad de las rocas empleadas, adecuación de uso y durabilidad.

Inicialmente, en la primera fase de proyecto, se realizó un estudio bibliográfico sobre el contexto y características geológicas del entorno, y en el campo la identificación y estudio de los materiales pétreos empleados en la construcción y la localización de sus áreas extractivas. Determinando la procedencia de los materiales, en esta segunda fase se realizaron los muestreos representativos en los espacios de cantera, tomando precauciones a la hora de seleccionar los bloques, de manera que presenten la menor alteración y fisuración posible, con el fin de

establecer una relación directa con los materiales empleados en el edificio. A partir de los bloques convenientemente referenciados y orientados se tallaron las probetas para la realización de los diferentes ensayos.

Una vez acondicionadas las probetas, se realizaron diferentes ensayos normalizados para determinar las propiedades físicas, mecánicas y la durabilidad de estos materiales, realizándose los ensayos en todos los casos posibles según los protocolos indicados en las normas vigentes.

*Ensayos realizados en las muestras 5986-01; 5986-02*

- Determinación de la velocidad de propagación del sonido (UNE - EN 14579:2005)
- Determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta (UNE - EN 1936:2007)
- Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica (UNE-EN 13755:2008)
- Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad (UNE - EN 1925:1999)
- Determinación del coeficiente de desorción libre de agua por evaporación
- Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial (UNE-EN 1926:2007)
- Determinación de la resistencia a la heladicidad (UNE-EN 12371:2011)
- Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico (UNE-EN 14066:2003)
  
- ***Determinación de la velocidad de propagación del sonido (UNE - EN 14579:2005)***

La determinación de la velocidad de propagación de ultrasonidos, se ha realizado según las recomendaciones de la norma “Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la velocidad de propagación del sonido UNE - EN 14579:2005”. Esta técnica no destructiva permite determinar la existencia de anisotropías en el interior de los materiales, evaluar su durabilidad y su estado de deterioro.

Este ensayo se fundamenta en la variación que experimentan las ondas elásticas (longitudinales u ondas primarias) en su tránsito a través del material, los materiales utilizados han sido probetas cúbicas de 50 mm  $\pm$ 10mm de arista, sobre las que se ha medido la velocidad de propagación del sonido mediante el equipo CNS Farnel, modelo Pundit Plus. El aparato consta de dos transductores (emisor y receptor), que se sitúan en superficies planas del material y colocados paralelos entre sí. Las mediciones se han realizado sobre las mismas probetas, tanto secas como saturadas, en sentido perpendicular, paralelo a la anisotropía y en una dirección intermedia (X, Y, Z). Además cada medición se ha repetido para minimizar el error de la medida, el espesor de las probetas (ver informe de resultados) se ha medido con calibre de precisión.

Resultados obtenidos:

<i>Muestra</i>	<i>Velocidad de propagación media (Km/s)</i>
<b>5986-01</b>	2,93
<b>5986-02</b>	2,55

Tabla I. Valores medios de velocidad de propagación del sonido

La muestra 5986-01 presenta valores medios algo superiores a los de la muestra 5986-02, pero en ambos casos los valores de velocidad de propagación son bajos para materiales graníticos, estos valores inferiores pueden ser debidos a estados de alteración previos, por ser rocas seleccionadas en superficie.

- ***Determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta (UNE - EN 1936:2007)***

La determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta se ha realizado siguiendo la norma “Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la densidad aparente y la porosidad abierta UNE-EN 1936:2007”.

El objeto de estos ensayos es cuantificar la densidad aparente y porosidad abierta (volumen de poros comunicados) de las rocas ensayadas. Estos parámetros hídricos determinan el comportamiento del material frente al agua, siendo el agua un elemento de gran importancia para la caracterización tecnológica del material, ya que participa en la mayoría de los procesos de deterioro químicos, físico-químicos y biológicos que afectan a los materiales pétreos, generando una reducción de sus propiedades mecánicas.

Para ello se seleccionan seis probetas representativas del conjunto de la roca a ensayar, las probetas tienen forma cúbica de 50 mm de lado aproximadamente y se han obtenido por corte con sierra a partir de los bloques. Una vez secadas las probetas, a una temperatura de 70 °C

hasta masa constante, se pesan, (se considera que se ha alcanzado la masa constante cuando la diferencia entre las dos pesadas en un intervalo de 24 horas no es superior al 0.1% de la masa de la probeta). Las probetas han sido conservadas en un desecador hasta que alcanzaron la temperatura ambiente a la que se efectúa el ensayo.

Para la determinación de la porosidad abierta y densidad aparente se pesa cada probeta ( $m_d$ ), posteriormente las probetas se colocan en un recipiente de vacío y se disminuye de forma gradual la presión hasta 2 KPa = 15mm Hg, manteniéndose esta presión durante 2 horas para eliminar el aire en los poros abiertos en las probetas. A continuación se introduce lentamente agua desmineralizada aproximadamente a 20 °C en el recipiente de vacío, la velocidad a la que el agua asciende debe ser tal que la probeta quede sumergida completamente en un tiempo que supere los 15 minutos, la presión 2 KPa, se mantiene al introducir el agua. Una vez que todas las probetas estén sumergidas se restablece la presión atmosférica en el recipiente de presión y se dejan las probetas bajo el agua 24 horas a presión atmosférica. Para cada probeta se determina su peso bajo el agua y se anota la masa en el agua  $m_h$ , posteriormente se pasa rápidamente la probeta por un trapo húmedo y se determina la masa de la probeta saturada con agua,  $m_s$ . Con estos valores y mediante la relación entre la masa de la probeta seca y su volumen aparente se determina la densidad aparente:

$$\rho_b = (m_d / (m_s - m_h)) \times \rho_{rh}$$

Con la relación entre el volumen de los poros abiertos y el volumen aparente, se calcula la porosidad abierta mediante la siguiente ecuación:

$$p_o = ((m_s - m_d) / (m_s - m_h)) \times 100$$

Resultados obtenidos:

<i>Muestra</i>	<i>Densidad aparente (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Porosidad abierta (%)</i>
<b>5986-01</b>	2580	1,9
<b>5986-02</b>	2620	2,3

Tabla II. Valores medios de la densidad aparente y porosidad abierta

El monzogranito (ref. 5986-02) presenta una mayor densidad aparente que la muestra correspondiente al monzogranito biotítico (ref. 5986-01), con valores medios de 2620 y 2580 Kg/m<sup>3</sup> respectivamente y valores medios de incertidumbre de  $\pm 10$  para ambos, homogéneos para las seis probetas medidas por muestra. Estos valores son los que les corresponde a los granitos, que presentan densidades medias entorno a los 2600 Kg/m<sup>3</sup>, lo que hace que sean unas rocas con buenas prestaciones para la construcción, en el caso que nos ocupa los valores de densidad son óptimos para a priori un buen comportamiento mecánico.

En el caso de la porosidad abierta media (poros comunicados) la diferencia entre ambos materiales es sensiblemente mayor (0,4%), aunque ambos presentan valores muy bajos (> 4%). En el caso del monzogranito biotítico (ref. 5985-01) es de 1,9% frente al 2,3% de porosidad efectiva para el monzogranito (ref. 5986-01), en ambos el valor medio de la incertidumbre es de 0,2%. La porosidad abierta o accesible al agua proporciona información sobre el sistema poroso grueso que está comunicado con el exterior, los poros de mayor tamaño y sus valores condicionaran el comportamiento del material frente al agua que penetra y se aloja en el sistema poroso y por tanto su durabilidad como veremos mas adelante, en ambos casos los valores evidencia una muy baja porosidad que condicionará sus propiedades.

#### - **Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica (UNE-EN 13755:2008)**

Se ha determinado la absorción de agua a presión atmosférica siguiendo el procedimiento de ensayo descrito en la norma “Métodos de ensayo para piedra natural: Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica UNE-EN 13755:2008”, en el que la absorción se produce por succión y bajo el peso de la columna de agua, el frente húmedo avanza desde la superficie lateral hacia el núcleo interior. Como característica asociada a la porosidad de la roca, presenta también valores bajos (<1%) y coherentes con los resultados obtenidos de la porosidad abierta media. Los valores obtenidos de absorción media son 0,7% para el monzogranito biotítico (ref. 5986-01) y muy similar, 0,8% para el monzogranito (ref. 5986-02), en ambos casos con incertidumbres del valor medio de 0,1%, estos resultados evidencian la probabilidad de una menor susceptibilidad de estos materiales a la degradación, debido a esa baja capacidad para la absorción de agua y por tanto minimizar los procesos de deterioro asociados a la misma.

Resultados obtenidos:

<i>Muestra</i>	<i>Absorción de agua a presión atmosférica (%)</i>
<b>5986-01</b>	0,7
<b>5986-02</b>	0,8

Tabla III. Valores medios de la absorción de agua a presión atmosférica

- **Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad (UNE - EN 1925:1999)**

La determinación de la absorción de agua por capilaridad y del coeficiente de absorción capilar se ha realizado siguiendo las recomendaciones de la norma “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de absorción de agua por capilaridad UNE-EN 1925:1999”. Este ensayo muestra la velocidad y el volumen de agua que penetra en el interior de un sólido poroso mediante el mecanismo de succión capilar. La succión capilar del material depende tanto de su porosidad total como del grado de conexión y tamaño de los accesos de poros, siendo el mecanismo de succión capilar una de las principales formas de penetración tanto de humedad como de sales en la roca, siendo ambos agentes los principales responsables del desencadenamiento de diferentes procesos de degradación. Aunque el tamaño de poro es el factor principal, existen otros factores que ejercen una menor influencia tales como las condiciones ambientales (presión, temperatura, y humedad) y por supuesto la mineralogía de la roca.

Los gráficos y parámetros calculados a partir del ensayo de absorción capilar han sido:

Resultados obtenidos:

<i>Muestra</i>	<i>Coefficiente absorción de agua por capilaridad</i>
<b>5986-01</b>	6,07
<b>5986-02</b>	8,39

Tabla IV. Valores medios del coeficiente de absorción de agua por capilaridad

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad, que expresa la cantidad de agua absorbida y la rapidez con la que tiene lugar el proceso, este coeficiente varía dependiendo, es superior para el monzogranito (ref. 5986-02) que para el monzogranito biotítico (ref. 5986-01) con valores medios de 8,39 y 6,07 ( $\text{g/m}^2\text{s}^{0.5}$ ) e incertidumbre del valor medio de 1,17 y 1,21 respectivamente, aspecto que queda reflejado en las curvas de absorción capilar para ambos materiales. Estos resultados son coherentes con los valores de porosidad media, mayores para el monzogranito respecto al monzogranito biotítico.

Las gráficas de absorción capilar (Fig. 5 a 7, anexo) muestran la variación en el tiempo del contenido en agua del material adquirido por el mecanismo de succión capilar, se han elaborado curvas experimentales a partir de los resultados obtenidos para el ensayo de absorción capilar en un sistema de coordenadas X/Y para observar la evolución de la absorción capilar a lo largo del tiempo, representando el tiempo en el eje de abscisas y en el eje de ordenadas la masa de agua absorbida por unidad de superficie del área de la base de la probeta sumergida en metros cuadrados. El proceso de absorción se desarrolla en dos fases, la primera desde el instante cero al instante en que la humedad alcanza la cara superior, la segunda corresponde al avance del agua, una vez llena la red capilar principal, por los poros menos accesibles hasta que se alcanza la saturación. Estas dos fases se reflejan en la gráfica, la primera fase es más rápida y la absorción total en la misma es muy superior a la de la segunda, en las gráficas de las figuras 5 a 7 del anexo, se aprecia como la pendiente mayor de la primera rama de la gráfica que relaciona la absorción, en gramos por  $\text{m}^2$  de superficie expuesta, con la raíz cuadrada del tiempo en  $\text{s}^{0.5}$ , se corresponde con la primera fase de absorción e indica la rapidez con que ésta se produce y posteriormente disminuye en las siguientes fases hasta su saturación.

- **Determinación del coeficiente de desorción libre de agua por evaporación**

La práctica de ensayo de desorción libre de agua por evaporación, es similar a la del ensayo de absorción capilar y se ha realizado siguiendo la misma metodología, pero partiendo de la muestra saturada y finalizando el ensayo cuando esta alcanza la masa constante, al igual que el ensayo de absorción capilar presenta notables problemas de orden experimental para medir en este caso el avance de la salida de agua en la roca durante la duración del ensayo que se extiende varias semanas, su punto débil es la manipulación de la probeta que necesita

ser extraída del agua, actuación que va seguida de una eliminación mecánica del exceso de agua en superficie, además de la interrupción en los registros del proceso de desorción. Los resultados se expresan en la siguiente tabla:

Resultados obtenidos:

<i>Muestra</i>	<i>Coefficiente de desorción de agua</i>
<b>5986-01</b>	0,193
<b>5986-02</b>	0,190

Tabla V. Valores coeficientes de desorción de agua

En ambos casos, tanto para el monzogranito biotítico (ref. 5986-01) como para el monzogranito (ref. 5986-02) los resultados del coeficiente de desorción son muy similares, con valores de 0,193 y 0,190 respectivamente, alcanzando su punto crítico a las 0,77 h para el monzogranito biotítico y a las 1,55 h para el monzogranito. En las curvas de desorción (Fig 8 a 10, anexo) se aprecia este similar comportamiento respecto a los dos materiales, del análisis de las mismas se observa que se estabilizan en el mismo momento, instante en que el espacio poroso pierde el agua alojada en el mismo.

El proceso de desorción cobra gran importancia en los materiales pétreos y tiene una relación directa con su durabilidad, el hecho de que el material pétreo elimine el agua alojada en sus poros con facilidad, favorece su durabilidad, y evidencia una mayor conectividad en su sistema poroso, evitando interferencias del agua con el propio material, agente desencadenante de numerosas lesiones y alteraciones en el material pétreo. Por el contrario, en el caso de que el agua sea retenida en el sistema poroso, esta puede favorecer el deterioro de la roca y por tanto su durabilidad como material de construcción, dando lugar a lesiones que pueden comprometer sus propiedades mecánicas.

#### - **Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial**

El ensayo se ha realizado según el procedimiento descrito en la norma “Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial UNE-EN 1926:2007”. Los datos obtenidos mediante este ensayo nos marcan la carga máxima por unidad de superficie que puede soportar el material antes de su rotura. Este dato es determinante para valorar los posibles usos del material en función de los requerimientos específicos de cada uso, siendo de especial interés para aquellos productos de piedra natural que están sometidos a esfuerzos portantes o de compresión.

El ensayo se ha realizado sobre diez probetas ajustándose al procedimiento expuesto en la norma UNE-EN 1926:2007. Después de un refrentado de las superficies de compresión de las probetas, se colocan y centran sobre la placa de la máquina de ensayo. Las dimensiones de las probetas cúbicas ensayadas son de 50 mm de lado. Una vez colocada la probeta se aplica la carga de forma continua, uniformemente distribuida, con una velocidad de compresión de 1 MPa/s hasta que se produce la rotura. La resistencia a la compresión uniaxial (R) de cada probeta se define como la relación entre la carga de rotura de la probeta (F) y el área de la sección transversal (A) antes de ensayar, por medio de la ecuación:

$$R = F / A$$

Los resultados obtenidos:

<i>Muestra</i>	<i>Resistencia Compresión media (MPa)</i>
<b>5986-01</b>	210
<b>5986-02</b>	135

Tabla VI. Valores resistencia a la compresión media

Estableciendo comparaciones entre los dos materiales, los resultados obtenidos para las probetas ensayadas de las muestras estudiadas, evidencian un comportamiento frente a la compresión diferente, con valores medios de resistencia a la compresión de 210 MPa para las probetas ensayadas correspondientes a la muestra de monzogranito biotítico (5896-01) y un valor medio inferior de 135 MPa para las muestras referentes a el monzogranito (ref. 5986-02), con una incertidumbre del valor medio de 11 para la primera muestra y de 5 para la segunda. Por

otro lado, indicar que en el desarrollo del ensayo las probetas presentan buenas roturas, con desarrollo de conos de rotura desde los dos extremos de las probetas, excepto la probeta F14 de la muestra 5986-01 que presenta fractura irregular, al igual que la probeta F35 de la muestra 5986-02. Los resultados obtenidos para la compresión son coherentes con los resultados de los ensayos anteriormente expuestos, presentando el monzogranito (ref. 5986-02) un peor comportamiento mecánico frente a la compresión que el monzogranito biotítico (5986-01).

- **Determinación de la resistencia a la heladicidad**

El ensayo se ha realizado según el procedimiento descrito en la norma “Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia a la heladicidad UNE-EN 12371:2011”. El ensayo de heladicidad consiste básicamente en someter una serie de muestras de roca a sucesivos ciclos de congelación (hielo) y descongelación (deshielo), con el objetivo de evaluar la resistencia a las heladas de dicha roca y la influencia del agua en su transformación de líquido a sólido en el sistema poroso y la incidencia de este cambio de volumen en la roca. En muchas ocasiones y en mayor medida en aquellas zonas en las que los inviernos son rigurosos, como es el caso de Sonseca (Toledo), la acción destructiva del hielo es importante, y sus cambios en volumen al pasar de fase líquida a fase sólida producen la progresiva fatiga del material pétreo hasta su deterioro final (gelifracción).

Con la finalidad de evaluar el grado de deterioro que han sufrido las probetas, además de realizar una inspección visual detallada de su superficie y calcular su pérdida de peso, se determina la velocidad de propagación del sonido en las tres direcciones en dos momentos: al inicio del ensayo y en su finalización (56 ciclos), rompiéndose finalmente las probetas mediante carga compresiva uniaxial, para determinar su resistencia tras el ensayo de heladicidad.

Los resultados obtenidos para las muestras se presentan en la siguiente tabla:

<i>Muestra</i>	<i>Variación media Volumen aparente (%)*</i>	<i>Velocidad de propagación media antes (Km/s)</i>	<i>Velocidad de propagación media después (Km/s)</i>	<i>Variación media de la velocidad propagación (%)**</i>	<i>Variación media de la pérdida en peso (%)***</i>
<b>5986-01</b>	-0,016	2,91	2,89	-0,6	-0,008
<b>5986-02</b>	-0,027	2,42	2,45	1,1	-0,021

\*Incertidumbre de la variación media del volumen aparente (%):      **-muestra 5986-01: 0,025**      **- muestra 5986-02: 0,028**

\*\*Desviación estándar de la variación de propagación media (%):      **-muestra 5986-01: 0,8**      **- muestra 5986-02: 1,0**

\*\*\*Incertidumbre del valor medio de la pérdida de peso (%):      **-muestra 5986-01: 0,004**      **- muestra 5986-02: 0,014**

Tabla VII. Valores obtenidos en relación con el ensayo de heladicidad

Para las probetas correspondientes a la muestra 5986-01, monzogranito biotítico, tras el ensayo de heladicidad se produce una sensible disminución media del volumen aparente del material -0,016%, valor inferior al de la disminución provocada en la muestra 5986-02 del monzogranito que presenta un valor medio tras el ensayo de sus probetas de -0,027%, para las dos muestras la reducción es poco significativa. En cuanto a la velocidad de propagación media, en el caso del monzogranito biotítico (ref. 5986-01) se produce una disminución sensiblemente menor de la velocidad relacionada con el deterioro progresivo que ha sufrido el material, pasando de valores de 2,91 km/s antes del ensayo a 2,89 km/s tras los 56 ciclos y para el monzogranito (ref. 5985-02) un ligero aumento de la velocidad de 2,42 a 2,45 Km/s, hecho que entra en el rango de la medición, o bien, debido a que se pudo haber tapizado el espacio poroso como consecuencia del residuo pulvarento del deterioro ocasionado en las muestras por el efecto hielo/deshielo. La disminución de la velocidad está en relación con el deterioro progresivo que ha sufrido el material, véase también los efectos de la heladicidad en los materiales ensayados que presentan una variación de pérdida de peso de -0,021% para el monzogranito y -0,008% para el monzogranito biotítico.

Posteriormente a los 56 ciclos de los que consta el ensayo de heladicidad, se someten las probetas a su rotura por compresión, para evaluar su comportamiento mecánico una vez sufrido el envejecimiento del material por la acción del hielo/deshielo, dando los siguientes valores medios:



Resultados obtenidos:

<i>Muestra</i>	<i>Resistencia Compresión antes de la heladicidad (MPa)</i>	<i>Resistencia Compresión después de la heladicidad (MPa)</i>
<b>5986-01</b>	210	197
<b>5986-02</b>	135	130

Variación de la resistencia a la compresión (%):      -**muestra 5986-01:** -6,2                                      - **muestra 5986-02:** -3,7  
Incertidumbre de la variación (%):                      -**muestra 5986-01:** 9,9                                      - **muestra 5986-02:** 5,1

Tabla VIII. Valores resistencia a la compresión, antes y después de los 56 ciclos de heladicidad

La muestra monzogranito biotítico (ref. 5986-01) presenta una variación de la resistencia a la compresión de -6,2 % frente al -3,7% para el monzogranito (ref. 5986-02), viéndose por tanto sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) algo más afectadas en el primer material por el fenómeno de heladicidad. En cualquier caso, el comportamiento de los dos materiales frente a la heladicidad es bueno, no produciéndose cambios significativos en el seno del material a través del análisis de los resultados de la velocidad de propagación, pérdida de peso y tampoco en su superficie, en los que no se aprecian cambios significativos tras el ensayo de heladicidad (ver informe, documentación gráfica).

- **Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico**

El ensayo se desarrolló según el procedimiento indicado en la norma “Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico UNE-EN 12371:2011 UNE-EN 14066:2003”. La determinación de la resistencia al choque térmico aporta información sobre la mayor o menor tendencia a la degradación de los materiales rocosos a causa de las fluctuaciones hígricas. Para determinar el grado de deterioro al que han sido sometidas las muestras, se realiza una inspección visual detallada de las probetas, se calcula su pérdida de peso, se determina la velocidad de propagación del sonido antes y después del ensayo (20 ciclos) y se rompen las probetas mediante carga compresiva uniaxial. Siendo los resultados los que se detallan en la siguiente tabla:

<i>Muestra</i>	<i>Velocidad de propagación media antes (Km/s)</i>	<i>Velocidad de propagación media después (Km/s)</i>	<i>Variación media de la velocidad propagación (%)*</i>	<i>Variación media de la pérdida en peso (%)**</i>
<b>5986-01</b>	3,08	2,89	-6,0	-0,013
<b>5986-02</b>	2,41	2,32	-3,9	-0,016

\*Desviación estándar de la variación de propagación media (%):      -**muestra 5986-01:** 1,2                                      - **muestra 5986-02:** 1,6  
\*\*Incertidumbre del valor medio (%):                                      -**muestra 5986-01:** 0,004                                      - **muestra 5986-02:** 0,004

Tabla IX. Valores obtenidos en relación con el ensayo de choque térmico

Para el monzogranito biotítico (ref. 5986-01), tras el ensayo de choque térmico se produce una variación media de la velocidad de propagación de -6,0% frente al -3,9% para la muestra de monzogranito (ref. 5986-02), esta disminución en la velocidad de propagación está directamente relacionada con el mayor deterioro progresivo que ha sufrido el material por acción de la temperatura en el desarrollo del ensayo, pasando para el monzogranito biotítico de valores de 3,08 km/s antes del ensayo a 2,89 km/s tras los 20 ciclos, frente al monzogranito con un decrecimiento de la velocidad de 2,41 a 2,32 Km/s. Respecto a la variación media de la pérdida de peso presentan valores de -0,013% para el monzogranito biotítico, frente al -0,016% del monzogranito, un -0,003% inferior este último, siendo todos ellos valores muy bajos, que evidencian un buen comportamiento frente al envejecimiento por choque térmico.

Posteriormente a los 20 ciclos de choque térmico se someten las probetas a su rotura por compresión, para evaluar así su comportamiento mecánico tras el ensayo de envejecimiento.

Resultados obtenidos:

<i>Muestra</i>	<i>Resistencia Compresión antes del choque térmico (MPa)</i>	<i>Resistencia Compresión después del choque térmico(MPa)</i>
<b>5986-01</b>	210	208
<b>5986-02</b>	135	130

Variación de la resistencia a la compresión (%):      **-muestra 5986-01: -1,0**                      **- muestra 5986-02: -3,7**  
Incertidumbre de la variación (%):                      **-muestra 5986-01: 11,3**                      **- muestra 5986-02: 7,6**

Tabla X. Valores resistencia a la compresión, antes y después de los 20 ciclos del ensayo de choque térmico

El monzogranito biotítico (ref. 5986-01) presenta una variación de la resistencia a la compresión de -1,0 % frente al -3,7% para el monzogranito (ref. 5986-02), que se ve más afectado en sus propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) por el deterioro por choque térmico. En cualquier caso, el comportamiento de los dos materiales frente al choque es bueno, no produciéndose cambios significativos en el interior del material pétreo y mediante la inspección visual de sus superficies en el desarrollo del ensayo, se señala como único cambio significativo el aumento en la tonalidad de las oxidaciones en aquellas muestras que inicialmente las presentaban (ver informe, documentación gráfica).

#### **4. Conclusiones**

Los ensayos normalizados de caracterización tecnológica son la herramienta que permite obtener datos objetivos para poder evaluar la idoneidad de uso de un material pétreo, aportando información sobre su aplicación y comportamiento a lo largo de su vida útil. Los materiales empleados en la construcción de la iglesia de San Pedro de La Mata, han sido clasificados como monzogranito biotítico (ref. 5986-01) y monzogranito (ref. 5986-02) y se han determinado sus principales propiedades físicas, mecánicas, así como su durabilidad.

Los valores de densidad aparente entorno a los 2600 Kg/m<sup>3</sup> para ambos materiales, son óptimos para un buen comportamiento mecánico, los valores de porosidad abierta o accesible al agua son bajos (> 4%), siendo en el monzogranito biotítico de 1,9%, frente al 2,3% de porosidad efectiva para el monzogranito, esta baja porosidad condiciona la entrada de agua al sistema poroso y por tanto la durabilidad de los materiales. En cuanto a los valores obtenidos de absorción media, capilar y desorción, los resultados evidencian una menor susceptibilidad de estos materiales a la degradación, debido a una baja capacidad para la absorción de agua, 0,7% de absorción media para el monzogranito biotítico, y 0,8% para el monzogranito, y coeficientes de absorción de 6,07 para el monzogranito biotítico y 8,39 para el monzogranito, siendo los coeficientes de desorción de 0,193 y 0,190 respectivamente. Estos resultados a priori favorecen la durabilidad de los materiales ensayados, siendo recomendable el estudio de la geometría del sistema poroso para afinar más en la posibles incidencias entre las propiedades hídricas de los materiales estudiados y su degradación.

Respecto a los valores medios de resistencia a la compresión obtenidos, el monzogranito biotítico presenta una mejor comportamiento mecánico frente a los esfuerzos compresivos, con valores de 210 MPa, frente a la muestra de monzogranito que tiene un valor medio de 135 Mpa.

Finalmente, para determinar la durabilidad de estos materiales se realizaron los ensayos de determinación de la resistencia a la heladicidad y al choque térmico. Los 56 ciclos de hielo/deshielo del ensayo no provocan cambios significativos en las probetas ensayadas para ninguno de los dos materiales, los valores de variación media de volumen son bajos, -0,016% para el monzogranito biotítico y -0,027% para el monzogranito, así como los valores medios de pérdida de peso, -0,008% para el monzogranito biotítico y 0,021% para el monzogranito. La resistencia frente a la compresión de estos materiales después del ensayo de heladicidad, decrece en un 6,2% en el caso del monzogranito biotítico, y en un menor rango 3,7% para el monzogranito.

Respecto a los efectos del choque térmico en los materiales estudiados, los cambios en superficies ocasionados por el efecto de la temperatura no son sustanciales, únicamente se detecta un aumento en la tonalidad de las oxidaciones en aquellas probetas que inicialmente las presentaban. En cuanto a los valores obtenidos de pérdida de peso, son bajos, siendo de -0,013 % para el monzogranito biotítico y -0,016% para el monzogranito. Y la variación de su resistencia a la compresión es menor que la producida por la heladicidad, siendo de -1,0% para el monzogranito biotítico y -3,7% para el monzogranito.

Los efectos producidos por los ensayos de envejecimiento, nos ponen en riesgo la capacidad mecánica (resistencia a la compresión) de los materiales estudiados, y los cambios producidos en su superficie son mínimos, a excepción del aumento de la tonalidad en las zonas con presencia de oxidaciones.

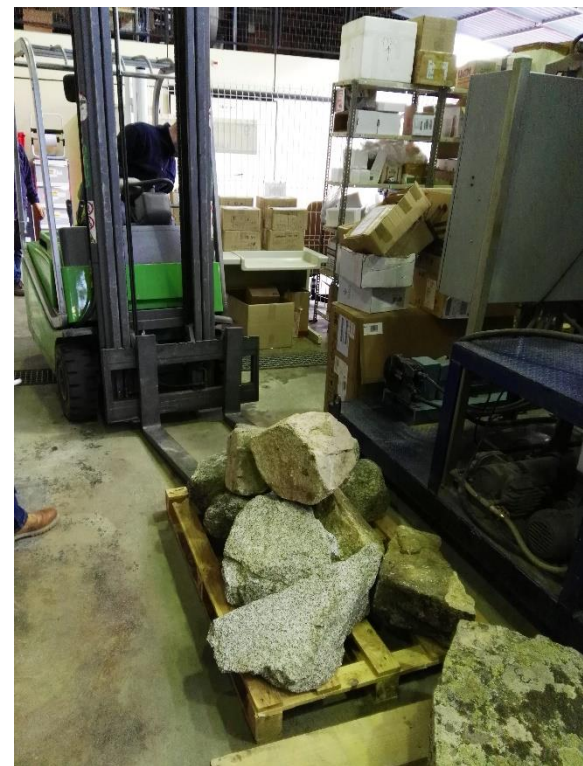
En Madrid a 28 de agosto de 2017

## ANEXO FIGURAS





*Fig. 1. Vista general de San Pedro de la Mata, Sonseca (Toledo)*



*Fig. 2. Bloques seleccionados en cantera para la realización de los ensayos de caracterización*



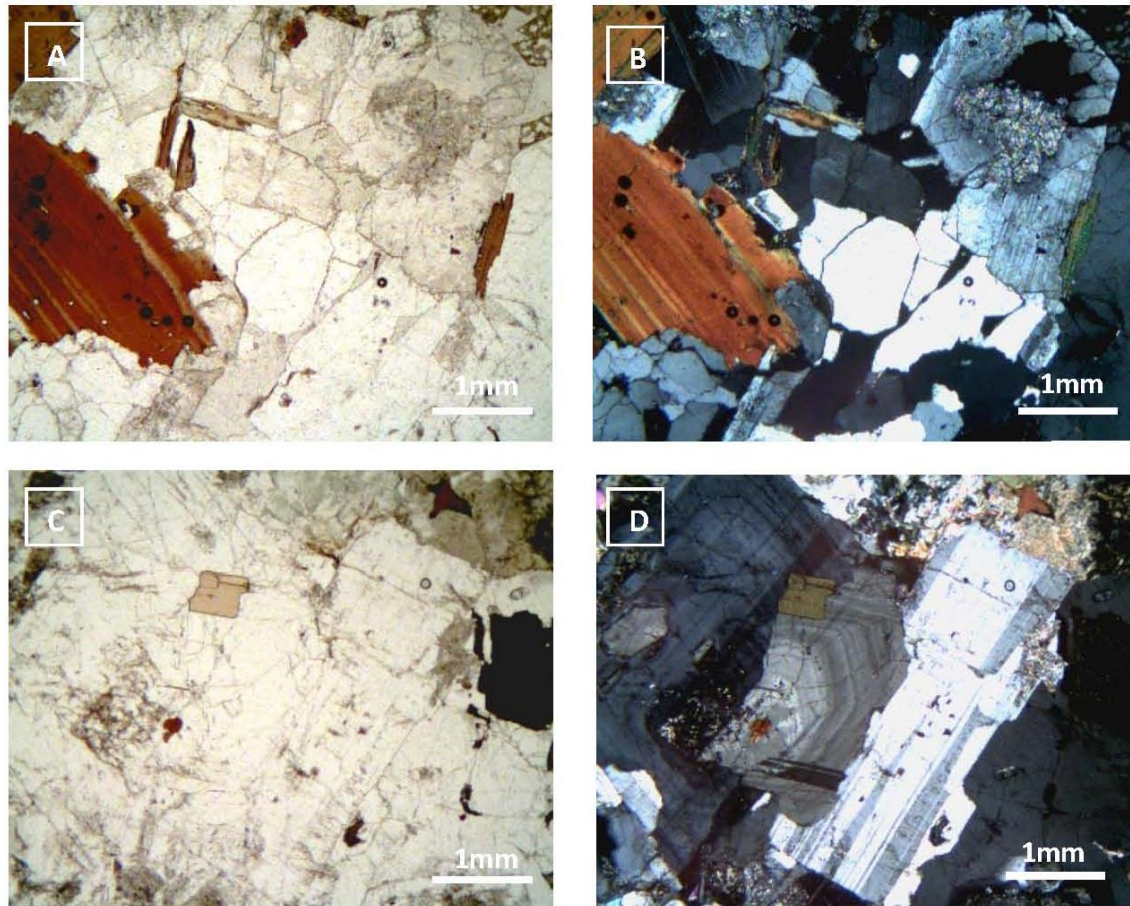


Fig. 3. Microfotografías monzogranito: A,C aspecto textural con nicols paralelos; B,D aspecto textural con nicols cruzados

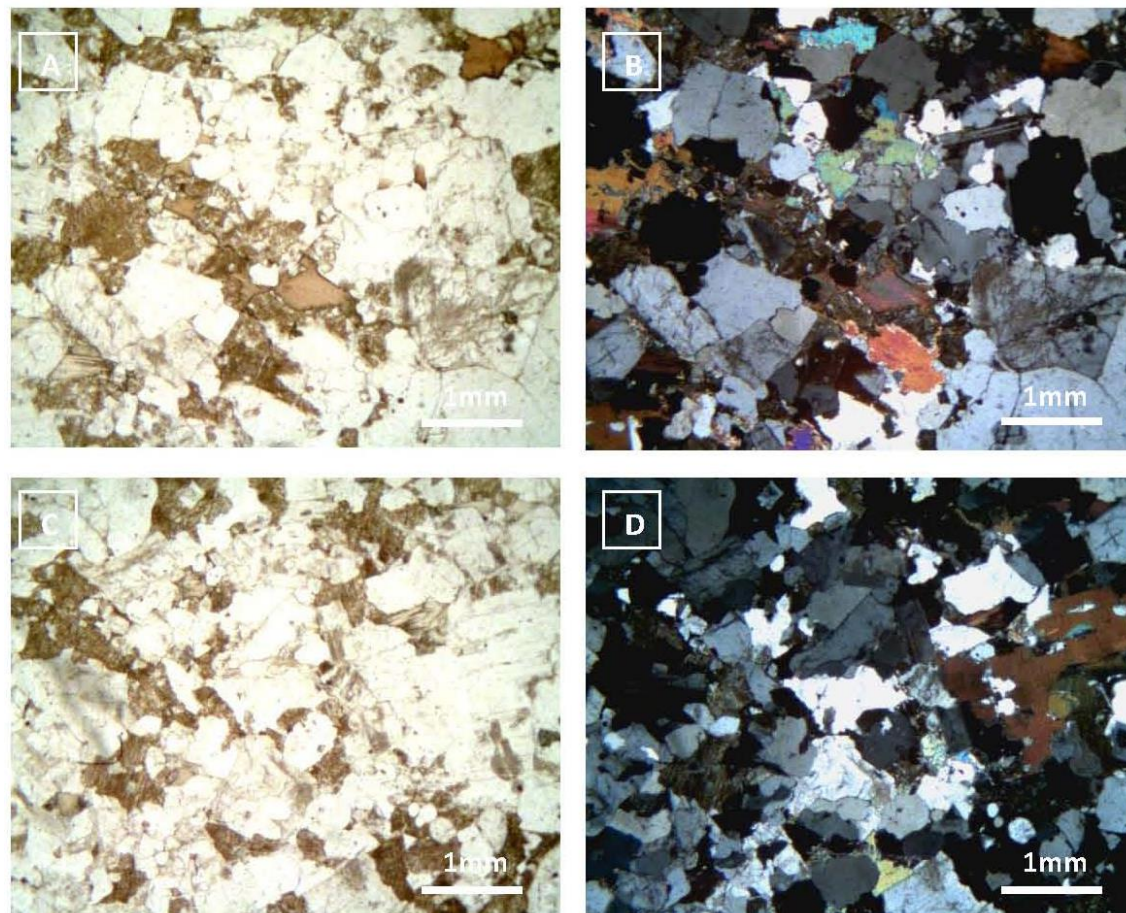


Fig. 4. Microfotografías monzogranito biotítico: A,C aspecto textural con nicols paralelos; B,D aspecto textural con nicols cruzados

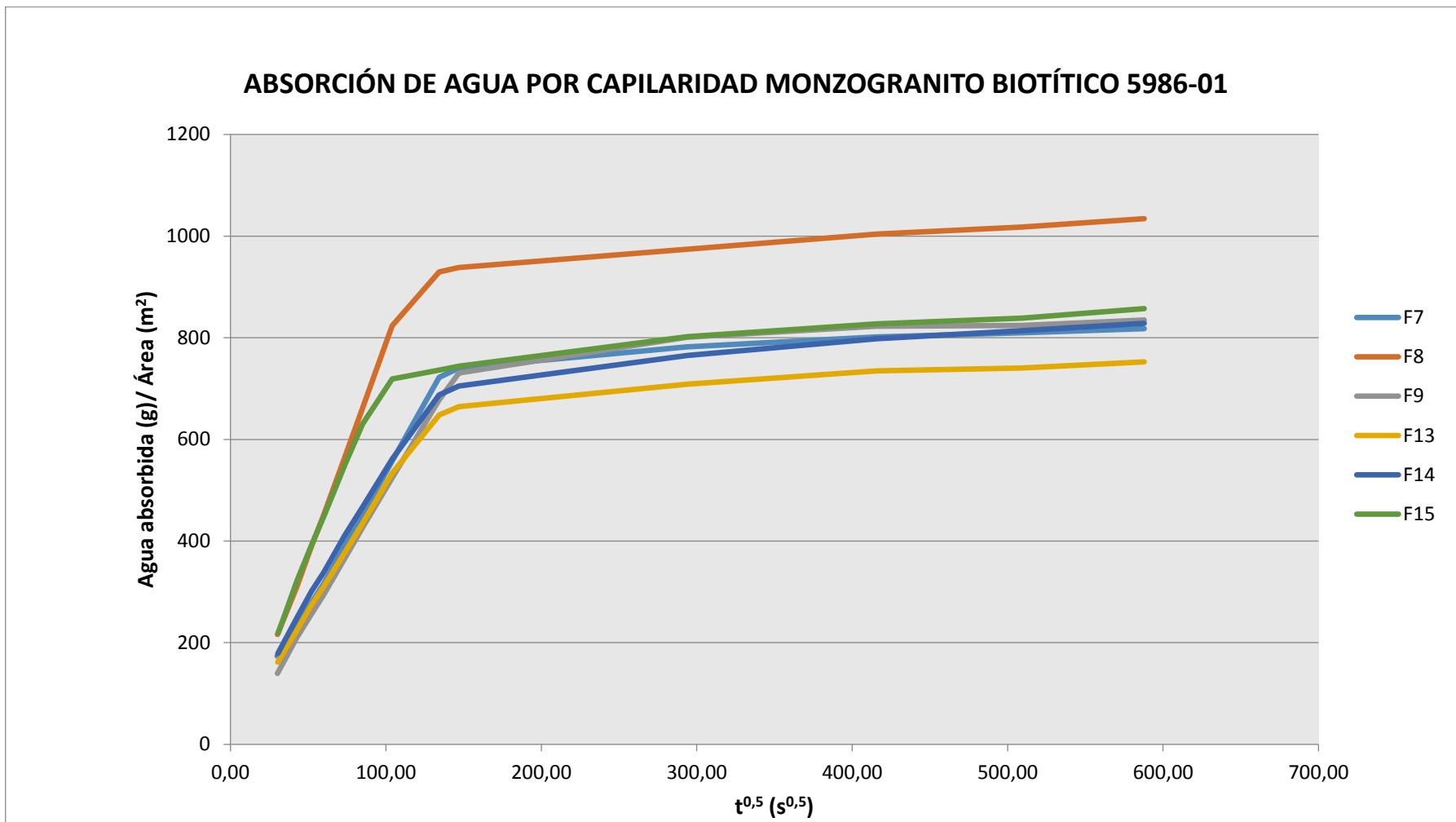


Fig. 5. Curvas de absorción capilar para cada probeta de la muestra de monzogranito biotítico

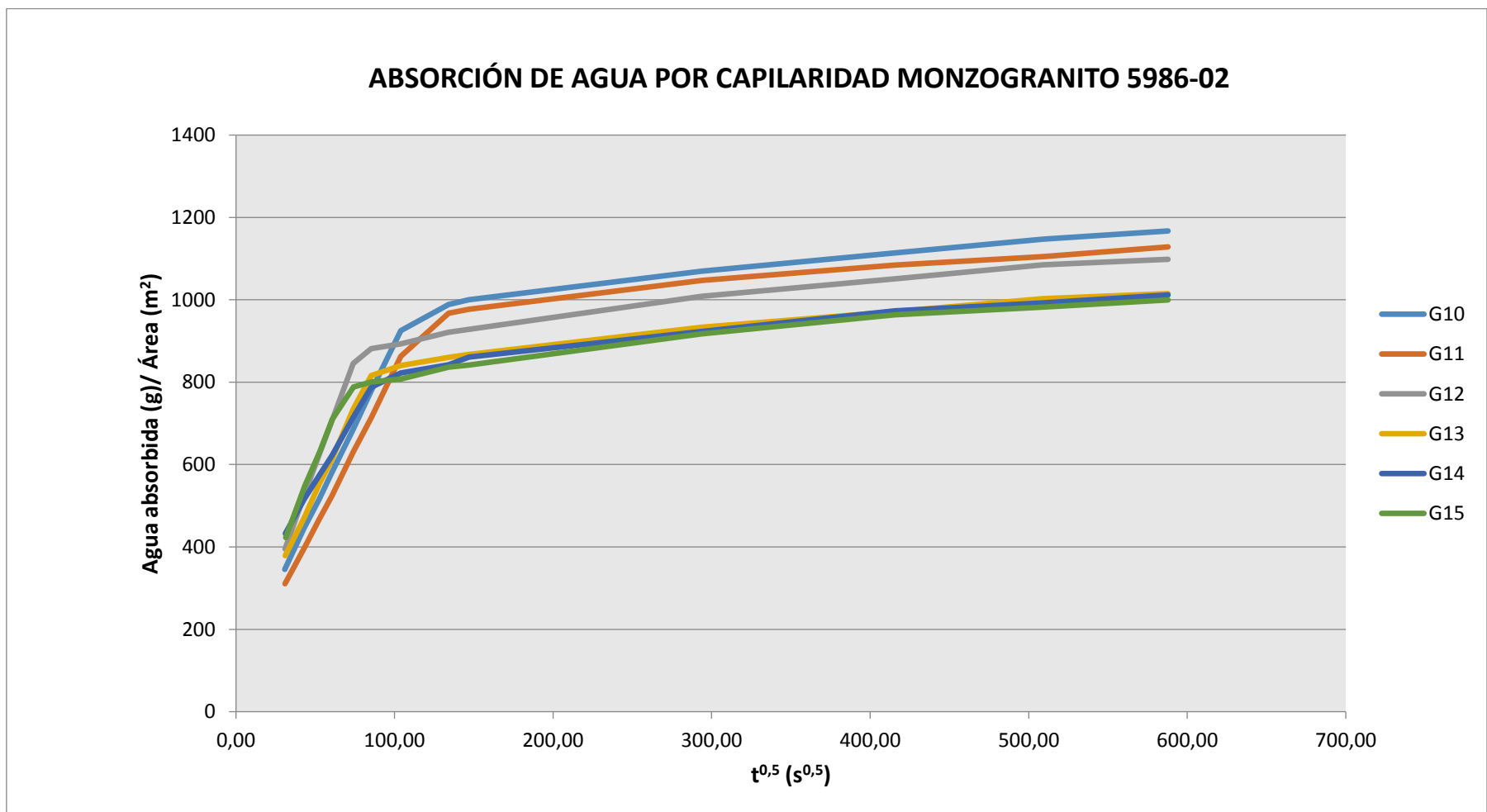


Fig. 6. Curvas de absorción capilar para cada probeta de la muestra de monzogranito



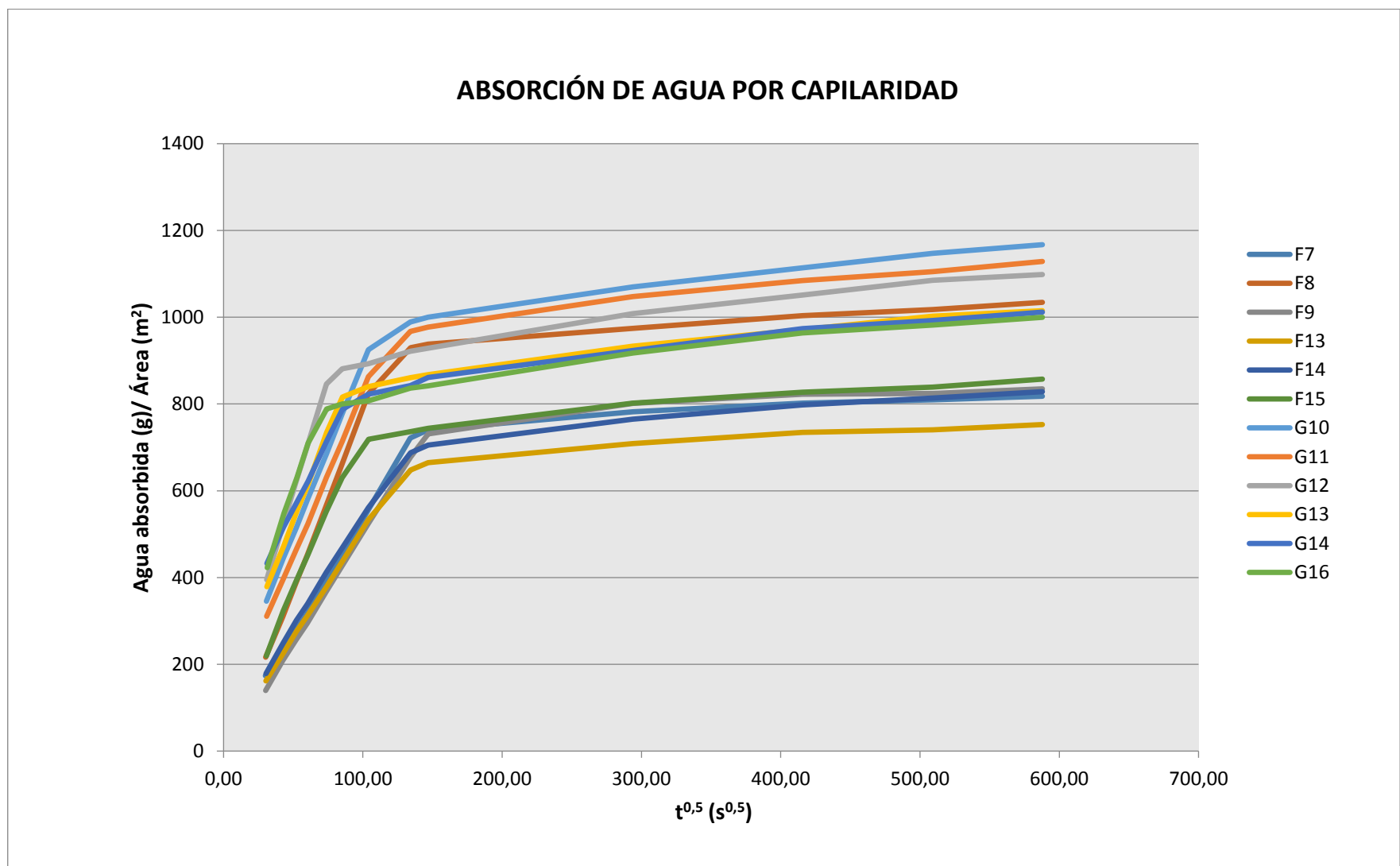


Fig. 7. Curvas de absorción capilar para cada probeta del conjunto de muestras representativas de los dos materiales estudiados.

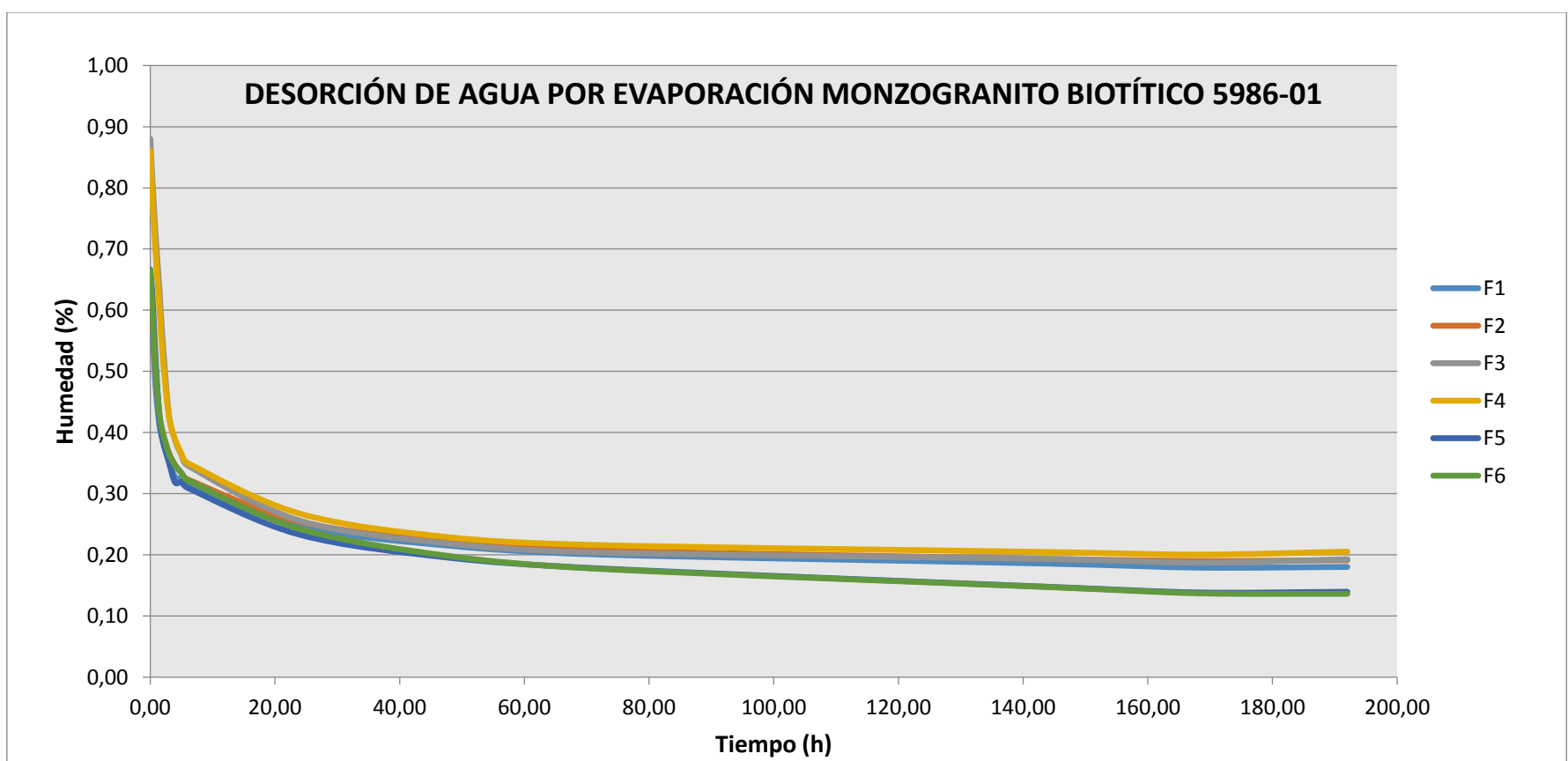


Fig. 8. Curvas de desorción para cada probeta de la muestra de monzogranito biotítico



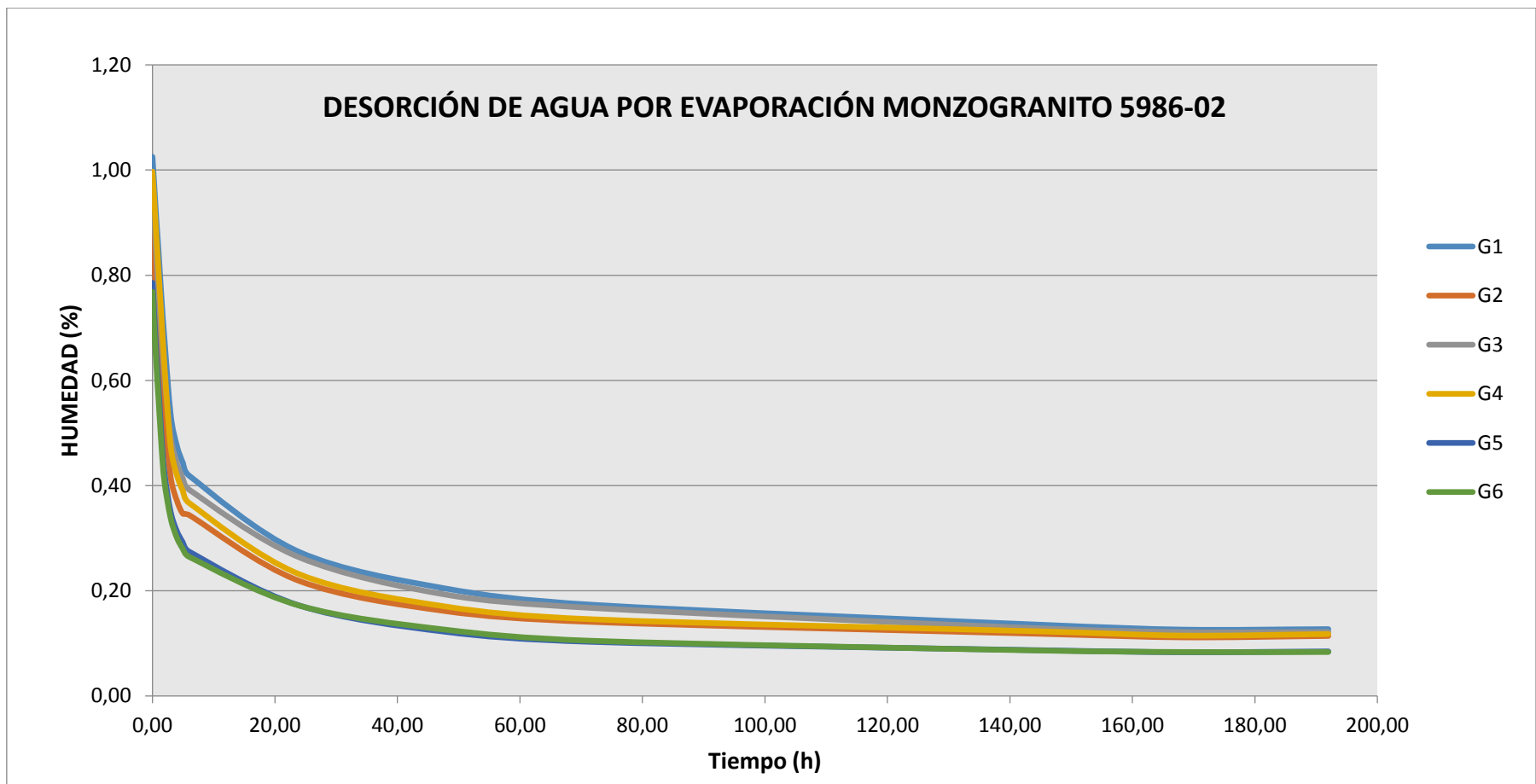


Fig. 9. Curvas de desorción para cada probeta de las muestras representativas del monzogranito

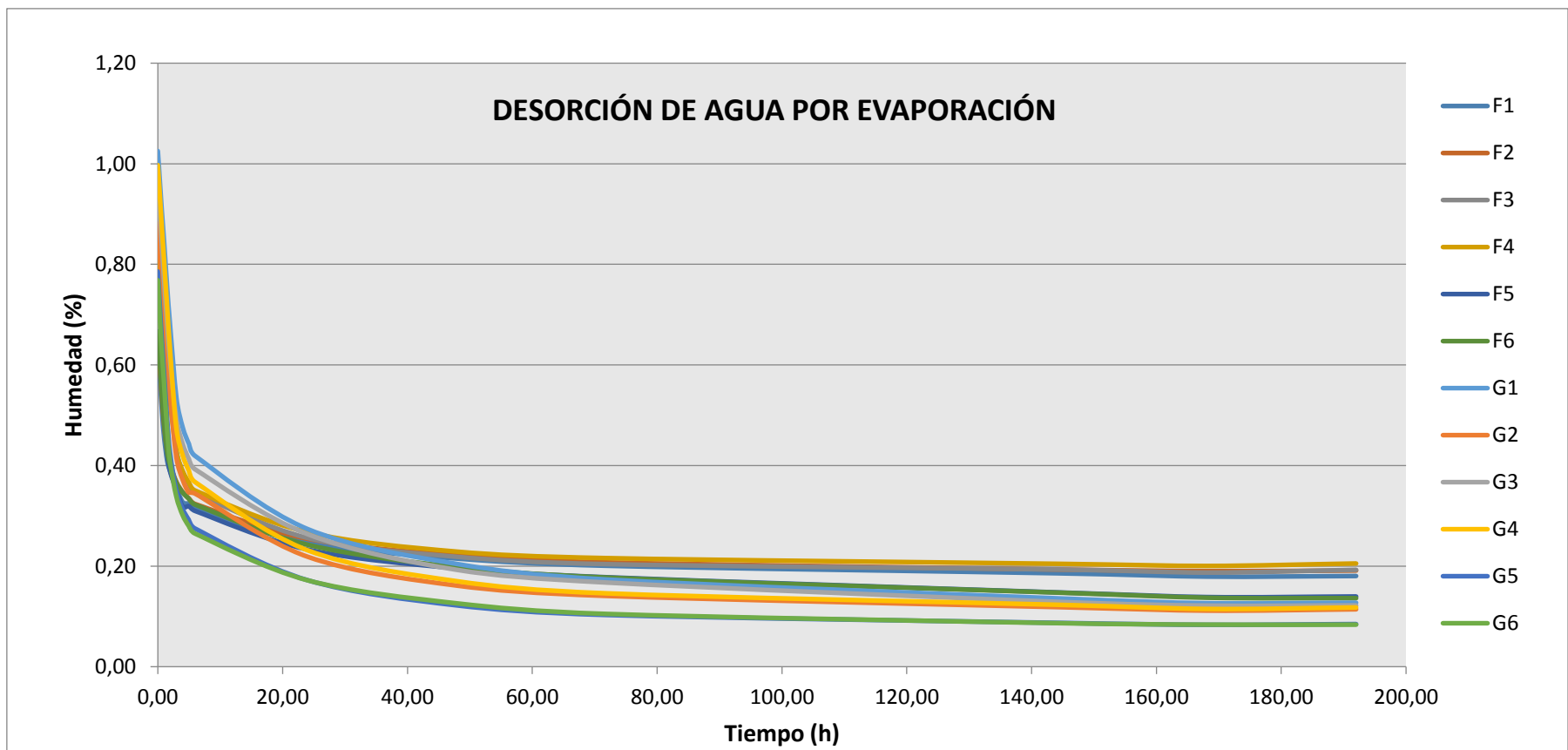


Fig. 10. Curvas de desorción capilar para cada probeta del conjunto de muestras representativas de los dos materiales estudiados.