

# Capítulo

# 5

**Ensayos con  
áridos**



## 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la metodología seguida para la realización de los ensayos correspondientes a las series experimentales con áridos, asimismo se muestran y analizan los resultados obtenidos.

En primer lugar se presentan los ensayos realizados en la Etapa Preliminar, la cual representa el primer acercamiento al estudio de las condiciones de la temperatura sobre las propiedades de los áridos. En este caso solamente se ha utilizado la información correspondiente a las condiciones de verano. Los resultados obtenidos han servido para definir las líneas de investigación posteriores con áridos.

Posteriormente se presentan los estudios de absorción de los áridos. Dichos estudios comprenden la capacidad de absorción del árido bajo dos tiempos de saturación: 30 minutos y 24 horas. Estos estudios se han hecho sobre gravas y arenas de diferente clasificación granulométrica y con tres diferentes condiciones climatológicas: referencia, verano e invierno.

Después, se presentan los aspectos estudiados sobre la compactación dinámica (vibratoria) de los áridos. En dicho estudio se trata de observar y caracterizar el comportamiento de los áridos bajo energía de compactación vibratoria y bajo las tres diferentes condiciones térmicas. Al igual que en los ensayos anteriores con áridos, estos ensayos se han hecho sobre las cuatro principales clasificaciones y sobre una mezcla de todos los áridos que corresponde a la curva granulométrica del diseño del hormigón empleado en el **Capítulo 4**.

Asimismo, se realizaron ensayos de inercia térmica de los áridos, con el objeto de conocer que desplazamientos (en temperatura y en tiempo) sufría una masa de áridos respecto a la temperatura ambiental. En este caso solo se realizó una simulación en laboratorio de las condiciones de verano y los ensayos fueron hechos sobre los dos tamaños granulométricos de áridos que mayor proporción presentan en el hormigón convencional.

Por último, se realizó una serie de ensayos para determinar la influencia de la temperatura ambiental y el contenido de humedad de los áridos sobre las propiedades y el comportamiento intrínseco de éstos, mediante la determinación de algunas propiedades físicas de las arenas. Paralelamente y utilizando arena de 0-5 mm, se fabricaron morteros bajo tres condiciones climáticas (referencia, verano e invierno) en función de la temperatura y humedad relativa para medir en ellos la trabajabilidad y la resistencia a compresión. En esta serie se presentan y analizan los resultados obtenidos y se extraen las conclusiones principales.

En todos los casos se presentan las conclusiones específicas y finalmente se presenta una discusión y las conclusiones generales.

## **5.2 ETAPA PRELIMINAR**

En un primer momento, se realizó esta serie de ensayos debido a la suposición de que la diferente absorción de agua de las arenas (finos) en función de las condiciones climáticas es un factor principal en los comportamientos observados en el hormigón. Debido a esto, se propuso estudiar el efecto de la temperatura ambiental en la velocidad de absorción de los áridos en función del tiempo.

Como primera parte se decidió realizar este estudio sobre los áridos finos (arenas) y en base a los resultados ampliarlo a los áridos gruesos (gravas). En esta primera etapa, el estudio corresponde a diferentes ensayos de absorción, porosidad, humedad y nivel de saturación en función del tiempo. Cabe mencionar que los resultados obtenidos fueron fundamentales para la continuidad de los ensayos, ya que se fueron tomando decisiones en el plan de trabajo conforme se iban obteniendo resultados.

Asimismo, el diseño y secuencia del plan de trabajo posterior en los ensayos con áridos, sigue una pauta progresiva de avance en función de los resultados obtenidos y su análisis, en cada una de las etapas estudiadas.

### **5.2.1 Introducción y objetivos**

El presente apartado tiene por objeto definir la metodología seguida para realizar las pruebas de absorción de la arena. Lo que se pretende alcanzar en este estudio es la influencia de la temperatura en la demanda de agua de los áridos, especialmente la correspondiente a la arena (fracción fina de los áridos), que es la que mayor repercusión tiene en el comportamiento del hormigón. Asimismo presentar los resultados analizando cada uno de ellos y en su conjunto, haciendo las conclusiones pertinentes y más significativas.

### **5.2.2 Simulación de las condiciones climáticas y ciclos utilizados**

Este estudio fue realizado en las instalaciones de PROMSA, en la cámara climática descrita en el **Capítulo 3**, dicho ensayo fue realizado el día martes 28 de Mayo de 2002. La cámara climática fue programada a una temperatura constante de 37,5 °C debido a que se pretendía saber la tasa de absorción en función del tiempo bajo las condiciones de temperatura más críticas, en este caso las de verano.

La arena corresponde a un material calizo de clasificación granulométrica 0-5 mm (ver **Anejo A**), la cual estuvo almacenada a esta temperatura 3 días antes de realizar estos ensayos por lo que la humedad natural fue disminuida por el efecto de la temperatura relativamente alta, considerándose esta prácticamente nula.

### 5.2.3 Equipo utilizado para hacer los ensayos

Para realizar esta serie de ensayos se utilizó el siguiente equipo:

- Matraz con capacidad de 1.250 ml y graduaciones a partir de los 1.000 ml a cada 10 ml.
- Báscula electrónica.
- Bandejas metálicas.
- Recipiente metálico y dispositivo para la obtención del contenido de aire, utilizado normalmente para medir el contenido de aire del mortero u hormigón.

### 5.2.4 Variables estudiadas, procedimiento experimental y resultados

Las variables que fueron estudiadas y los procedimientos experimentales seguidos en esta campaña experimental se enumeran a continuación, detallando en cada uno de ellos los procedimientos seguidos.

#### Determinación de la tasa de absorción de la arena

##### *Tasa de absorción estática*

Para determinar la tasa de absorción estática de la arena, se procedió como se indica a continuación: el matraz se llenó con 250 ml de agua y posteriormente se vertió la arena (1.793 gr). Después se agregaron 208 ml adicionales de agua hasta llegar a la marca de 5 ml (por encima del origen, tal como puede verse en la **figura 5.1**) y se agitó el matraz para que el agua cubriera los vacíos entre partículas de arena. El resultado de esta agitación fue una turbidez y la aparición de espuma en la parte superior.

Para analizar la variación en el tiempo, se hicieron mediciones del volumen del matraz en intervalos de tiempo, cada 5 minutos hasta los 20 minutos en total. Los resultados obtenidos se muestran en la **figura 5.2**.

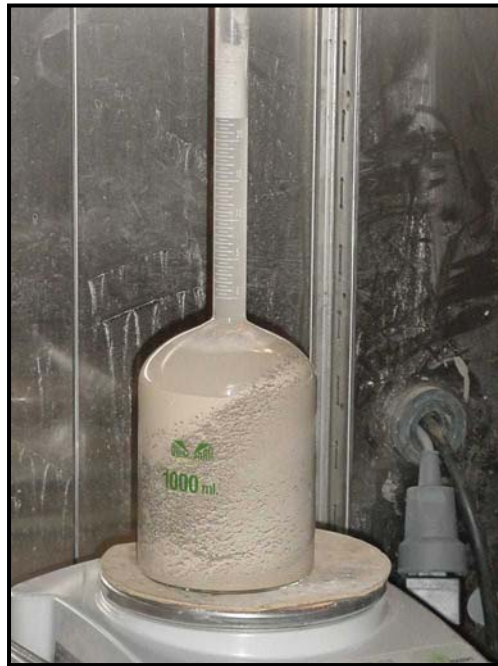


Figura 5.1.- Matraz utilizado para la absorción de la arena

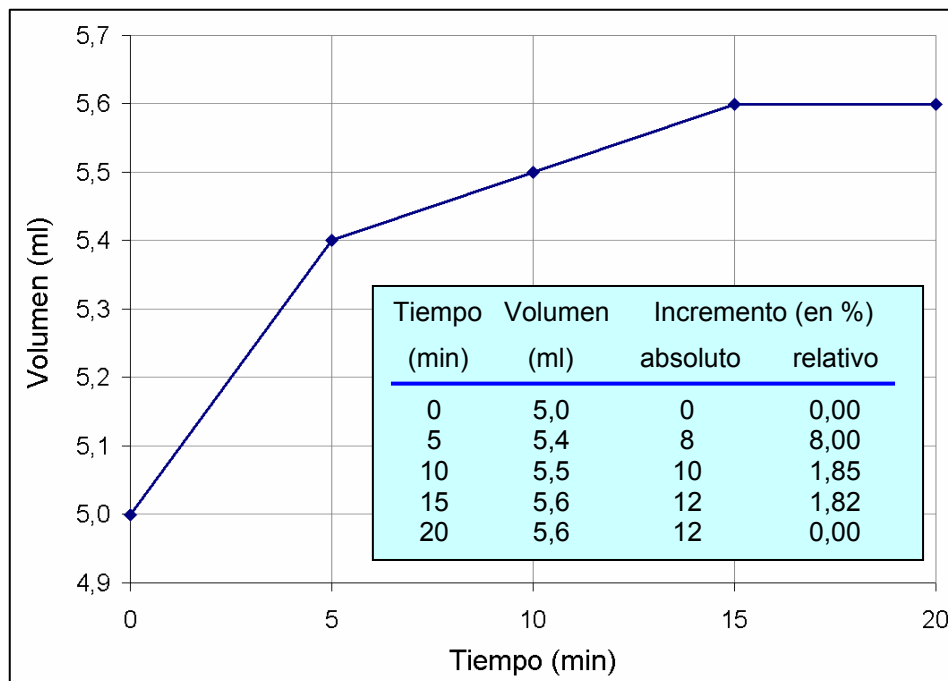


Figura 5.2.- Variación del incremento de volumen estático de la arena con el tiempo

En la figura anterior se observa un aumento de volumen de la mezcla de arena y agua en estado estático, siendo mayor en los primeros 5 minutos (el aumento corresponde a un 8%) para, posteriormente, irse reduciendo estos incrementos. El resultado nulo del intervalo entre 15 y 20 minutos no es significativo, ya que en la realidad fue pequeño correspondiente al segundo decimal, si bien se ha estimado como nulo.

Esta variación con el tiempo parece lógica (disminuye la pendiente con el tiempo), si bien no es tan clara la interpretación de que ello suponga un incremento de volumen, como se manifiesta en la figura. Ello podría significar, un cierto aumento del volumen de los áridos (hinchamiento de los mismos en contacto con el agua) o bien, la modificación de los meniscos de contacto del agua con los áridos.

Una vez finalizado el ensayo estático, y de forma informal, sin un método científico definido, aunque interesante desde el punto de vista técnico, se agitó suavemente (manteniendo inclinado el matraz, simulando el comportamiento de un camión cuba girando) durante 5 minutos, bajando el nivel de agua por debajo de la referencia (0 ml). A continuación se le añadieron 25 gramos de agua, alcanzándose el nivel de 22,75 ml en la regla escalada existente en el cuello del matraz. Con posterioridad se mantuvo estático durante 10 minutos, midiéndose la variación de volumen cada 5 minutos, habiéndose alcanzado los siguientes resultados: 22,8 ml a los 5 minutos y 22,9 ml a los 10 minutos. Esto es, al igual que en la figura 5.1 se produce un aumento con el tiempo. Otra explicación que se podría dar a este comportamiento, es que la salida del aire ocluido en el tiempo, implique un incremento de volumen

Al finalizar estas mediciones se quitaron 6 ml de agua, lo que supuso una manipulación del matraz, quedando un nuevo origen a 19 ml. Luego se agitó suavemente el matraz (mediante un giro inclinado) de forma continua durante 2 minutos. Al final de ese período se hizo una nueva medición, obteniéndose un valor de 10 ml, esto es una reducción. Este resultado muestra la tendencia vista anteriormente respecto a la disminución de volumen en un ensayo estático. Como consecuencia de estas pruebas se planteó la realización de una determinación dinámica durante todo el ensayo.

#### *Tasa de absorción dinámica*

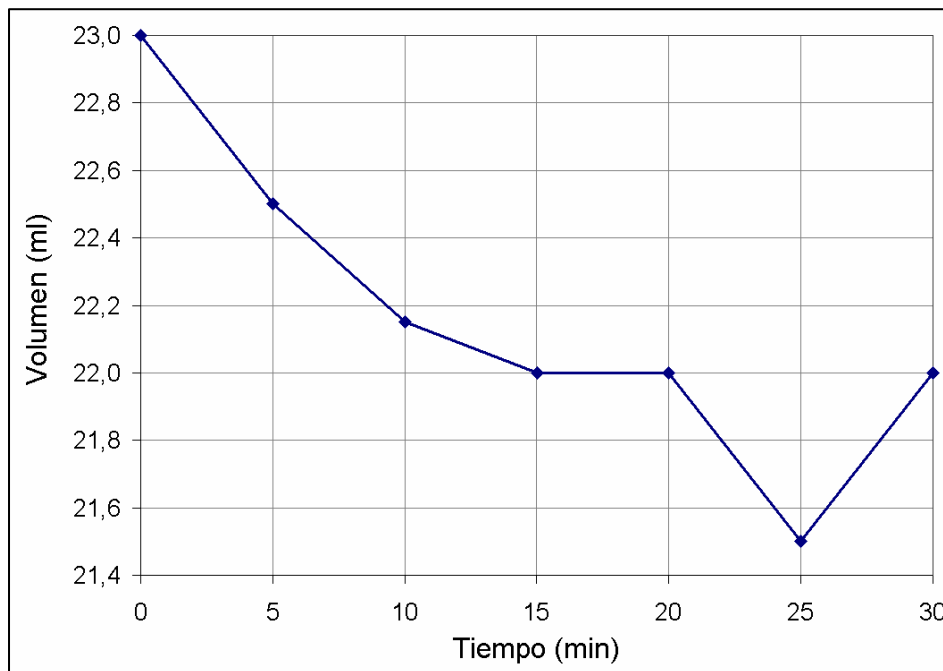
Para llenar el matraz con la arena y el agua se procedió igual que en el ensayo estático. Sin embargo, para realizar la determinación de la tasa de absorción de la arena dinámicamente, se procedió como se indica a continuación: después de llenar el matraz de arena y agua se estuvo agitando constantemente el matraz para provocar el movimiento del agua a través de los vacíos de la arena. Esa agitación se realizaba manteniendo inclinado el matraz y haciéndole rodar hacia delante y hacia atrás.

Las medidas como en el caso anterior se tomaron lecturas en los niveles del matraz (volumen) cada 5 minutos, hasta llegar a los 30 minutos. Los resultados obtenidos se muestran en la **tabla 5.1**.

Tiempo (min)	Volumen (ml)	Incremento absoluto (%)	Incremento relativo (%)
0	23,00	0,00	0,00
5	22,50	-2,17	-2,17
10	22,15	-3,70	-1,56
15	22,00	-4,35	-0,68
20	22,00	-4,35	0,00
25	21,50	-6,52	-2,27
30	22,00	-4,35	2,33

*Tabla 5.1.- Resultados de la determinación de la tasa de absorción dinámica*

En la **figura 5.3** se presentan estos resultados de forma gráfica en función del tiempo, pudiéndose observar en este caso, al contrario que en la prueba de absorción estática, que la tendencia es inversa, es decir, para el caso en que la agitación fue constante durante el tiempo, el volumen de la mezcla arena-agua disminuye en función del tiempo.



*Figura 5.3.- Determinación de la tasa de absorción dinámica de la arena*



Podemos deducir en este caso que el efecto de la agitación constante contribuye a una mayor tasa de absorción de agua por parte de la arena. Esta tendencia parece tener una especie de asíntota, por lo que a partir de un determinado tiempo (en el entorno de los 15 a 20 minutos), no se produce variación significativa de volumen, el valor medido de 25 minutos, parece más un pequeño error de medida, que algo intrínseco del comportamiento.

#### *Determinación del contenido de aire de la arena*

Para realizar la determinación del contenido de aire en una muestra de arena sin compactar se utilizó un dispositivo consistente en un recipiente metálico y un dispositivo especial para determinar el contenido de aire, tal como puede verse en las [figuras 5.4](#) y [5.5](#). La preparación de la muestra se realizó vertiendo la arena en el recipiente en capas sin compactar y una vez que el molde fue llenado se enrasó con una regla metálica. A continuación, se tapó el recipiente herméticamente y se inyectó agua a presión a través del medio, que en este caso consistía de arena.



*Figura 5.4.- Preparación de muestra*



*Figura 5.5.- Equipo de ensayo*

Este ensayo se realizó por dos veces obteniéndose los resultados presentados en la [tabla 5.2](#). En ella puede verse que la porosidad se sitúa entre el 23 y el 24%. Asimismo al desmontar cada uno de estos ensayos pudo observarse que no toda la arena estaba mojada.

Peso envase inicial (gramos)	Peso envase + arena antes del flujo (gramos)	Peso envase + arena después del flujo (gramos)	Porosidad (%)
1.099	2.902	3.023	23
1.099	2.809	2.971	24

*Tabla 5.2.- Resultados de la porosidad*

*Determinación de la humedad inicial de la arena*

Como dato de referencia para las posteriores determinaciones de la absorción de la arena, se tomó la humedad inicial en el momento en que fueron realizados todos los ensayos. Para la determinación de la humedad inicial se siguieron los procedimientos descritos por la norma [ASTM C70-94](#). En este caso, la humedad obtenida de la arena resultó ser de 6,01%, este resultado es relativamente bajo y tiene explicación debido a que, como se mencionó en el [apartado 5.2.2](#), el material estuvo almacenado durante varios días en esas condiciones de temperatura.

**5.2.5 Conclusiones**

Después de la realización de esta serie de ensayos experimentales sobre la absorción de la arena en función de las condiciones climáticas, podemos extraer las siguientes conclusiones:

- El contenido de aire, en la muestra de arena 0-5 mm utilizada, se sitúa en el entorno de 23 a 24% mientras que el contenido de humedad inicial de las arenas se sitúa en el entorno del 6%. Hay que recordar que el estudio de las arenas se ha realizado para las condiciones máximas, simulando un ciclo de verano.
- Las variaciones de volumen en el tiempo al rellenar las arenas con agua, mediante ensayos estáticos o dinámicos conducen a resultados contrapuestos. Así en los ensayos estáticos, parece que existe una tendencia a aumentar de volumen, mientras que en los ensayos dinámicos esta tendencia es de disminución. En ambos casos se alcanza una cierta asíntota en pocos minutos, dentro del periodo que puede considerarse de interés industrial (amasado y transporte).
- Los resultados de los trabajos incluidos en este apartado de la etapa preliminar de los ensayos con áridos, no son lo suficientemente concluyentes, aunque apuntan en la dirección prevista, por lo tanto, se realizarán mas ensayos con áridos a un nivel de profundización mayor.

### **5.3 ESTUDIOS DE ABSORCIÓN**

Los trabajos hechos anteriores sobre hormigones mostraban la conveniencia de ahondar el conocimiento en base al comportamiento de pastas y morteros y también se propuso estudiar más a fondo los efectos de los áridos, especialmente en aspectos tales como la absorción en función del tiempo bajo condiciones diferentes de temperatura y el efecto que tiene la temperatura en la trabajabilidad propia de los áridos o en su acomodamiento entre partículas bajo diferentes condiciones térmicas.

#### **5.3.1 Introducción**

El presente apartado tiene por objeto definir el plan de trabajo realizado con los áridos tanto gruesos como finos (gravas y arenas), en los que se han simulado las condiciones climáticas estudiadas, tanto de verano como de invierno bajo temperaturas constantes para cada caso y humedad relativa también constante. Este plan de trabajo alcanza tanto a dichas condiciones como a los materiales utilizados y el tipo de ensayos realizados. Los resultados correspondientes a estos ensayos se muestran y analizan posteriormente en este mismo documento.

La razón de ser de esta serie de ensayos es el estudio de la influencia que tiene la temperatura en el comportamiento de los áridos, principalmente en la tasa de absorción y a su vez extrapolar el comportamiento de los áridos en las propiedades del hormigón principalmente en estado fresco, y sobre todo para el caso de las condiciones de verano en donde se observa frecuentemente una disminución importante de la trabajabilidad en el hormigón. Es importante mencionar que los áridos representan más del 75% del volumen en el hormigón y sus propiedades tienen una gran influencia directa sobre su comportamiento.

#### **5.3.2 Objetivos**

Los objetivos principales de esta serie experimental, en relación a los estudios de absorción de los áridos son:

- Analizar la influencia de la temperatura en la tasa de absorción de agua de los áridos, correspondiendo la temperatura a condiciones representativas (invierno, control y verano).
- Estudiar la evolución de la absorción con el tiempo de saturación, para las distintas condiciones climáticas simuladas.
- Definir la metodología empleada en esta serie experimental describiendo los procedimientos empleados. Asimismo presentar y analizar los resultados obtenidos extrayendo las conclusiones más significativas.

### **5.3.3 Simulación de las condiciones climáticas**

Para el presente estudio de los áridos, las condiciones de temperatura y humedad relativa se han mantenido constantes para cada simulación climática, las condiciones térmicas en esta campaña experimental fueron las siguientes:

- Condiciones de referencia, temperatura 20 °C y humedad relativa 60%
- Condiciones de invierno, temperatura 6 °C y humedad relativa 60%
- Condiciones de verano, temperatura 38 °C y humedad relativa 60%

Los ensayos fueron realizados en la cámara climática del LTE de la UPC, de igual forma que para el caso del hormigón, los materiales (áridos) fueron almacenados en la cámara 72 horas antes de realizar los ensayos. Lo anterior con el objeto de someter los materiales a las condiciones térmicas estudiadas en cada caso. En el **Capítulo 3** pueden verse algunos detalles de esta cámara en el **apartado 3.3.1**.

### **5.3.4 Variables estudiadas y procedimiento experimental**

La influencia que ejercen los áridos en la trabajabilidad del hormigón se ha seleccionado como variable principal de estudio para esta campaña experimental, principalmente la determinación de los efectos que tiene la temperatura sobre la absorción y velocidad de absorción de los áridos.

Para esta campaña experimental se ha determinado la velocidad de absorción para cada clasificación de áridos a dos tiempos de saturación (30 minutos y 24 horas).

Lo que se pretende determinar en estos ensayos es la influencia que tiene la temperatura en la capacidad de absorción de los áridos y la variación de dicha absorción en función del tiempo. En principio es lógico pensar que a mayor tiempo de saturación de los áridos mayor será la absorción y viceversa, lo cual se trata de comprobar en esta campaña experimental. De igual forma, partimos también del principio lógico de que el proceso de absorción de agua por parte de los áridos se lleva a cabo en los primeros minutos, teniendo un comportamiento asintótico después de pasados los primeros 15 o 30 minutos de estar saturados en agua.

Cabe mencionar que todos los ensayos se realizaron para cada uno de los tamaños de áridos, clasificados según se granulometría:

- Grava 12-20 mm
- Grava 5-12 mm
- Arena 0-5 mm
- Arena 0-2 mm

El orden de ejecución de los ensayos fue de acuerdo a su clasificación granulométrica de mayor a menor tamaño de partículas. Después de almacenar los áridos (por separado) durante 72 horas en las condiciones de temperatura correspondientes en la cámara climática, se procedió a sumergir los áridos en agua y a cronometrar el tiempo desde ese instante.

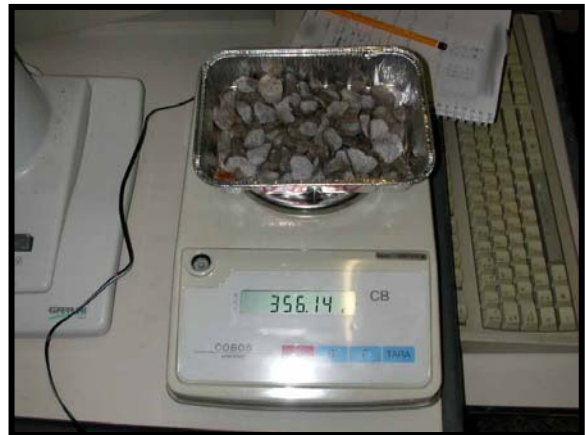
#### Absorción en función del tiempo para el árido grueso (gravas)

Para el caso de las gravas se procedió a determinar la absorción de acuerdo con la norma [ASTM C127-01](#) para cada tiempo. Los resultados obtenidos y su análisis se muestran más adelante en este mismo capítulo.

Las siguientes [figuras \(5.6 y 5.7\)](#) muestran algunos detalles de la realización del cálculo del coeficiente de absorción de las gravas.



*Figura 5.6.- Bandeja con árido grueso en saturación (sumergido)*



*Figura 5.7.- Báscula electrónica con precisión de 0,01 gramos*

#### Absorción en función del tiempo para el árido fino (arenas)

La determinación del coeficiente de absorción de la arena a cada tiempo de saturación se hizo de acuerdo con la norma [ASTM C128-01](#). De igual forma que con las gravas, los resultados obtenidos se muestran y analizan más adelante en este capítulo.

A continuación se muestran algunas fotografías correspondientes a algunos detalles durante la ejecución de los ensayos correspondientes ([figuras 5.8, 5.9 y 5.10](#)).



*Figura 5.8.- Instrumentos utilizados para la obtención del coeficiente de saturación de la arena*



*Figura 5.9.- Muestras de arena después de haber sido centrifugadas y pesadas*



*Figura 5.10.- Horno utilizado para secar las muestras de áridos*

### **5.3.5 Resultados obtenidos**

#### Condiciones de referencia

En la **tabla 5.3** se muestran los resultados obtenidos de la determinación de la absorción a 30 minutos y a 24 horas para el caso de todos los áridos en condiciones de referencia (temperatura 20 °C y humedad relativa 60%, ambas constantes).

Árido	Absorción	
	30 minutos	24 horas
Grava 12-20 mm	0,39%	0,45%
Grava 5-12 mm	1,01%	1,11%
Arena 0-5 mm	1,83%	1,95%
Arena 0-2 mm	2,23%	2,28%

Tabla 5.3.- Absorción de los áridos para condiciones de referencia

A continuación, en la **figura 5.11** se muestran los resultados obtenidos anteriormente en forma gráfica para todos los áridos bajo condiciones climáticas de referencia.

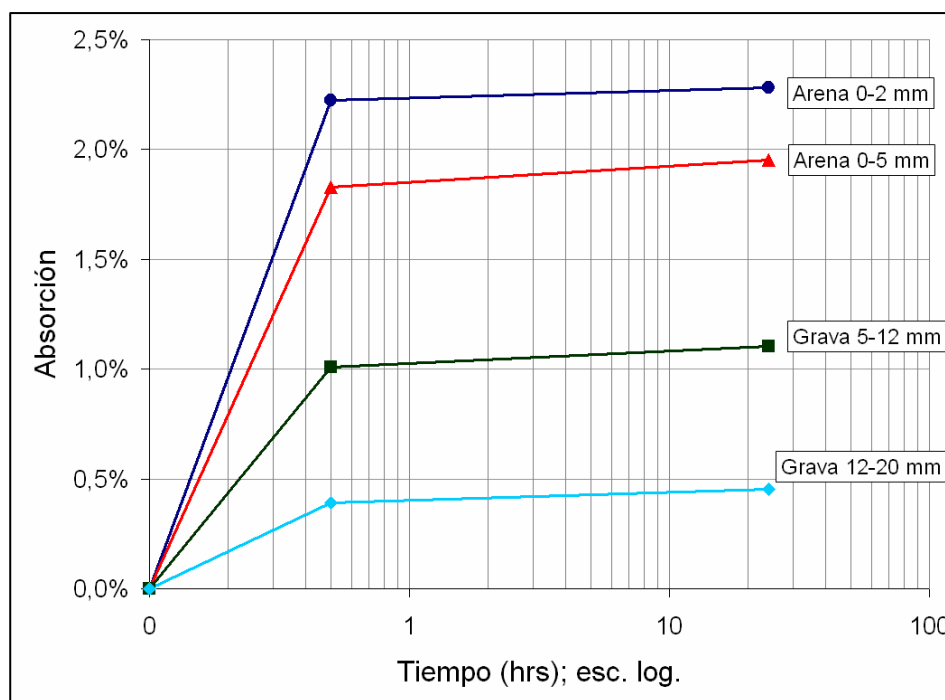


Figura 5.11.- Absorción de los áridos para condiciones térmicas de referencia

Pueden observarse en las figuras anteriores algunos aspectos importantes como la mayor absorción que presentan los áridos con mayor superficie específica o con mayor contenido de finos. Por otro lado, se observa un incremento en la absorción conforme aumenta el tiempo de saturación de 30 minutos a 24 horas, si bien este incremento es pequeño y tiende a desaparecer con el tiempo.

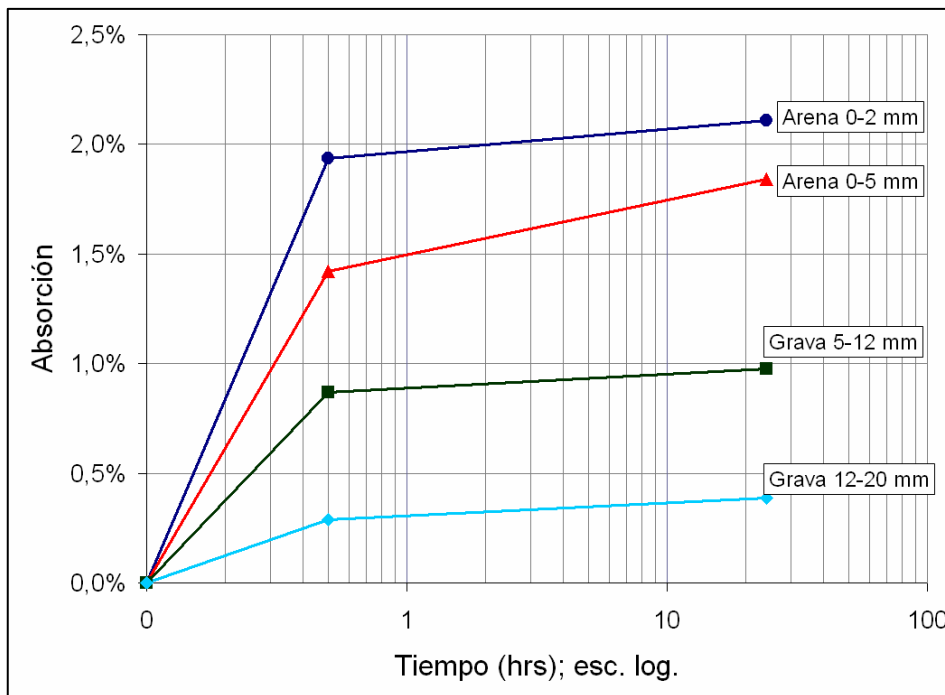
Condiciones de invierno

En la **tabla 5.4** se muestran los resultados obtenidos de la determinación de la absorción a 30 minutos y a 24 horas para el caso de todos los áridos en condiciones de invierno (temperatura 6 °C y humedad relativa 60%, ambas constantes).

Árido	Absorción	
	30 minutos	24 horas
Grava 12-20 mm	0,29%	0,39%
Grava 5-12 mm	0,87%	0,98%
Arena 0-5 mm	1,42%	1,84%
Arena 0-2 mm	1,94%	2,11%

*Tabla 5.4.- Resultados de la absorción de los áridos para condiciones de invierno*

A continuación, en la **figura 5.12** se muestran los resultados obtenidos anteriormente en forma gráfica para todos los áridos bajo condiciones climáticas de invierno.



*Figura 5.12.- Absorción de los áridos para condiciones térmicas de invierno*



De igual forma que para el caso anterior, se observan los mismos puntos mencionados para el caso de las condiciones de referencia, es decir, una mayor superficie específica o un árido con mayor contenido de finos tiene una capacidad mayor de absorción de agua, la cual aumenta a medida que aumenta el tiempo de saturación, si bien ligeramente. Por otro lado, se observa una ligera reducción en el orden de magnitud de los coeficientes de absorción, lo cual podría obedecer al decremento en la temperatura ambiente de los áridos y del agua.

#### Condiciones de verano

En la **tabla 5.5** se muestran los resultados obtenidos de la determinación de la absorción a 30 minutos y a 24 horas para el caso de todos los áridos en condiciones de verano (temperatura 38 °C y humedad relativa 60%, ambas constantes).

Árido	Absorción	
	30 minutos	24 horas
Grava 12-20 mm	0,48%	0,51%
Grava 5-12 mm	1,11%	1,13%
Arena 0-5 mm	2,07%	2,12%
Arena 0-2 mm	2,42%	2,45%

*Tabla 5.5.- Resultados de la absorción de los áridos para condiciones de verano*

A continuación, en la **figura 5.13** se muestra, de forma gráfica, los resultados obtenidos anteriormente, para todos los áridos, bajo condiciones climáticas de verano.

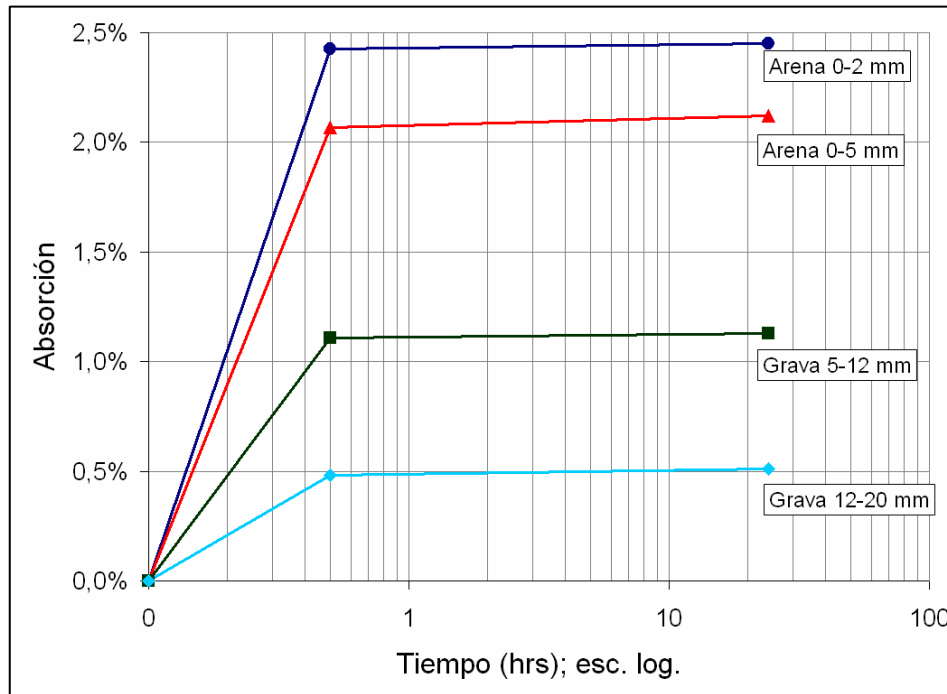


Figura 5.13.- Absorción de los áridos para condiciones térmicas de verano

De igual forma que en los casos anteriores de condiciones térmicas de referencia e invierno, para el caso de las condiciones de verano se observan las mismas condiciones marcadas anteriormente en el sentido del incremento progresivo de absorción en función de la clasificación granulométrica de los áridos. En este caso, como era de esperar, el orden de magnitud de los coeficientes de absorción se incrementa en función de la temperatura, como podrá verse a continuación en los análisis de absorción por clasificación de árido.

#### Resultados para la grava de 12-20 mm

En la **figura 5.14** se muestra la gráfica correspondiente a los resultados de la determinación de los coeficientes de absorción de la grava 12-20 mm bajo las tres diferentes condiciones climáticas: verano, invierno y referencia.

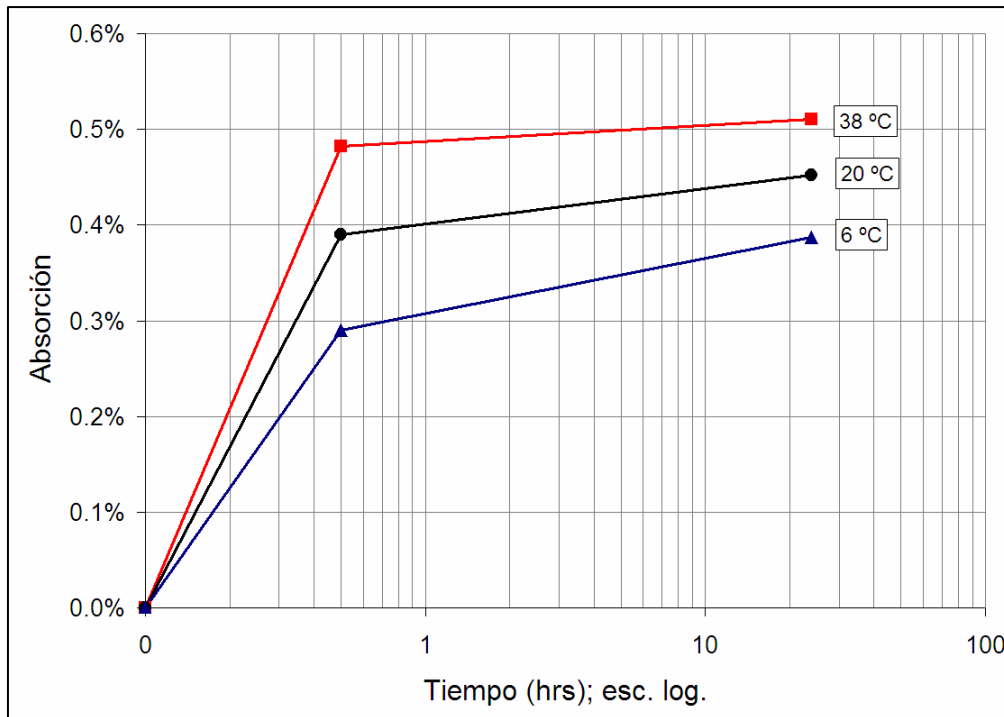


Figura 5.14.- Absorción de la grava 12-20 mm bajo las diferentes condiciones térmicas

En ella puede verse que los coeficientes de absorción son mayores a medida que se incrementa la temperatura, si bien este incremento no es muy significativo. Asimismo, se observa que la pendiente de velocidad de absorción es muy elevada en los primeros 30 minutos y posteriormente la velocidad de absorción es mínima llegando a una tendencia asintótica conforme aumenta el tiempo de saturación del árido. Esa mayor pendiente inicial hace pensar en que las medidas industriales que se adapten deben incidir en esa etapa, especialmente en los primeros minutos.

#### Resultados para la grava de 5-12 mm

En la **figura 5.15** se muestra la gráfica correspondiente a los resultados de la determinación de los coeficientes de absorción de la grava 5-12 mm bajo las tres diferentes condiciones climáticas estudiadas: verano, invierno y referencia.

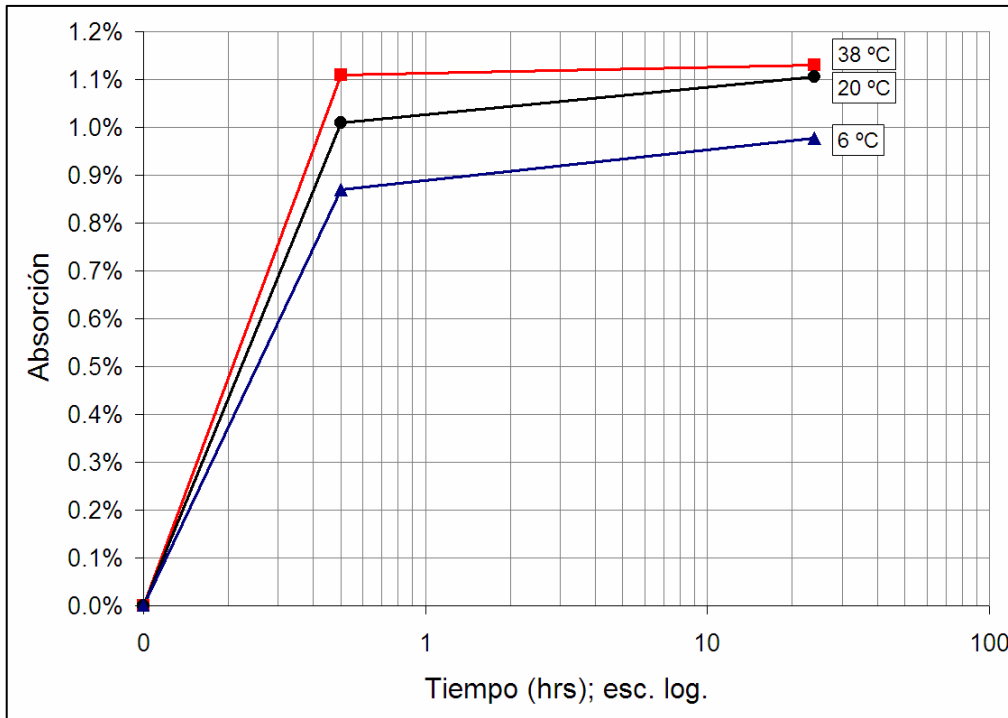


Figura 5.15.- Absorción de la grava 5-12 mm bajo las diferentes condiciones térmicas

En ella pueden observarse los mismos aspectos señalados anteriormente, para la grava 12-20 mm, en el sentido de la dependencia de la absorción en función de la temperatura y el tiempo de saturación.

#### Resultados para la arena de 0-5 mm

En la **figura 5.16** se muestra la gráfica correspondiente a los resultados de la determinación de los coeficientes de absorción de la arena 0-5 mm bajo las tres diferentes condiciones climáticas estudiadas: verano, invierno y control.

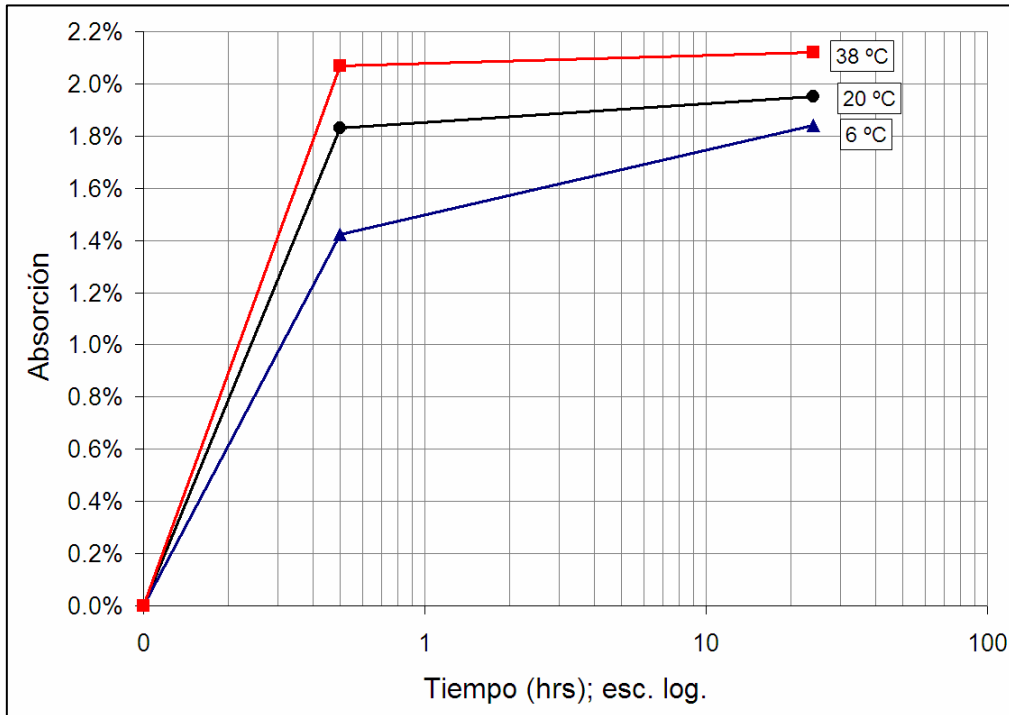


Figura 5.16.- Absorción de la arena 0-5 mm bajo las diferentes condiciones térmicas

Para éste tamaño del árido se mantienen las mismas tendencias señaladas anteriormente, por lo que no se mencionan nuevamente. No obstante hay que indicar que para los 30 minutos, las diferencias en valor absoluto son mayores que las correspondientes a la gravilla y a la grava.

#### Resultados para la arena de 0-2 mm

En la **figura 5.17** se muestra la gráfica correspondiente a los resultados de la determinación de los coeficientes de absorción de la arena 0-2 mm bajo las tres diferentes condiciones climáticas estudiadas: verano, invierno y control.

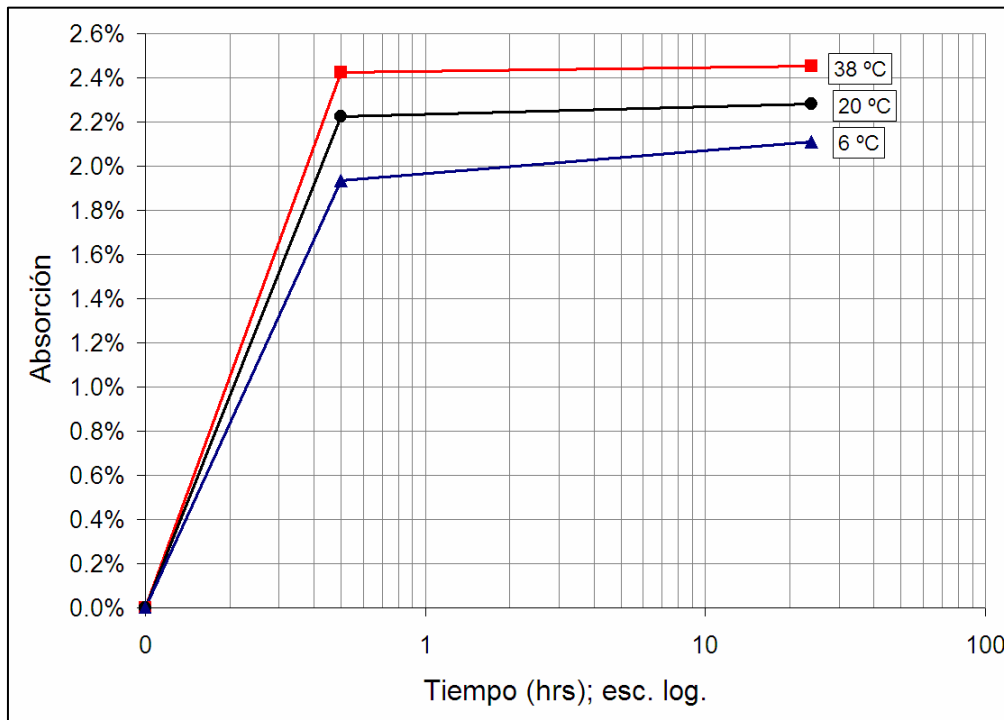


Figura 5.17.- Absorción de la arena 0-2 mm bajo las diferentes condiciones térmicas

En ella puede observarse que para todos los casos, los coeficientes de absorción determinados a una temperatura mayor tienen un valor mayor, por otro lado, se observa la misma tendencia respecto al tiempo de saturación para todos los áridos, es decir, durante los primeros 30 minutos se lleva a cabo casi la totalidad de absorción del agua por parte de los áridos y posteriormente el incremento en la velocidad de absorción muestra una tendencia asintótica. También, se observa en general que los órdenes de magnitud son mayores en función del mayor contenido de finos de cada clasificación granulométrica, tal como era de esperarse.

#### Comparación de resultados (t = 30 minutos)

A continuación se muestra en la **tabla 5.6** un resumen de los coeficientes de absorción de los áridos obtenidos para un tiempo de saturación de 30 minutos.

Absorción (30 minutos)	Temperatura (° C)		
Árido	6	20	38
Grava 12-20 mm	0,29%	0,39%	0,48%
Grava 5-12 mm	0,87%	1,01%	1,11%
Arena 0-5 mm	1,42%	1,83%	2,07%
Arena 0-2 mm	1,94%	2,23%	2,42%

Tabla 5.6.- Resumen de absorciones con tiempo de saturación de 30 minutos

Asimismo los datos mostrados anteriormente se muestran de forma gráfica en la **figura 5.18**.

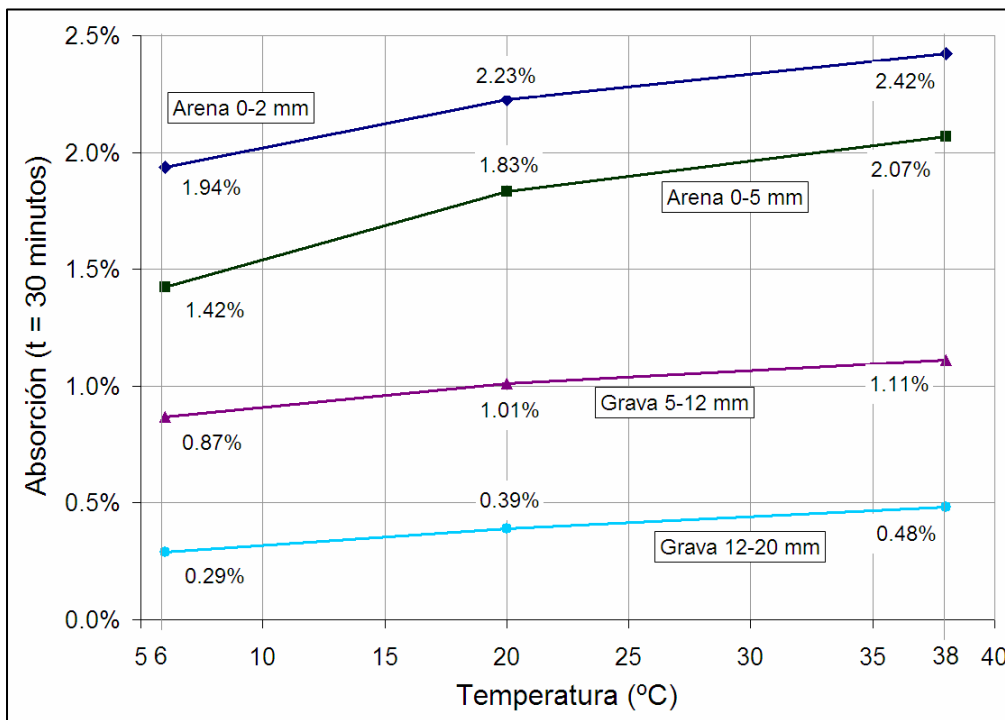


Figura 5.18.- Coeficientes de absorción con tiempo de saturación de 30 minutos

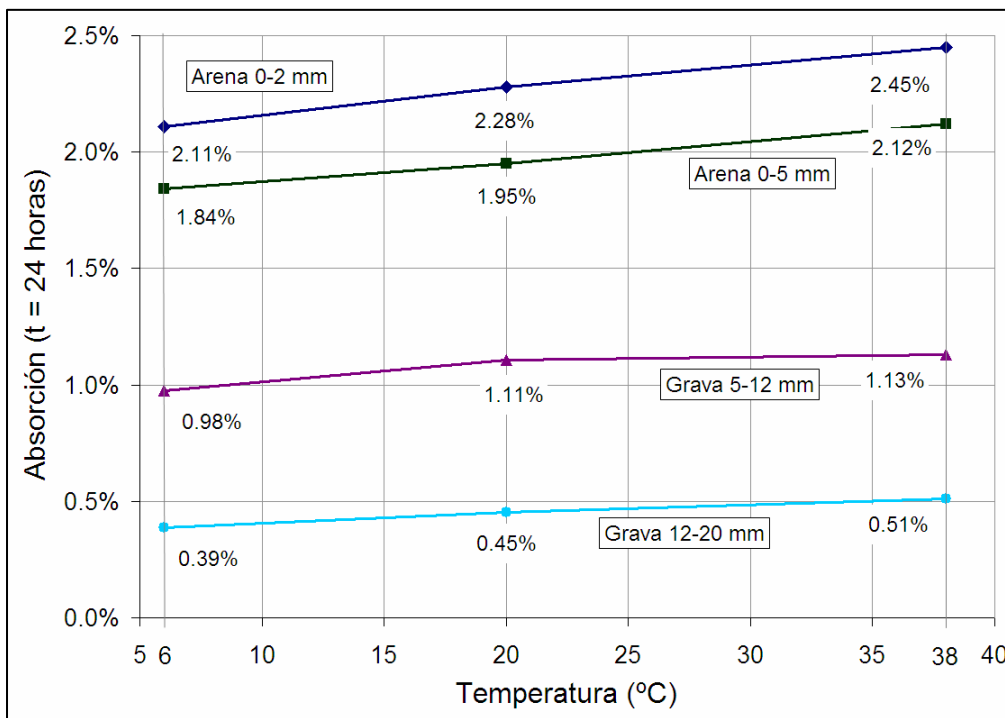
En esta figura queda de manifiesto otra vez, que la absorción aumenta con la temperatura y la superficie específica del árido, tal como era de esperar, y que el aumento es mayor para las condiciones climáticas de verano. Este comportamiento es concordante con el resultado de que la superficie del árido aumenta, más o menos proporcionalmente al cuadrado del radio equivalente.

Comparación de resultados (t = 24 horas)

A continuación se muestra en la **tabla 5.7** un resumen de los coeficientes de absorción de los áridos obtenidos para un tiempo de saturación de 24 horas. Asimismo, en la **figura 5.19** se presentan de forma gráfica estos resultados.

Absorción (24 horas)	Temperatura (° C)		
Árido	6	20	38
Grava 12-20 mm	0,39%	0,45%	0,51%
Grava 5-12 mm	0,98%	1,11%	1,13%
Arena 0-5 mm	1,84%	1,95%	2,12%
Arena 0-2 mm	2,11%	2,28%	2,45%

*Tabla 5.7.- Resumen de absorciones con tiempo de saturación de 24 horas*



*Figura 5.19.- Coeficientes de absorción con tiempo de saturación de 24 horas*



Puede observarse finalmente, después de analizar las dos figuras anteriores, que la absorción a 30 minutos y a 24 horas presentan las mismas tendencias de comportamiento en función de la temperatura ambiental a la cual fueron puestas en climatización y en saturación, de igual forma, las pendientes que presentan ambas gráficas de 6 °C a 20 °C y de 20 °C a 38 °C son las mismas en función de la clasificación granulométrica del árido. Por otro lado, los coeficientes de absorción tienen un incremento muy rápido en los primeros 30 minutos, sin embargo, posteriormente la tasa de absorción es prácticamente nula o despreciable.

### **5.3.6 Conclusiones**

De los trabajos realizados en esta fase y de los resultados obtenidos, podemos extraer las siguientes conclusiones principales:

- El orden de magnitud de la absorción para las arenas es significativamente mayor que para las gravas, lo que es un fenómeno conocido y normal debido a la mayor superficie específica que tienen las arenas con respecto a las gravas.
- El coeficiente de absorción de los áridos aumenta con el incremento de la temperatura ambiental y de los áridos; esta tendencia es más marcada con los áridos finos (arenas).
- Dentro del rango de tiempos de saturación estudiados (30 minutos y 24 horas), las diferencias son poco significativas, lo que representa que el mayor porcentaje de absorción se produce durante los primeros minutos, esto es, durante el amasado del hormigón.
- Las conclusiones anteriores indican que la absorción de los áridos tiene gran importancia para la trabajabilidad del hormigón, sobre todo en condiciones de altas temperaturas (verano).

## **5.4 ESTUDIOS DE COMPACTACIÓN DINÁMICA (VIBRATORIA)**

Una característica de gran importancia del hormigón en estado fresco es la trabajabilidad, ya que de ésta dependen muchos factores posteriores como un buen acabado del hormigón, una superficie lisa e impermeable y una resistencia adecuada. La trabajabilidad está influenciada por muchos factores, entre estos podemos mencionar: la relación agua/cemento, el contenido de agua de la mezcla, la humedad y absorción de los áridos, la temperatura ambiental, etc.

Sin embargo otro factor importante durante el amasado y transporte del hormigón es la energía dinámica de agitación que sufre el hormigón durante estos procesos, esta energía dinámica hace que el hormigón se compacte y que las partículas se acomoden entre ellas en función de su tamaño. Cuando este acomodamiento de partículas o compactación es muy prolongado en el tiempo, la trabajabilidad del hormigón disminuye y complementada con los otros factores que afectan esta trabajabilidad, el hormigón perderá calidad en algunas de sus propiedades.

Por otro lado, partiendo de la suposición de que el mejor o peor acomodamiento de partículas de los áridos dependa de su condición de temperatura y humedad, nos planteamos en esta serie experimental determinar la influencia de estas dos variables (temperatura y humedad relativa) en la capacidad de compactación de los áridos bajo energía dinámica (vibratoria).

### **5.4.1 Introducción**

El presente apartado tiene por objeto definir el plan de trabajo realizado con los áridos tanto gruesos como finos (gravas y arenas), en los que se han simulado las condiciones climáticas estudiadas, tanto de verano como de invierno bajo temperaturas constantes para cada caso y humedad relativa también constante. Este plan de trabajo alcanza tanto a dichas condiciones como a los materiales utilizados y el tipo de ensayos realizados. Los resultados correspondientes a estos ensayos se muestran y analizan posteriormente en este mismo documento.

La razón de ser de esta serie de ensayos es el estudio de la influencia que tiene la temperatura en el comportamiento de los áridos, principalmente en su trabajabilidad y a su vez estudiar el comportamiento de los áridos en las propiedades del hormigón principalmente en estado fresco, y sobre todo para el caso de las condiciones de verano en donde se observa frecuentemente una disminución importante de la trabajabilidad en el hormigón. Es importante mencionar que los áridos representan más del 75% del volumen en el hormigón y sus propiedades tienen una gran influencia directa sobre su comportamiento.

## 5.4.2 Objetivo

El objetivo principal de esta serie de ensayos es determinar el grado de influencia que tiene sobre los áridos la temperatura en cuanto al nivel de compactación o acomodamiento de partículas debido a la aplicación de una energía como la vibración (compactación dinámica). De igual forma, definir la metodología empleada en esta serie experimental describiendo los procedimientos empleados. Asimismo presentar y analizar los resultados obtenidos extrayendo las conclusiones más significativas.

## 5.4.3 Simulación de las condiciones climáticas

Para el presente estudio de compactación dinámica de los áridos, las condiciones de temperatura y humedad relativa se han mantenido constantes para cada simulación climática, las condiciones térmicas en esta campaña experimental fueron las siguientes:

- Condiciones de invierno, temperatura 6 °C y humedad relativa 60%
- Condiciones de referencia, temperatura 20 °C y humedad relativa 60%
- Condiciones de verano, temperatura 38 °C y humedad relativa 60%

Los ensayos fueron realizados en la cámara climática del LTE de la UPC, de igual forma que para el caso del hormigón, los materiales (áridos) fueron almacenados en la cámara 72 horas antes de realizar los ensayos. Lo anterior con el objeto de someter los materiales a las condiciones térmicas estudiadas en cada caso. En el **Capítulo 3** pueden verse algunos detalles de esta cámara en el **apartado 3.3.1**.

## 5.4.4 Variables estudiadas

La influencia que ejercen los áridos en la trabajabilidad del hormigón se ha seleccionado como variable principal de estudio para esta campaña experimental, principalmente la determinación de los efectos que tiene la temperatura sobre las propiedades de los áridos de compactación dinámica mediante vibración mecánica.

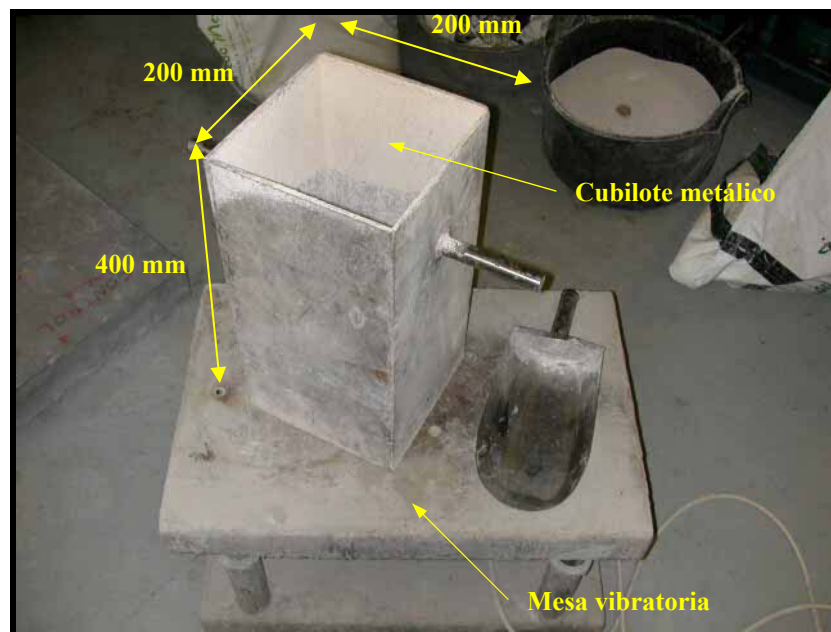
Todos los ensayos se realizaron para cada uno de los tamaños de áridos, clasificados según se granulometría, también se incluyó en este ensayo la mezcla de áridos correspondiente al diseño del hormigón estudiado en el **Capítulo 4** y que se describe con mayor detalle en el **Anejo A**:

- Grava 12-20 mm
- Grava 5-12 mm
- Arena 0-5 mm
- Arena 0-2 mm
- Curva granulométrica diseño hormigón

El orden de ejecución de los ensayos fue de acuerdo a su clasificación granulométrica de mayor a menor tamaño de partículas, finalizando con la mezcla de áridos correspondiente al diseño del hormigón. Después de almacenar los áridos (por separado) durante 72 horas en las condiciones de temperatura correspondientes en la cámara climática, se procedió a realizar el ensayo como se describe a continuación.

#### **5.4.5 Procedimiento experimental**

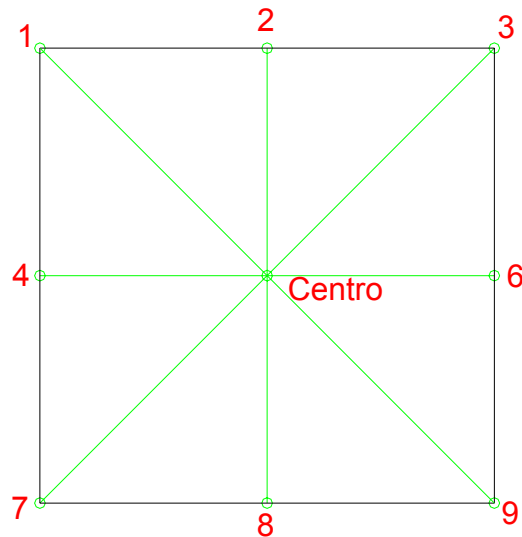
Para la realización de estos ensayos se utilizó un cubilote metálico de dimensiones 200 (ancho) x 200 (largo) x 400 (alto) milímetros y una mesa vibratoria eléctrica sobre la cual se colocó dicho cubilote con material en su interior. En la **figura 5.20** pueden verse el cubilote (con sus dimensiones) y la mesa vibratoria utilizados para estos ensayos, la cual tenía unas dimensiones de 600 x 400 milímetros y trabajaba con una frecuencia de vibración de 3000 RPM.



*Figura 5.20.- Cubilote metálico y mesa vibratoria*

La forma de proceder para este tipo de ensayo fue la siguiente. Primero, igual que en todos los ensayos hechos anteriormente, el material fue depositado en la cámara climática previamente durante 3 días (72 horas) para que se adaptara a las condiciones de temperatura y humedad relativa constantes. En este caso también el orden seguido de ejecución fue según la clasificación granulométrica de mayor a menor tamaño de partículas y se realizó una compactación dinámica para cada clasificación del árido según su distribución granulométrica y para cada una de las tres condiciones climáticas.

Dentro de la cámara climática y pasadas las 72 horas se llena progresivamente el cubilote metálico con un cucharón metálico de bordes redondeados. La forma de llenado es vertiendo el árido sobre las paredes del cubilote de forma alternada en cada una de las paredes. Una vez llenado el cubilote se enrasa con una barra de acero lisa sin ejercer ninguna presión ni compactación sobre el material. Se procede a vibrar el cubilote lleno con el material durante intervalos de 10 segundos calculando el asentamiento promedio mediante la medición de éste en 9 puntos (incluyendo el centro de la sección cuadrada del cubilote), en total se obtienen 5 valores cada 10 segundos, es decir, el tiempo total de vibración es de 50 segundos. Como siempre, los resultados obtenidos y su análisis se muestran mas adelante. A continuación se muestra la **figura 5.21**, la cual muestra la configuración de la malla empleada dentro de la sección del molde para realizar las mediciones.



*Figura 5.21.- Representación gráfica de los puntos de medición en el cubilote*

A manera de ilustración, se muestran a continuación algunas fotografías correspondientes a los procesos de ejecución de estos ensayos de compactación dinámica de los áridos (**figuras 5.22, 5.23 y 5.24**).



*Figura 5.22.- Vertido del árido sobre el cubilote metálico*



*Figura 5.23.- Enrasado del árido dentro del cubilote metálico*



*Figura 5.24.- Medida del asentamiento del árido respecto al borde superior*

#### **5.4.6 Resultados obtenidos**

A continuación se muestran los resultados obtenidos de compactación vibratoria para todas las condiciones climáticas estudiadas, es decir, condiciones de verano, invierno y referencia.

##### Condiciones de invierno

En la **tabla 5.8** se muestran los resultados obtenidos para el caso de la compactación dinámica (vibratoria) de los áridos a las condiciones de invierno, es decir, a una temperatura de 6 °C y una humedad relativa del 60%, ambas condiciones

constantes. Las unidades mostradas corresponden al porcentaje de compactación, es decir, la relación porcentual entre el volumen de árido original y el volumen de árido después de haber sido compactado vibratoriamente.

Compactación	Tiempo (seg)					
Árido	0	10	20	30	40	50
Grava 12-20 mm	0,00%	8,64%	10,61%	10,19%	9,64%	10,11%
Grava 5-12 mm	0,00%	9,06%	10,03%	10,67%	10,86%	11,03%
Arena 0-5 mm	0,00%	11,56%	12,03%	12,42%	12,64%	12,75%
Arena 0-2 mm	0,00%	14,81%	16,33%	16,86%	17,14%	17,42%
Diseño hormigón	0,00%	11,42%	12,19%	12,61%	12,78%	12,72%

Tabla 5.8.- Compactación dinámica de los áridos para condiciones de invierno

En la **figura 5.25** se muestra la gráfica correspondiente a estos datos en condiciones de verano y, como en apartados anteriores, se ha hecho un ajuste de regresión logarítmico del tipo  $y = m \cdot \ln x + b$ .

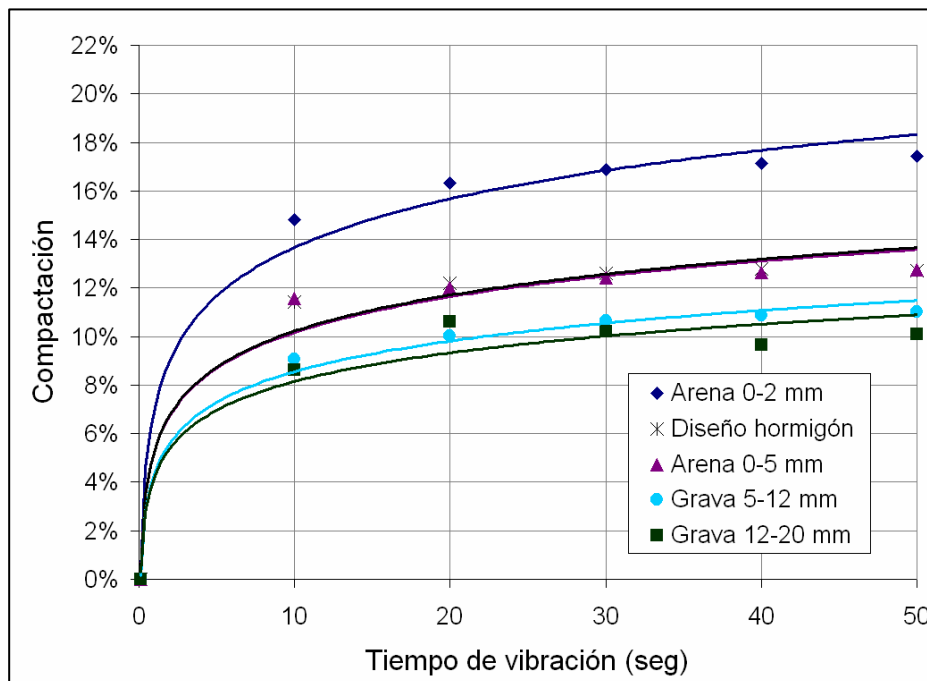


Figura 5.25.- Compactación dinámica de los áridos para condiciones de invierno

Puede verse en la gráfica anterior que la capacidad de compactación bajo energía vibratoria muestra un comportamiento asintótico con respecto al aumento del tiempo de vibración, lo cual sugiere que los datos pueden ser ajustados a una curva mediante regresión logarítmica. Por otro lado, la distribución por tamaño de partículas de los áridos juega un papel importante ya que se observa que el árido mas fino (arena 0-2 mm) es la que tiene una mayor compactación o asentamiento. De igual forma puede verse que después de la arena 0-2 mm, la mezcla correspondiente al diseño del hormigón y la arena 0-5 mm tienen prácticamente la misma compactación, seguida por la gravilla 5-12 y la grava 12-20 mm. La mezcla del conjunto se sitúa entre las arenas y las gravas, como era de esperarse.

En general puede verse que los niveles mayores de compactación corresponden a los áridos con menor tamaño de partículas o con mayor superficie específica, tal como se ha venido mencionado a lo largo de este trabajo. Ese mayor grado de compactación viene asociado al mayor volumen de vacíos que se produce a medida que el tamaño del árido disminuye.

#### Condiciones de referencia

En la **tabla 5.9** se muestran los resultados obtenidos para el caso de la compactación dinámica (vibratoria) de los áridos a las condiciones de control o referencia, es decir, a una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del 60%, ambas condiciones constantes.

Compactación	Tiempo (seg)					
	0	10	20	30	40	50
Árido						
Grava 12-20 mm	0,00%	8,75%	9,31%	10,64%	11,22%	11,39%
Grava 5-12 mm	0,00%	10,33%	11,00%	11,17%	11,53%	11,83%
Arena 0-5 mm	0,00%	14,14%	14,58%	15,14%	15,69%	15,89%
Arena 0-2 mm	0,00%	17,25%	19,06%	19,19%	19,08%	19,75%
Diseño hormigón	0,00%	11,47%	11,94%	12,50%	12,83%	13,58%

*Tabla 5.9.- Compactación dinámica de los áridos para condiciones de referencia*

En la **figura 5.26** se muestra la gráfica correspondiente a estos datos en condiciones de control o referencia, igualmente se ha hecho un ajuste de regresión logarítmico del tipo  $y = m \cdot \ln x + b$



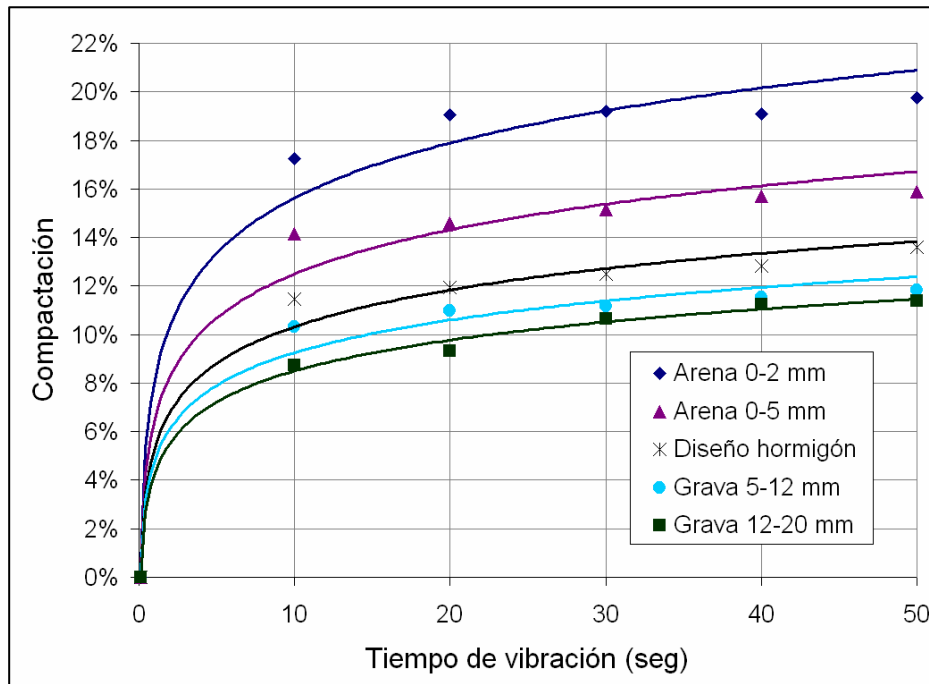


Figura 5.26.- Compactación dinámica de los áridos para condiciones de referencia

De igual forma que en las condiciones de invierno, se observa que el árido más fino (arena 0-2 mm) es el que mayor grado de compactación alcanza, de hecho, en esta gráfica se observa un comportamiento esperado en función del tamaño de partículas de cada clasificación de árido, es decir, el árido que más se compacta es aquel que tiene un tamaño menor de partículas y viceversa; quedando la mezcla de áridos del diseño del hormigón en un punto intermedio entre los áridos finos y gruesos, como era de esperar, ya que es una mezcla resultante de los mismos.

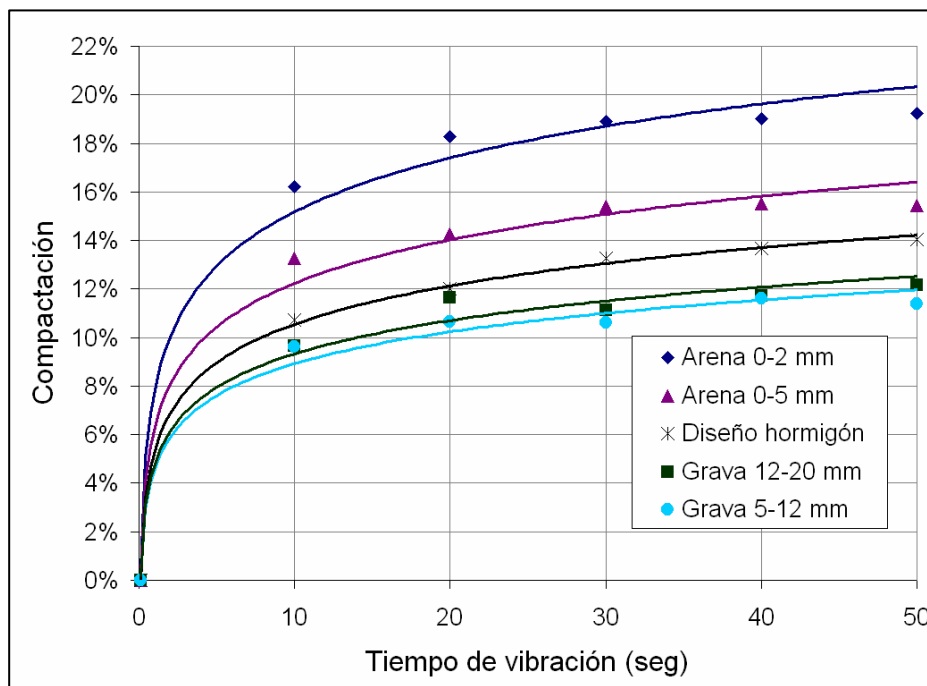
#### Condiciones de verano

En la **tabla 5.10** se muestran los resultados obtenidos para el caso de la compactación dinámica (vibratoria) de los áridos a las condiciones de verano, es decir, a una temperatura de 38 °C y una humedad relativa del 60%, ambas condiciones constantes.

Compactación	Tiempo (seg)					
Árido	0	10	20	30	40	50
Grava 12-20 mm	0,00%	9,64%	11,64%	11,14%	11,72%	12,17%
Grava 5-12 mm	0,00%	9,61%	10,67%	10,61%	11,61%	11,39%
Arena 0-5 mm	0,00%	13,25%	14,25%	15,39%	15,53%	15,44%
Arena 0-2 mm	0,00%	16,22%	18,28%	18,89%	19,03%	19,22%
Diseño hormigón	0,00%	10,72%	12,00%	13,28%	13,67%	14,03%

*Tabla 5.10.- Compactación dinámica de los áridos para condiciones de verano*

En la **figura 5.27** se muestra la gráfica correspondiente a estos datos en condiciones de verano, se ha hecho un ajuste de regresión logarítmico del tipo  $y = m \cdot \ln x + b$

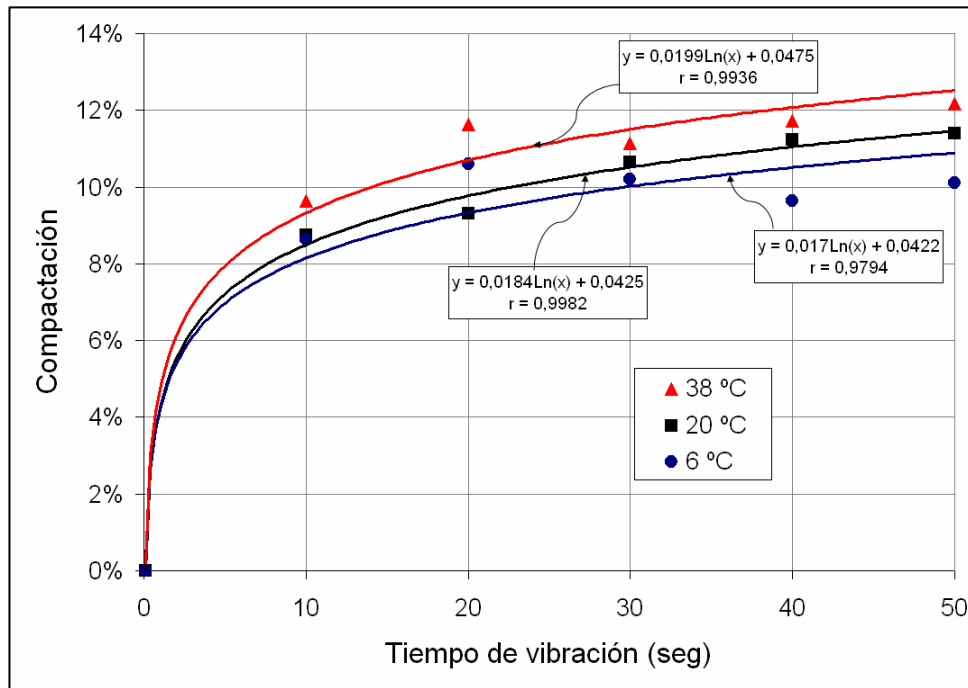


*Figura 5.27.- Compactación dinámica de los áridos para condiciones de verano*

En los datos mostrados anteriormente puede notarse prácticamente el mismo comportamiento de nivel de compactación en función de la granulometría de los áridos quedando la mezcla de áridos en base al diseño del hormigón en un rango intermedio entre los áridos finos y los gruesos.

### Resultados para la grava de 12-20 mm

En la **figura 5.28** se muestra la gráfica correspondiente a los resultados de la compactación por vibración de la grava 12-20 mm bajo las tres diferentes condiciones climáticas: invierno, referencia y verano. Asimismo se incluye el ajuste de regresión logarítmico hecho anteriormente para dichos datos.



*Figura 5.28.- Compactación dinámica de la grava 12-20 mm*

En la gráfica anterior puede observarse que el mayor grado de compactación ocurre bajo condiciones de verano, seguido por las condiciones de referencia o control y por último, el menor grado de compactación es para la vibración bajo condiciones de invierno. Por otro lado, el coeficiente de correlación obtenido en todos los casos es muy elevado.

### Resultados para la grava de 5-12 mm

En la **figura 5.29** se muestra la gráfica correspondiente a los resultados de la compactación por vibración de la grava 5-12 mm bajo las tres diferentes condiciones climáticas: invierno, referencia y verano. Asimismo se incluye la tendencia de regresión logarítmica hecha anteriormente para los mismos datos.

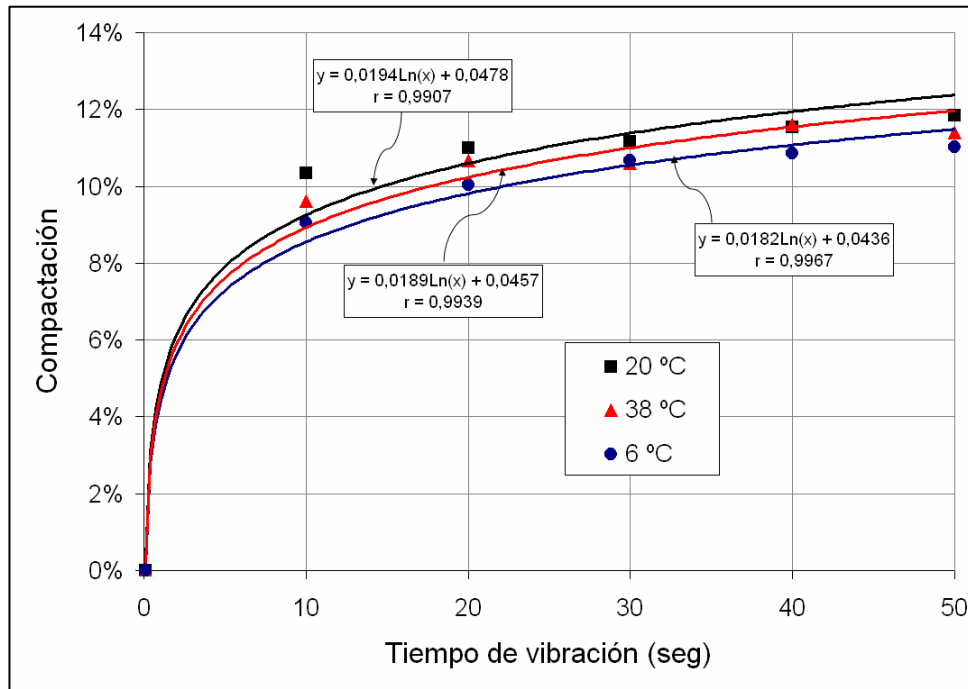


Figura 5.29.- Compactación dinámica de la grava 5-12 mm

Analizando las gráficas de compactación dinámica de las gravas (12-20 y 5-12 mm) para diferentes condiciones térmicas se observa que la compactación es menor en ambos casos para las condiciones de invierno, sin embargo, en este caso el árido sufrió mayor compactación bajo las condiciones de control que bajo las condiciones de verano, no obstante la diferencia es mínima.

Los resultados para las gravas (12-20 mm y 5-12 mm) muestran que la temperatura influye poco en el grado de compactación, lo cual puede ser consecuencia del menor número de contactos entre las partículas de los áridos.

#### Resultados para la arena de 0-5 mm

En la **figura 5.30** se muestra la gráfica correspondiente a los resultados de la compactación por vibración de la arena 0-5 mm bajo las tres diferentes condiciones climáticas: invierno, referencia y verano. De igual forma se incluye la tendencia de las curvas ajustadas anteriormente por regresión logarítmica.

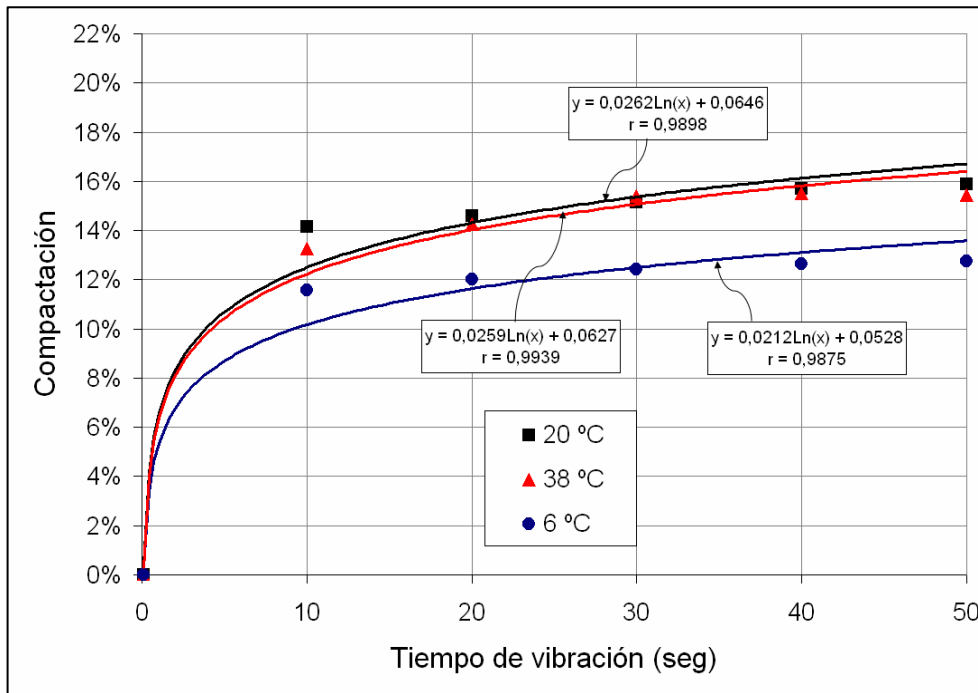


Figura 5.30.- Compactación dinámica de la arena 0-5 mm

Para el caso de este árido (0-5 mm) se observa que el comportamiento que presenta es igual que para la grava de 5-12 mm, es decir, los mayores niveles de compactación corresponden a las condiciones de referencia, seguidas por las condiciones de verano e invierno.

#### Resultados para la arena de 0-2 mm

En la **figura 5.31** se muestra la gráfica correspondiente a los resultados de la compactación por vibración de la arena 0-2 mm bajo las tres diferentes condiciones climáticas: invierno, referencia y verano. Asimismo se presenta el ajuste de regresión logarítmico de los datos, igual al que se ha hecho anteriormente.

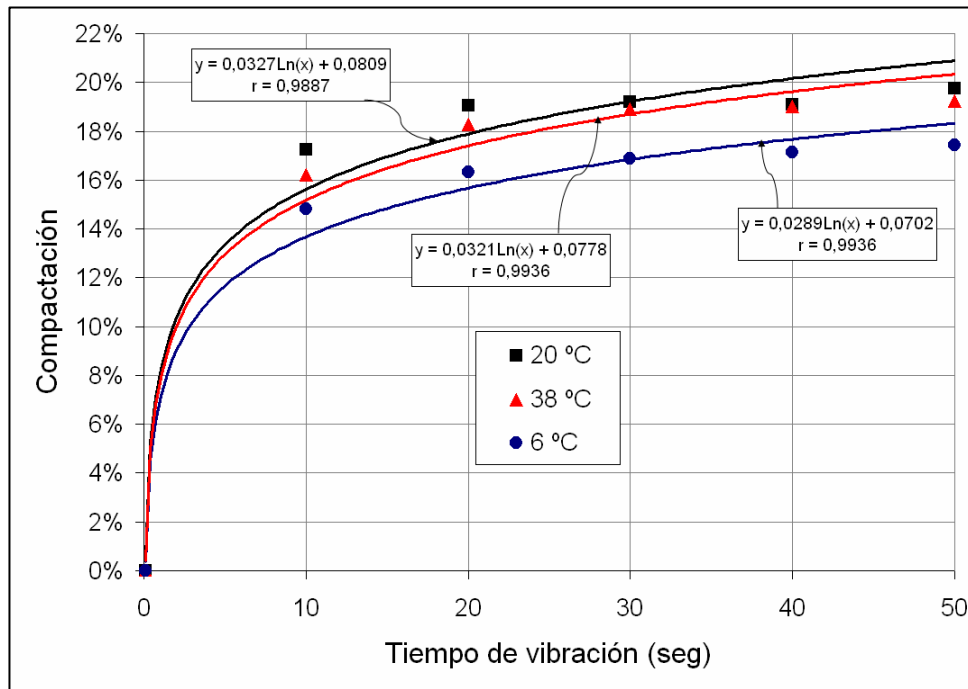


Figura 5.31.- Compactación dinámica de la arena 0-2 mm

En esta figura puede verse el mismo comportamiento señalado para los áridos de granulometría 5-12 y 0-5 mm, respecto al mayor grado de compactación en la serie de referencia a 20 °C, siendo menor el grado de compactación para las temperaturas de verano e invierno (más significativas las diferencias en esta última).

La aparición sistemática de un máximo de compactación para las arenas en la temperatura de 20 °C puede ser el resultado de una superposición de dos efectos. Así, por un lado, la compactación disminuye con la temperatura, incidiendo en la textura superficial del árido, mientras que la absorción aumenta con la temperatura.

#### Resultados para la mezcla de áridos (diseño hormigón)

En la **figura 5.32** se muestra la gráfica correspondiente a los resultados de la compactación por vibración de la mezcla de áridos correspondiente al diseño del hormigón bajo las tres diferentes condiciones climáticas: invierno, referencia y verano.

Asimismo se presenta el ajuste de regresión logarítmico de los datos. Hay que destacar el elevado grado de correlación obtenidos en todos los casos (diferentes temperaturas), con diferencias, prácticamente nulas, entre las distintas condiciones térmicas.

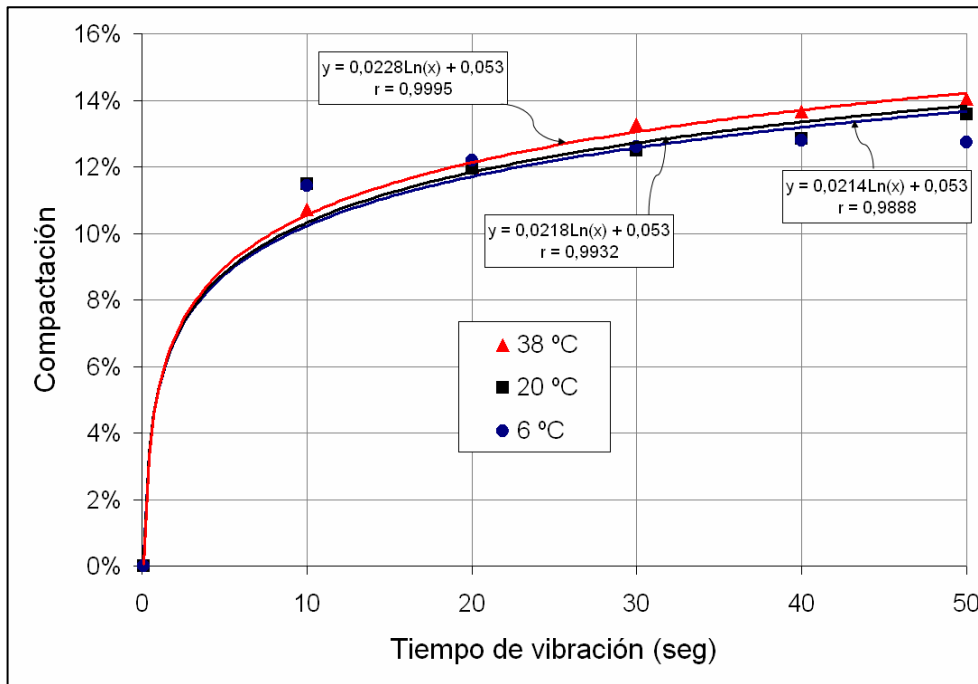


Figura 5.32.- Compactación dinámica de la mezcla de áridos (hormigón)

El resultado de la compactación dinámica de los áridos con una proporción en base al diseño del hormigón utilizado en los informes anteriores muestra, por un lado, un grado de compactación intermedio entre las arenas y las gravas como era de esperar y, por otro lado, el comportamiento del conjunto es similar, desde el punto de vista térmico a las gravas.

Comparación de resultados (tiempo de vibración = 50 segundos)

A continuación, en la **tabla 5.11** se muestran los niveles de compactación para un tiempo de vibración de 50 segundos de todas las clasificaciones de áridos estudiadas y obtenidas bajo las tres condiciones climáticas consideradas.

Compactación (t=50s)	Temperatura (° C)		
	6	20	38
Árido			
Grava 12-20 mm	10,11%	11,39%	12,17%
Grava 5-12 mm	11,03%	11,83%	11,39%
Arena 0-5 mm	12,75%	15,89%	15,44%
Arena 0-2 mm	17,42%	19,75%	19,22%
Diseño hormigón	12,72%	13,58%	14,03%

Tabla 5.11.- Niveles de compactación de los áridos para  $t = 50$  segundos

De igual forma, en la **figura 5.33** se presentan gráficamente estos resultados, los cuales corresponden a un tiempo de compactación de 50 segundos, donde se considera que se ha alcanzado la asíntota.

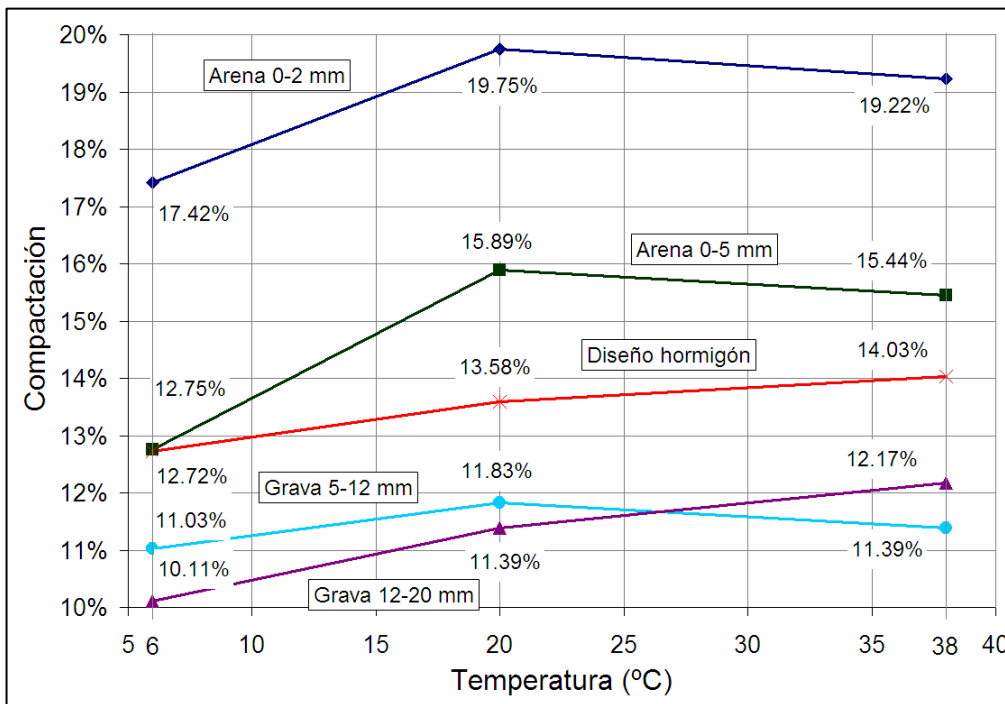


Figura 5.33.- Niveles de compactación de los áridos para  $t = 50$  segundos



En esta figura puede verse que para el caso de las arenas los niveles de compactación mayores corresponden a los áridos con tamaño de partículas menores (arena 0-2 mm), mientras que para las gravas los niveles de compactación mayores corresponden a la clasificación 5-12 mm para 6 y 20 °C, mientras que para el caso de 38 °C esta tendencia es revertida. Por otro lado, se observa que en todos los casos el nivel de compactación a 20 °C es mayor que a 6 °C pero que esta tendencia (creciente) se extrapola a la condición de 38 °C solo en el caso de la grava 12-20 mm y de la mezcla de áridos correspondiente al diseño del hormigón. Asimismo, en el caso de que esta tendencia continúe desde 6 °C hasta 38 °C, pasando por 20 °C, el valor de la pendiente es menor en el segundo tramo, es decir, el nivel de compactación no se incrementa en la misma proporción que en el primer tramo. A manera de resumen y generalizando podemos decir que a mayor temperatura tendremos mayor compactación, lo que en otros términos significa que la trabajabilidad se verá reducida en estas condiciones. Si asociamos los otros factores que afectan a la trabajabilidad del hormigón, y que en condiciones de mayor temperatura ambiental son agravados, podemos decir que en general a mayores temperaturas la trabajabilidad del hormigón se verá afectada considerablemente.

Los niveles de compactación de los áridos tienen como variables dependientes principales la granulometría, la superficie específica, humedad del árido (humedad óptima de compactación) y los coeficientes de forma y textura de los áridos, ya que estos factores disminuyen la fricción interna entre partículas manteniendo un mejor acomodamiento bajo energía de vibración mecánica. Otras variables que afectan en la compactación pero en menor medida es la temperatura ambiental y de los áridos, sin embargo las tendencias siguen un patrón predecible y que puede ser aceptado como fiable debido a la precisión del método de ensayo. Otro factor que es importante mencionar es que los áridos se han ensayado en condiciones de humedad muy cercanas a cero y los niveles de compactación mayores se obtienen con humedades del material mayores, es decir, con humedades cercanas a la humedad óptima con la cual se consiguen los mayores niveles de compactación con la misma energía aplicada o aún menor.

#### **5.4.7 Conclusiones**

De los ensayos realizados en esta fase y de los resultados obtenidos, podemos extraer las siguientes conclusiones principales:

- El grado de compactación de los áridos aumenta con el tiempo hasta alcanzar una asíntota. Dicho valor puede estimarse que se alcanza en el entorno de los 50 segundos, para una mesa vibrante convencional. Esta tendencia es común para todos los tipos de áridos estudiados

- Los porcentajes de compactación aumentan a medida que disminuye el tamaño del árido. Los valores de estos porcentajes para los distintos áridos, para un tiempo de vibración de 50 segundos, varían entre:
  - 10,11 % y 12,07 % , respectivamente para 6 y 38 °C en las gravas 12-20 mm
  - 11,03 y 11,39 % , respectivamente para 6 y 38 °C en las gravas 5-12 mm
  - 12,75 y 15,44 % , respectivamente para 6 y 38 °C en las arenas 0-5 mm
  - 17,42 y 19,22 % , respectivamente para 6 y 38 °C en las arenas 0-2 mm
  - 12,72 y 14,03 % , respectivamente para 6 y 38 °C en el diseño del hormigón
  
- El porcentaje de compactación aumenta con la temperatura, tal como puede verse en los valores anteriores. Esto es a mayor temperatura el porcentaje es mayor. Ahora bien la tendencia no es uniformemente creciente y así para la temperatura intermedia de 20 °C se han obtenido valores superiores, de forma sistemática, en el caso de las arenas (en los dos tipos y en las dos determinaciones realizadas).
  
- Los valores más bajos que se obtienen a 6 °C, pueden ser consecuencia de que la baja temperatura tiene una gran influencia en el ángulo del talud natural, como consecuencia de un mayor rozamiento interno, por la modificación de la fricción interna del árido.
  
- La disminución de los valores de 38 °C, especialmente en las arenas, respecto a los correspondientes a 20 °C puede ser el resultado de que la mayor absorción del árido con la temperatura cambia, asimismo, la fricción interna del árido y consecuentemente, el ángulo del talud natural.
  
- El ajuste de las curvas por medio de la regresión logarítmica resultó ser un método muy adecuado debido a la tendencia asintótica que presentaban las curvas. Lo anterior puede comprobarse por medio de los coeficientes de correlación que muestran valores muy buenos de ajuste.
  
- La determinación realizada para el conjunto de los áridos en la misma proporción que se encuentran en el hormigón, conducen a resultados intermedios entre las arenas y los áridos, como era de esperar, al ser una mezcla de ambos tipos.
  
- El ensayo de compactación dinámica utilizado se ha mostrado fiable en la repetitividad de los resultados. No obstante los niveles más altos de compactación se encontraban en las paredes del cubilote metálico, lo anterior se debe a que las vibraciones debidas al molde actúan de manera que el material adyacente a éstos tiene una mayor consolidación o asentamiento.

## **5.5 ENSAYOS DE INERCIA TÉRMICA**

### **5.5.1 Introducción**

Debido a que en la masa del hormigón, aproximadamente las tres cuartas partes de su volumen son ocupadas por áridos, es de gran importancia conocer sus propiedades e historial térmico, ya que estos factores tienen una gran influencia en las propiedades térmicas del propio hormigón.

Haciendo referencia a esto, se ha definido la siguiente campaña experimental de esta tesis en el estudio de las propiedades térmicas de los áridos (inercia térmica) para poder conocer la temperatura inicial del hormigón y posteriormente, bajo una temperatura inicial denominada crítica, poder tener los fundamentos necesarios para la toma de decisiones respecto a una sobredosificación o no de cemento en el hormigón.

La razón de ser de esta serie de ensayos es el estudio de la inercia térmica de los áridos gruesos y finos así como su cuantificación en función de la temperatura ambiental y de la hora del día. De esta manera es posible conocer la temperatura inicial de la mezcla (junto con el historial térmico de los demás componentes), pudiendo ser ésta crítica o no crítica para llevar a cabo la sobredosificación de cemento en el hormigón. Lo anterior se ha planteado para el caso de las condiciones de verano ya que son éstas las que tienen mayores efectos perjudiciales sobre las propiedades del hormigón tanto en estado fresco como en estado endurecido.

Asimismo, estas determinaciones formarán parte del planteamiento metodológico a desarrollar para poder conocer la temperatura inicial del hormigón en base al historial térmico de sus componentes. A su vez, el historial térmico de sus componentes podrá ser deducido del perfil térmico ambiental histórico de aproximadamente 3 o 4 días antes.

Por otro lado, también se realizó un análisis estadístico de las temperaturas ambientales en los meses de verano de los últimos 9 años (1997-2005) para saber la evolución de las temperaturas máximas en el día en función de la temperatura inicial a las 7:00 hrs. De igual forma se realizará una distribución de frecuencia estadística con esta información para determinar el nivel de fiabilidad de las predicciones en base a los datos climáticos históricos de estos años. (Ver **Anejo C** de esta tesis)

### **5.5.2 Objetivos**

El presente apartado tiene como objetivo principal definir el plan de trabajo realizado y los resultados obtenidos con los áridos, en los que se han simulado las condiciones climáticas estudiadas de verano bajo temperaturas variables y humedad relativa variable también. Este plan de trabajo alcanza tanto a dichas condiciones como a los materiales utilizados y el tipo de ensayos realizados. Los resultados correspondientes a estos ensayos se muestran y analizan posteriormente en este mismo

capítulo. Asimismo se realiza un análisis de los mismos y se redactan las conclusiones principales.

Por otro lado, los objetivos específicos de esta serie de ensayos, en relación al estudio de la inercia térmica de los áridos son:

- Analizar la inercia térmica de los áridos en relación a la temperatura ambiental según la clasificación granulométrica del árido y en función también de la profundidad a la cual se mide dicha inercia térmica.
- Cuantificar la inercia térmica de los áridos en base a desplazamientos o desfases térmicos y horarios en relación a la temperatura ambiente.
- Simular numéricamente la temperatura ambiental y la temperatura que tendrían los áridos en función de esa temperatura ambiental mediante la recopilación de los parámetros de temperatura máxima y mínima y las horas a las cuales se producen esas temperaturas. Asimismo en función de los desfases térmicos y horarios simular numéricamente los perfiles térmicos de los áridos.

### **5.5.3 Simulación de las condiciones climáticas**

Para la realización del presente estudio, se tomaron como referencia las condiciones climáticas descritas en el **apartado 3.4.1 del Capítulo 3**, pero correspondiendo solamente a las condiciones de verano.

Los ensayos fueron realizados en la cámara climática del LTE de la UPC, de igual forma que para el caso del hormigón, los materiales (áridos) fueron almacenados en la cámara 72 horas antes de realizar los ensayos. Lo anterior con el objeto de someter los materiales a las condiciones térmicas estudiadas en cada caso. En el **Capítulo 3** pueden verse algunos detalles de esta cámara en el **apartado 3.3.1**.

### **5.5.4 Variables estudiadas**

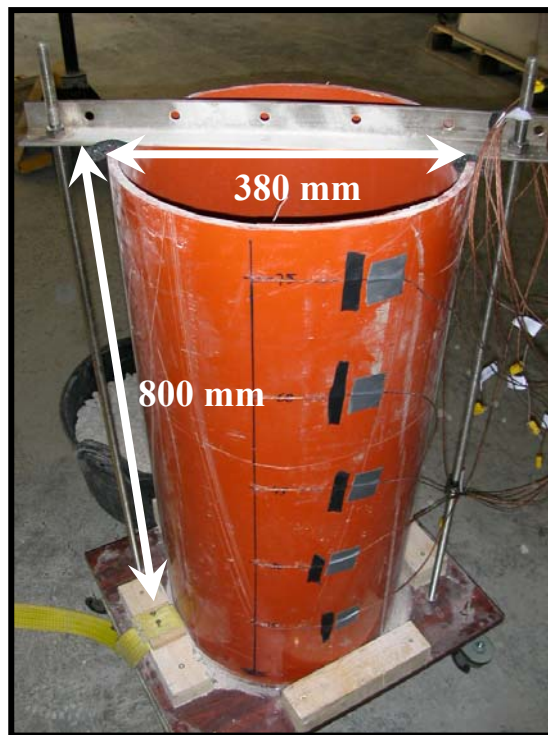
Con el objeto de cuantificar la inercia térmica de los áridos para la posterior aplicación de ésta como una variable en la determinación de la temperatura inicial del hormigón, se ha elegido esta propiedad como la variable a estudiar. Principalmente se pretende cuantificar el desfase térmico y horario de la temperatura que absorben los áridos del exterior con la temperatura ambiental.

Posteriormente con ésta información se podrá calcular la conductividad de los áridos para poder calcular su temperatura en el momento de fabricar hormigón y de ésta forma conocer la temperatura inicial de la masa fresca del hormigón.

### 5.5.5 Equipo especial utilizado

Para simular las condiciones de almacenamiento de los áridos dentro de un silo se fabricó un recipiente de PVC de 380 mm de diámetro (medida interior) por 800 mm de altura, cerrado en la parte inferior por una placa de “porexpan” de 5 cm de espesor para aislar térmicamente el material del exterior. En la parte de arriba se dejó libre la superficie del árido con el objeto de simular la posible evaporación de la humedad de los áridos. La capacidad del recipiente es de 90,73 litros.

A continuación se muestra en la **figura 5.34** una fotografía del recipiente fabricado así como sus respectivas medidas.



*Figura 5.34.- Recipiente para el almacenamiento de los áridos*

A lo largo de la altura del recipiente se realizaron perforaciones a 50, 200, 350, 500 y 650 milímetros partiendo de arriba hacia abajo con el objeto de introducir las sondas termopares hacia el interior del cilindro. Transversalmente se dejó la punta de la sonda en el centro de la circunferencia para medir las temperaturas en el centro de la sección del cilindro como se muestra en la **figura 5.35**.



Figura 5.35.- Sección transversal del recipiente cilíndrico

De igual forma en la **figura 5.36** puede verse un detalle de la disposición de las sondas termopares a distintas alturas del recipiente y, en la **figura 5.37** puede verse el sistema de adquisición de datos térmicos utilizado en esta serie de pruebas.



Figura 5.36.- Perforaciones longitudinales en el recipiente



Figura 5.37.- Aparato para la adquisición de datos térmicos "squirrel"

### 5.5.6 Procedimiento experimental

Antes que nada, hay que mencionar que estos ensayos se realizaron para dos clasificaciones granulométricas de los áridos únicamente: grava 12-20 mm y arena 0-5 mm, debido a que son los áridos que mayor proporción representan en el diseño del hormigón utilizado en el **Capítulo 4**. En primer lugar se comenzó con la arena y después con la grava.

#### Procedimiento de llenado del recipiente

Una vez fabricado el recipiente cilíndrico de almacenamiento e insertadas las sondas termopares en su ubicación específica se procedió a llenar al recipiente con arena. El material se tomó de los silos de almacenamiento de la planta amasadora del LTE de la UPC lo que indican que la humedad contenida en ese momento prácticamente era despreciable, asimismo la temperatura del material en ese momento era muy similar y aún por debajo de la temperatura ambiental en ese momento.

La forma de proceder fue llenando el recipiente con un cucharón para hormigón vertiendo suavemente y dejando caer el material a una altura no mayor de 10 centímetros de la placa de porexpan para evitar alguna posible compactación diferencial; se iba llenando tratando de verter el material igualmente en cada segmento de la sección circular. Conforme se iba subiendo el nivel y llegando a las sondas termopares se procuraba que el nivel de las sondas fuera el correcto, es decir perpendicular a la pared del recipiente y en el centro de la sección circular. De igual forma la altura máxima de caída del material no superaba los 10 centímetros. Una vez llenado el material se enrasaba sin causar compactación alguna al nivel máximo y se rigidizaba el conjunto con un ángulo de acero inoxidable colocado en la parte superior y anclado a la base de madera por debajo de la placa de porexpan, esto se hizo más que nada para que al momento de transportar el recipiente lleno no hubiera deformaciones y movimiento alguno. Con el objeto de facilitar las maniobras de movimiento del recipiente a la cámara climática se utilizó el montacargas del LTE. A continuación en la **figura 5.38 (a y b)** se muestran algunos detalles del vertido de material en el recipiente cilíndrico.



(a)

(b)

*Figura 5.38.- Detalle del llenado del recipiente*

De igual forma, en las **figura 5.39** se muestra el ángulo de acero de cerramiento y rigidización del conjunto y en la **figura 5.40** el transporte del recipiente lleno por medio del montacargas a la cámara climática.



*Figura 5.39.- Ángulo de acero para cerramiento*





Figura 5.40.- Maniobras de movimiento del recipiente

#### Programación de los ciclos térmicos

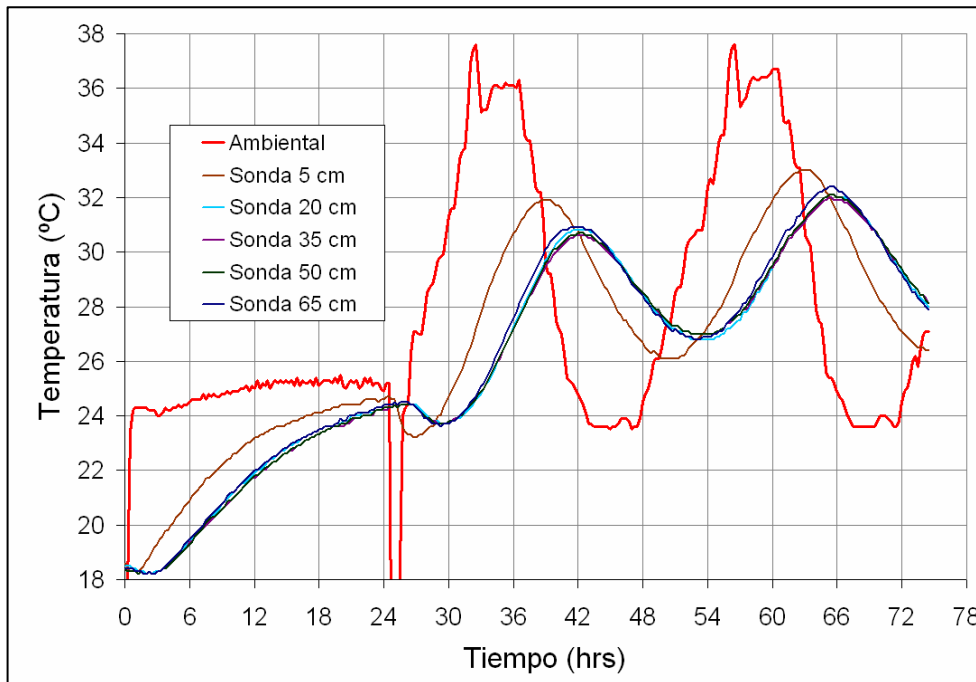
Con el objeto de reproducir lo mejor posible las condiciones reales se eligió comenzar los ciclos térmicos a la hora del inicio de la producción de hormigón, es decir, en el entorno de las 6:00 hrs. por la mañana. Según el ciclo climático de las condiciones de verano (ver [apartado 3.4.1](#) en [Capítulo 3](#)) a las 6:00 hrs. se tiene una temperatura de alrededor de 29 °C y una humedad relativa del 27%, por lo cual sería conveniente comenzar los ciclos térmicos a una temperatura similar a éstas iniciales para no tener cambios muy marcados al inicio de los ciclos. Debido a esto se decidió almacenar los materiales con anticipación en la cámara climática y programar esta con parámetros constantes de temperatura de 29 °C y humedad relativa del 27% el tiempo suficiente para que los áridos alcanzasen esta temperatura aproximadamente. Después de 24 horas de observación de la evolución térmica de los áridos se observó que este tiempo fue suficiente para alcanzar aproximadamente este valor de temperatura y se procedió a iniciar los ciclos térmicos en la cámara.

Para el caso de la arena se realizaron dos ciclos térmicos y para el caso de la grava se hicieron tres ciclos térmicos. Los perfiles térmicos de los áridos así como el análisis de los resultados se muestran a continuación.

#### **5.5.7 Resultados obtenidos**

##### Resultados obtenidos para la arena 0-5 mm

A continuación se muestra en la [figura 5.41](#) los resultados obtenidos para el caso de la arena de 0-5 mm.



*Figura 5.41.- Perfil térmico de la arena de 0-5 mm*

Pueden verse en la figura anterior dos ciclos de 24 horas de temperatura ambiental precedidos por 24 horas de temperatura ascendente desde 24 °C hasta 25 °C aproximadamente, sin embargo debido a un problema con la cámara climática hubo un descenso en la temperatura ambiental de duración aproximada de 1 hora. Por otro lado podemos ver que la sonda colocada a 5 centímetros sobre la superficie es un poco más sensible a los cambios térmicos que las demás, presentando todas estas prácticamente el mismo comportamiento.

#### Resultados obtenidos para la grava 12-20 mm

A continuación se muestra en la **figura 5.42** los resultados obtenidos para el caso de la grava de 12-20 mm.

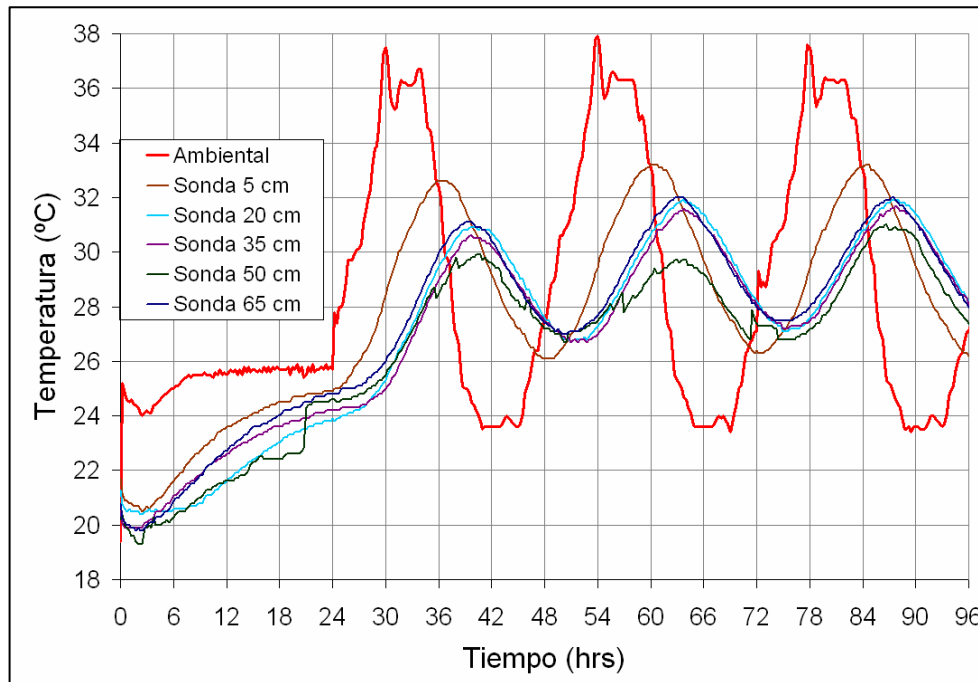
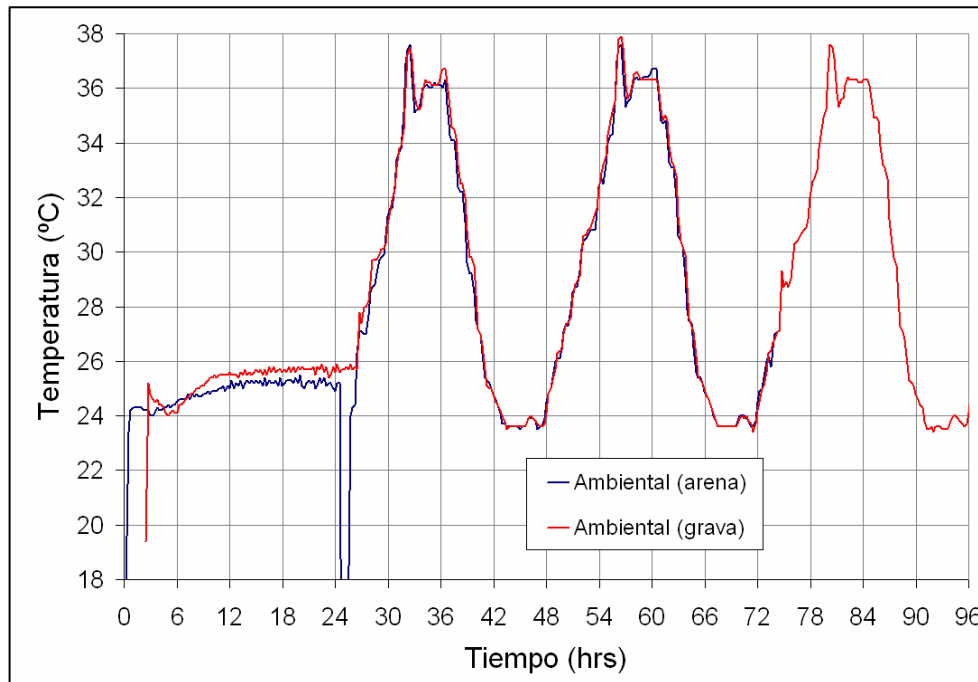


Figura 5.42.- Perfil térmico de la grava de 12-20 mm

Analizando la figura anterior, en la cual se presentan tres ciclos de 24 horas precedidos también de 24 horas con un ascenso desde los 25 °C hasta los 26 °C aproximadamente, podemos observar el mismo comportamiento descrito en la [figura 5.41](#) en el sentido de la mayor sensibilidad a los cambios térmicos de la sonda más superficial respecto a las demás. Sin embargo se puede ver un hecho anómalo en la sonda de 50 centímetros de profundidad ya que sigue una trayectoria muy diferente a las demás sondas aun estando en una parte intermedia de la altura del recipiente cilíndrico, lo anterior es posible que se deba a algún fallo en la sonda o en el sistema de adquisición de datos.

#### Comparación de temperaturas ambientales de grava y arena

Con el objeto de poder hacer una comparativa entre las dos clasificaciones de áridos es preciso poder comparar las temperaturas ambientales. A continuación se muestra la [figura 5.43](#) en la cual se han graficado simultáneamente las dos temperaturas ambientales para la arena y para la grava.



*Figura 5.43.- Temperatura ambiental para la arena y la grava*

Puede verse en la figura anterior que prácticamente no hubo variación alguna entre las temperaturas ambientales programadas para el caso de la arena y para el caso de la grava, a excepción del período de 24 horas inicial en el cual existe una variación constante de aproximadamente 0,50 °C, así como el descenso en las temperaturas registrado para el caso de las arenas.

#### Resultados de la sonda colocada a 5 centímetros de la superficie

A continuación se muestra la **figura 5.44** en la cual se han graficado los valores térmicos obtenidos para la arena y la grava a 5 centímetros de la superficie.

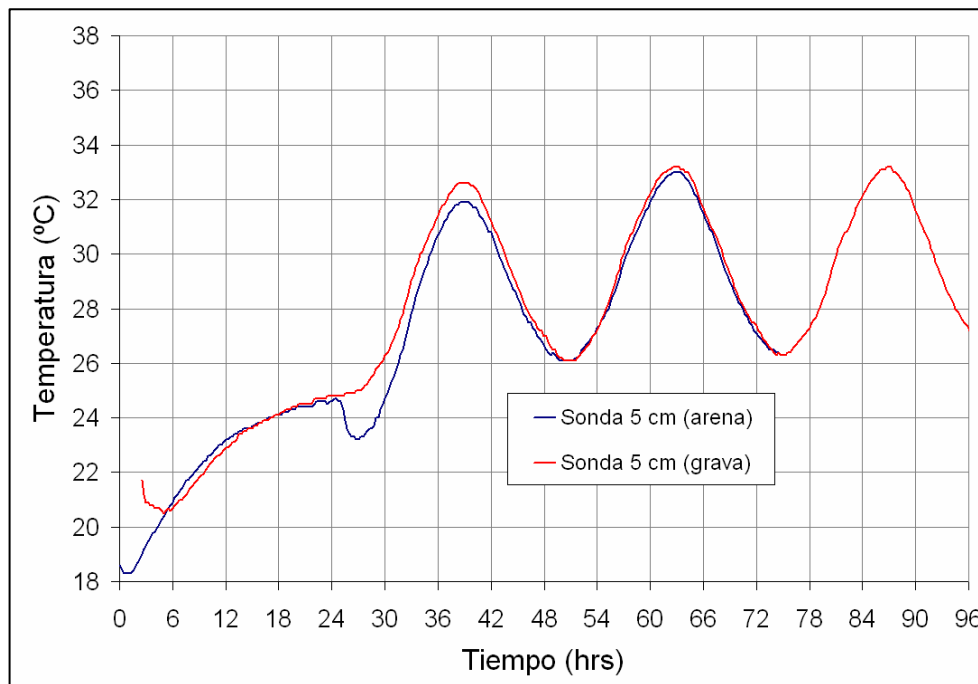
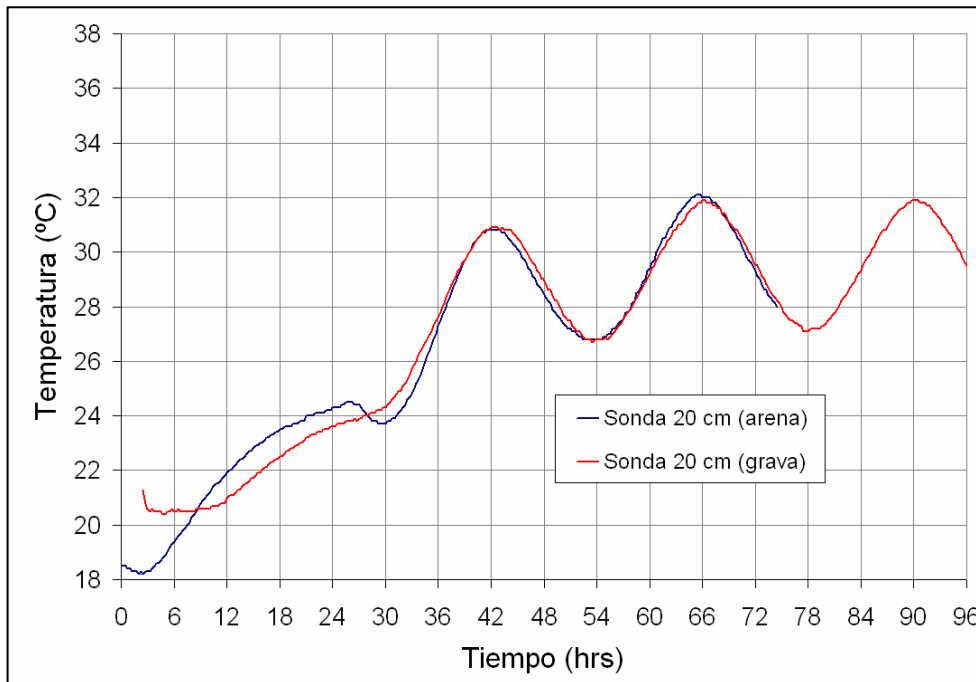


Figura 5.44.- Perfil térmico de la sonda colocada a 5 cm para la arena y grava

Podemos ver en la figura anterior que el comportamiento térmico de la arena y de la grava es prácticamente el mismo para esta sonda, sin embargo puede verse una pequeña desviación entre las 24 y 30 horas fruto de la caída súbita de la temperatura ambiental algunos minutos antes, de igual forma esta anomalía tiene consecuencias en el primer pico de máximos donde la temperatura máxima de la arena es menor que la de la grava, no obstante en el segundo pico los dos áridos tienen un comportamiento idéntico. Para el caso de los picos de mínimos no hay diferencia alguna.

#### Resultados de la sonda colocada a 20 centímetros de la superficie

A continuación se muestra la **figura 5.45** en la cual se han graficado los valores térmicos obtenidos para la arena y la grava a 20 centímetros de la superficie.



*Figura 5.45.- Perfil térmico de la sonda colocada a 20 cm para la arena y grava*

Podemos ver en la figura anterior que el comportamiento térmico de la arena y de la grava es prácticamente el mismo para esta sonda, sin embargo puede verse una pequeña desviación a las 30 horas fruto de la caída súbita de las temperaturas algunos minutos antes. Para el caso de los picos de mínimos no hay diferencia alguna.

#### Resultados de la sonda colocada a 35 centímetros de la superficie

A continuación se muestra la **figura 5.46** en la cual se han graficado los valores térmicos obtenidos para la arena y la grava a 35 centímetros de la superficie.

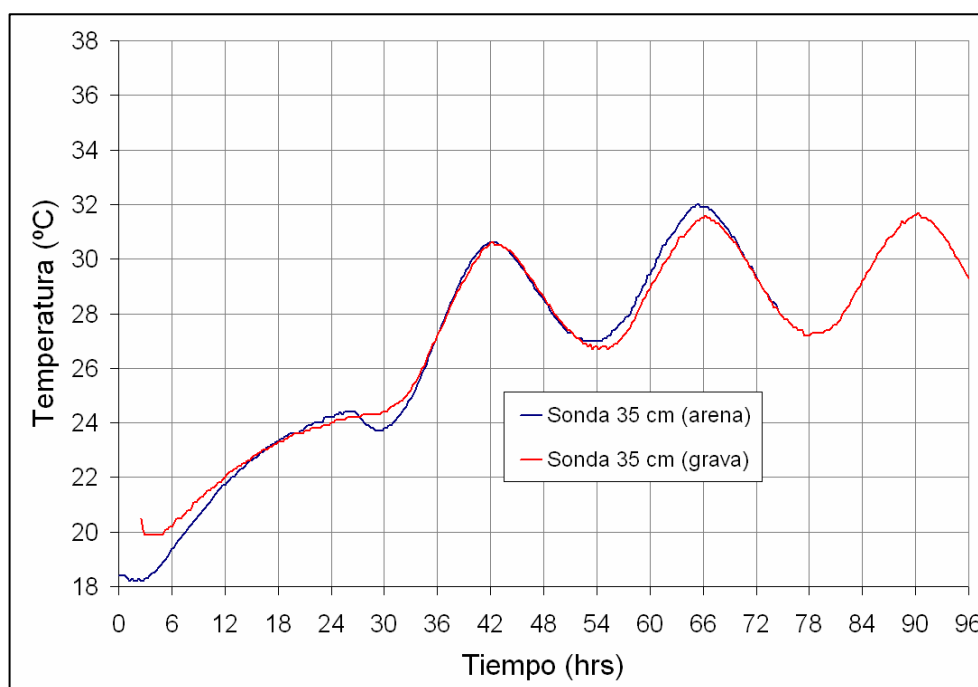
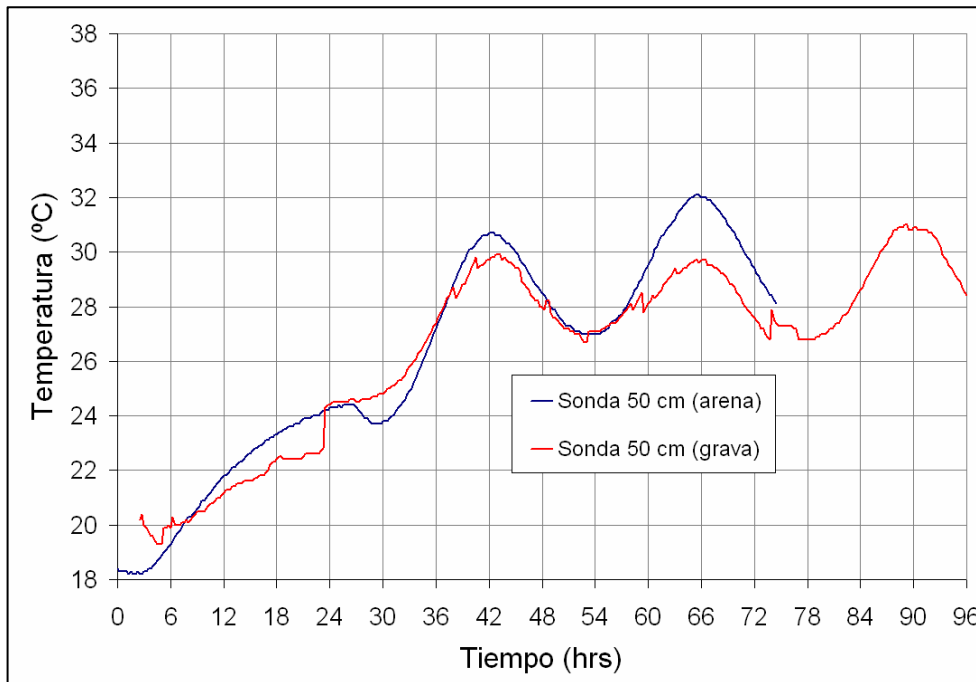


Figura 5.46.- Perfil térmico de la sonda colocada a 35 cm para la arena y grava

De igual forma que en los perfiles analizados anteriormente se observa que la inercia térmica de la arena y de la grava es prácticamente la misma, sin embargo en el segundo ciclo se observa una diferencia poco significativa.

#### Resultados de la sonda colocada a 50 centímetros de la superficie

A continuación se muestra la [figura 5.47](#) en la cual se han graficado los valores térmicos obtenidos para la arena y la grava a 50 centímetros de la superficie.



*Figura 5.47.- Perfil térmico de la sonda colocada a 50 cm para la arena y grava*

Como se mencionó anteriormente en los resultados de la grava 12-20 mm, la sonda colocada a 50 centímetros de profundidad en la grava es probable que se haya tenido un problema con los registros por lo cual estas lecturas pueden no ser tomadas en cuenta.

#### Resultados de la sonda colocada a 65 centímetros de la superficie

A continuación se muestra la **figura 5.48** en la cual se han graficado los valores térmicos obtenidos para la arena y la grava a 65 centímetros de la superficie.



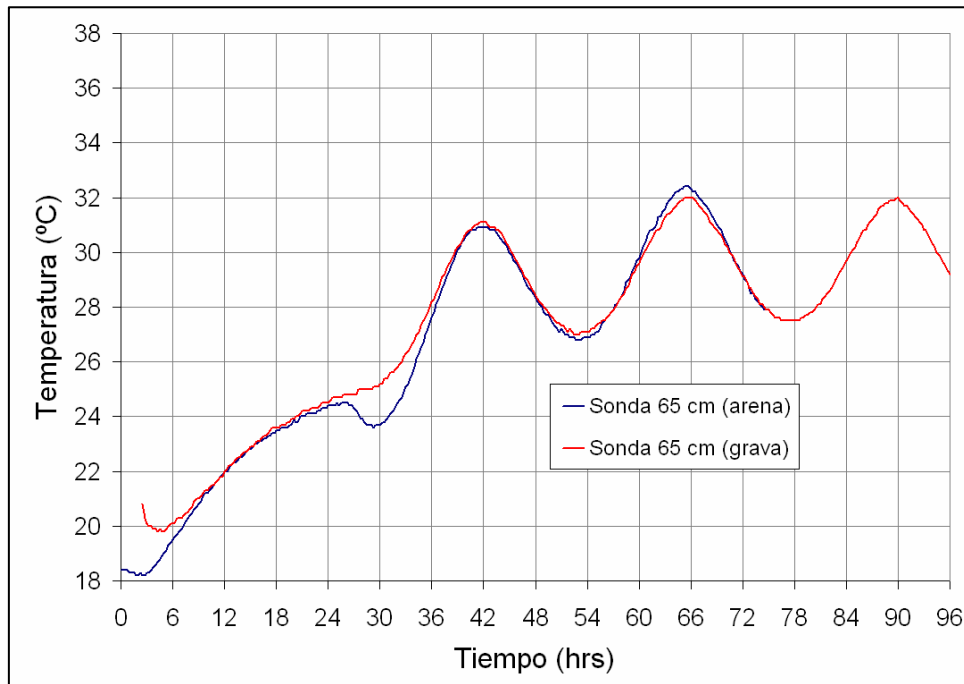


Figura 5.48.- Perfil térmico de la sonda colocada a 65 cm para la arena y grava

Para esta profundidad de medición, igualmente los registros tienen una muy buena concordancia entre inercia térmica de la arena y de la grava, por lo cual no es necesaria alguna explicación adicional.

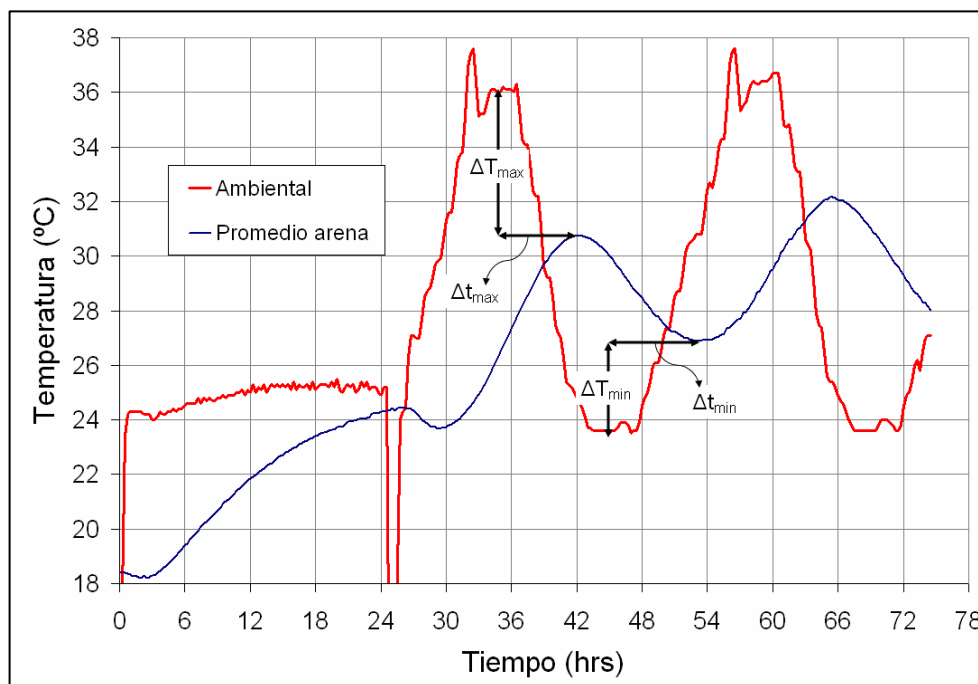
### 5.5.8 Cuantificación de la inercia térmica de los áridos

Con el objeto de poder determinar las curvas tiempo-temperatura de los áridos (inercia térmica) en función de la temperatura ambiental, es necesario conocer el desfase térmico y horario de los mismos para poder de esta forma conocer su temperatura a cualquier hora del día, principalmente al momento de fabricación del hormigón.

Para simplificar la medición de estos desfases térmicos se tomará un perfil térmico característico que represente el comportamiento general al centro de la altura del cilindro. Por lo tanto se puede tomar como perfil característico el promedio de las lecturas registradas en las sondas desde los 20 hasta los 65 centímetros, descartando la sonda de 5 centímetros.

### Desfase térmico y horario de la arena 0-5 mm

A continuación se muestra en la **figura 5.49** el resultado de esta operación graficando la temperatura ambiental y la temperatura promedio del árido obteniendo el perfil térmico característico de la arena. Asimismo en esta figura se representan los desfases térmicos como  $\Delta T_{\max}$  el desfase térmico en los picos de máximos y como  $\Delta T_{\min}$  el desfase térmico en los picos de mínimos. De igual forma  $\Delta t_{\max}$  significa el desfase horario en los picos de máximos y  $\Delta t_{\min}$  el desfase horario en los picos de mínimos.



*Figura 5.49.- Perfil térmico característico de la arena*

### Desfase térmico y horario de la grava 12-20 mm

De igual forma que para el caso de la arena, a continuación se muestra la **figura 5.50** en donde se hizo el mismo procedimiento anteriormente descrito.

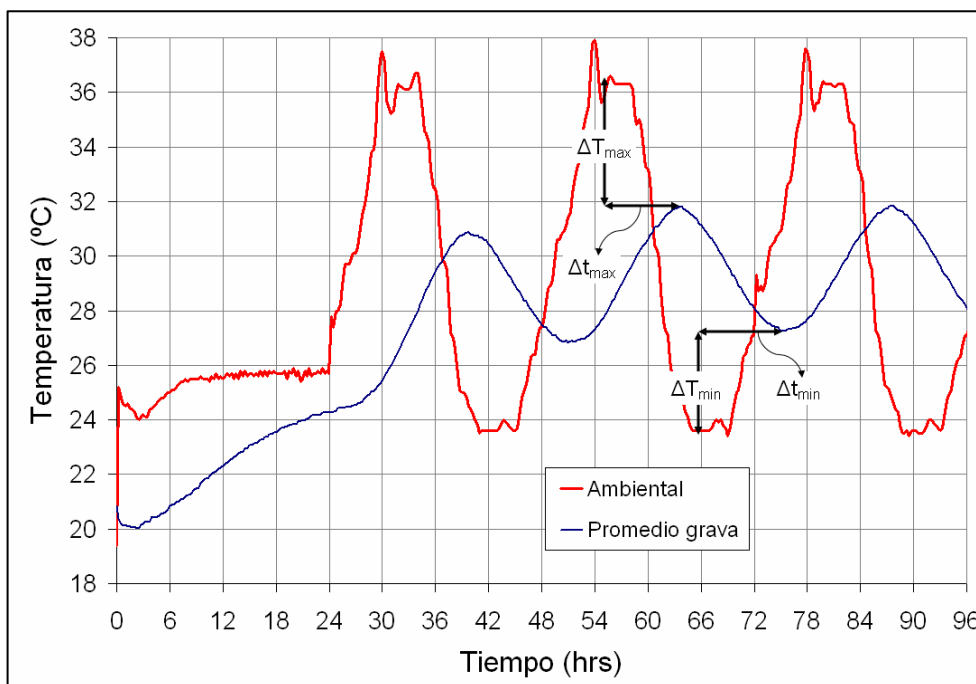


Figura 5.50.- Perfil térmico característico de la grava

Resumen de desfases térmicos y horarios de los áridos

A continuación se presenta la **tabla 5.12** en donde se muestran los valores obtenidos de desfases térmicos para los áridos.

Árido	Desfase térmico (°C)		Desfase horario (hr)	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Arena 0-5 mm	5,0	3,5	7,75	7,75
Grava 12-20 mm	5,0	3,5	7,75	7,75

Tabla 5.12.- Desfases térmicos y horarios de los áridos

Puede verse en la tabla anterior que los desfases térmicos y horarios son exactamente iguales para la arena y para la grava. Estos valores, serán tomados posteriormente en el **Capítulo 7** para verificar el planteamiento de determinación de los perfiles térmicos de los áridos, en base a los coeficientes de conductividad térmica.

### **5.5.9 Conclusiones**

En general, después de haber analizado los perfiles correspondientes a la inercia térmica de la arena y de la grava pueden hacerse las siguientes conclusiones:

- La sonda colocada a 5 centímetros de la superficie es la que más sensibilidad tiene a los cambios térmicos teniendo desfases térmicos y horarios menores a las sondas colocadas a mayor profundidad, esto es aplicable tanto para la arena como para la grava.
- El comportamiento en cuanto a inercia térmica es prácticamente el mismo para las sondas colocadas desde 20 hasta 65 centímetros, igualmente este fenómeno es aplicable para las arenas y para las gravas.
- El tipo de recipiente utilizado no influye sobre las determinaciones registradas ya que el diámetro del mismo (radio) es superior a las dimensiones en las que se observa cierta afectación.
- La placa aislante de “porexpan” colocada en la parte inferior del recipiente cilíndrico muestra muy buenos resultados desde el punto de vista de aislamiento térmico, ya que las lecturas registradas en las sondas colocadas a 65 centímetros prácticamente no presentan diferencia alguna respecto a las sondas colocadas en la parte central del cilindro (20, 35 y 50 centímetros).
- Las temperaturas ambientales desarrolladas y registradas para la arena y para la grava son exactamente iguales, lo cual nos permite realizar con toda fiabilidad un análisis comparativo entre las inercias térmicas de la arena y de la grava.
- El problema tenido respecto a la caída súbita de las temperaturas ambientales para el caso de la arena tiene repercusiones directas sobre el primer pico de máximos, teniéndose resultados diferenciales entre la arena y la grava en esta etapa del ensayo.
- El hecho de que no existan diferencias entre los perfiles térmicos de la arena 0-5 mm y de la grava 12-20 mm hacen suponer que para granulometrías intermedias entre estas clasificaciones, el comportamiento en cuanto a inercia térmica de estos áridos intermedios deberá ser muy similar al mostrado para la arena y la grava.
- Los desfases térmicos y horarios obtenidos en base a los perfiles térmicos característicos son exactamente iguales para la arena y para la grava. Es decir para el caso de los desfases térmicos se tienen valores de 5,0 °C (máximo) y 3,5 °C (mínimo) y para el caso de los desfases horarios se obtuvieron valores de 7,75 horas (máximo y mínimo), estos valores igual para arena y para grava.

## **5.6 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA HUMEDAD SUPERFICIAL Y LA TEMPERATURA DE LOS ÁRIDOS EN LAS PROPIEDADES DEL MORTERO**

### **5.6.1 Introducción**

En base a los resultados globales obtenidos en todas las campañas experimentales de este capítulo, en los cuales se observó que los áridos tienen una gran influencia en el comportamiento del hormigón, al ser el constituyente con mayor presencia en la masa de hormigón, se determinó, dentro del marco de esta investigación experimental, realizar una investigación sobre la influencia de la humedad superficial y la temperatura en las propiedades intrínsecas de fricción de los áridos y en la incidencia de la absorción de los áridos en la trabajabilidad y resistencia del mortero, específicamente áridos finos o arenas.

La razón de ser de estos ensayos radica en la necesidad de conocer si los efectos ampliamente observados de pérdida de trabajabilidad y de resistencia a mayor temperatura de los áridos, se debe a su mayor capacidad de absorción de agua o solo al efecto que su temperatura pudiera producir a nivel microestructural en el hormigón. Además de conocer y explicar este fenómeno se pretende cuantificar su influencia mediante algunos ensayos experimentales.

En este documento se muestran los ensayos realizados y los resultados obtenidos en esta serie experimental, se elaboran las conclusiones y se marcan posibles estudios futuros en este sentido.

### **5.6.2 Objetivos**

El presente apartado tiene como objetivo definir el plan de trabajo realizado y los resultados obtenidos con los áridos, en los que se han simulado las condiciones climáticas estudiadas en función de la temperatura y la humedad relativa, las cuales se han mantenido constantes para cada condición térmica. Este plan de trabajo alcanza tanto a dichas condiciones como a los materiales utilizados y el tipo de ensayos realizados. Los resultados correspondientes a estos ensayos se muestran y analizan posteriormente en este mismo capítulo. Asimismo se realiza un análisis de los mismos y se redactan las conclusiones principales.

El objetivo principal de este trabajo es determinar el comportamiento y propiedades de los áridos bajo diferentes simulaciones climáticas (referencia, verano e invierno) y a diferentes contenidos de humedad superficial del árido, desde el contenido inicial de humedad (cerca a 0%) hasta un estado cercano al de saturación con superficie seca, pasando por otros niveles de humedad superficial. Asimismo se pretende conocer y cuantificar la influencia de dichas propiedades en la trabajabilidad y resistencia a compresión de probetas de mortero fabricadas con arena sometida a estas condiciones.

Principalmente se realizaron ensayos paramétricos de medición del talud de reposo y estabilidad del material, compactación dinámica (vibratoria) de los áridos y capacidad de ser penetrados por una sonda de Vicat a diferentes temperaturas ambientales y a diferentes niveles de humedad superficial de las partículas de los áridos. Es decir, determinar estos parámetros bajo tres condiciones climáticas y con diferentes estados de humedad de los áridos. Posteriormente se fabricó mortero con arena 0-5 mm (caliza), sometida a diferentes temperaturas y contenidos de humedad y se determinó su consistencia y su resistencia a flexión y compresión a 28 días.

Por otro lado, los objetivos específicos de esta serie de ensayos, en relación al estudio de la influencia de la humedad superficial y la temperatura de los áridos en su comportamiento, son los siguientes:

- Determinar el comportamiento y propiedades de los áridos finos bajo diferentes simulaciones climáticas y a diferentes contenidos de humedad superficial del árido, en función de algunos parámetros de fácil medición.
- Conocer y cuantificar la influencia de dichas propiedades en la trabajabilidad y resistencia a compresión de probetas de mortero fabricadas con arena sometida a estas condiciones.
- Conocer si los efectos de pérdida de trabajabilidad y resistencia a mayor temperatura de los áridos, es debido a la mayor absorción de éstos o al efecto que produce la temperatura a nivel microestructural en la cristalización del cemento, o bien, una combinación de ambos.
- Formular las conclusiones que permitan implementar a nivel industrial algún proceso de humidificación o aspersión de los áridos con el objeto de mejorar la trabajabilidad y la resistencia del hormigón.

### **5.6.3 Simulación de las condiciones climáticas (temperatura y humedad relativa)**

En esta campaña experimental, a igualdad de las anteriores, se han simulado tres condiciones climáticas correspondientes a la condición de referencia, verano e invierno. Para el caso de la condición de referencia, la temperatura ambiente se mantuvo constante a 20 °C y la humedad relativa se mantuvo también constante en 60%. Para el caso de las condiciones de verano, la temperatura fue de 38 °C y la humedad relativa del 60%, ambas constantes también. Por último, las condiciones de invierno fueron simuladas con una temperatura ambiente de 6 °C y humedad relativa del 60%, ambas constantes.

### **5.6.4 Cámara climática utilizada**

Los ensayos fueron realizados en la cámara climática del LTE de la UPC, dicha cámara climática es controlada por un ordenador para la programación de diferentes

ciclos climáticos o condiciones térmicas constantes. De igual forma que en casos anteriores, los materiales (áridos) y equipo fueron almacenados en la cámara 72 horas antes de realizar los ensayos; lo anterior con el objeto de someter los materiales a las condiciones térmicas estudiadas en cada caso.

En el **Capítulo 3** pueden verse algunos detalles de esta cámara en el **apartado 3.3.1**. Cabe mencionar que por razones logísticas y de facilidad de ejecución, algunos ensayos fueron realizados en el exterior de la cámara tratando siempre de estar expuestos el mínimo tiempo a la temperatura exterior.

### 5.6.5 Condiciones de humedad del material

Cada tipo de ensayo se realizó sobre los áridos bajo diferentes condiciones de humedad, desde una humedad nula o muy cercana a cero, hasta más allá del contenido de humedad correspondiente a saturación y superficie seca. Para ir dando humedad al material se utilizó un pulverizador de jardinería controlando aproximadamente la cantidad de agua mediante el número de pulsaciones del gatillo, tal como se muestra en la **figura 5.51**.



*Figura 5.51.- Método de humidificación de los áridos*

Cabe mencionar en este apartado, que hay que diferenciar en este caso las situaciones de agua superficial y agua absorbida de los áridos con la medición del contenido de humedad de éstos. Esta afirmación responde al hecho de que cuando se mide el contenido de humedad de los áridos por diferencia de peso entre el estado húmedo y el seco, se obtiene la cantidad de agua (expresada en porcentaje) total del árido, incluyendo el agua superficial y la que haya podido absorber hasta un momento dado.

Por ejemplo, hay que diferenciar la definición de absorción de un árido, -la cual responde al contenido de humedad correspondiente al de saturación y superficie seca de las partículas de los áridos-, con un contenido de humedad igual a este valor de la absorción pero en el que parte del agua esté presente superficialmente y no haya sido absorbida aún por las partículas. Lo anterior obedece a que para la determinación de la absorción, los áridos han de saturarse 24 horas e irse secando progresivamente hasta llegar a este estado, en el que se mide la humedad. Para nuestro caso, los áridos comienzan estando secos y el agua se va adicionando progresivamente, midiendo en cada adición de agua el contenido de humedad, hasta llegar a un valor de contenido de humedad cercano al de la absorción.

Para ilustrar lo anterior puede decirse que por ejemplo, en la primera adición de agua, la mayoría de la humedad aportada a los áridos será superficial, sin embargo, posteriormente y como nos vayamos acercando al contenido de humedad correspondiente al de la absorción, los áridos habrán absorbido parte del agua que se ha ido adicionando desde el principio, por lo que la tasa de absorción en función del tiempo se irá reduciendo.

Por todo lo expresado anteriormente, puede decirse que las propiedades intrínsecas de los áridos o la forma en que influenciarán el comportamiento del mortero o del hormigón en estado fresco y endurecido, será diferente cuando los áridos estén en una situación de saturación y superficie seca y no puedan absorber mas agua, que cuando el contenido de humedad de dichos áridos (agua superficial y absorbida) sea igual a este valor y en este caso, puedan absorber mas agua.

### **5.6.6 Variables estudiadas y materiales utilizados**

Con el objeto de cuantificar mediante ciertos parámetros el comportamiento intrínseco de los áridos finos bajo diferentes temperaturas y contenidos de humedad partiendo de cero, se han ideado algunos métodos experimentales de ensayo. A continuación se enlistan las variables estudiadas, posteriormente en otro apartado se explicarán los procedimientos experimentales de cada ensayo con mayor detalle:

- Evolución del contenido de humedad de los áridos.
- Penetración de la sonda de Vicat ( $\phi = 10$  mm,  $m = 300$  g).
- Densidad compactada (mecánicamente).
- Determinación de los ángulos de reposo y estabilidad.
- Fabricación y consistencia del mortero en estado fresco (mesa de sacudidas) - (arena 0-5 mm).
- Resistencia a flexión de probetas prismáticas de mortero a 28 días (arena 0-5 mm).
- Resistencia a compresión de mortero a 28 días (arena 0-5 mm).

Los materiales utilizados y su caracterización se describen en el **apartado 3.2 del Capítulo 3** de esta tesis.



### 5.6.7 Ensayos realizados y procedimiento experimental

A continuación se describen los procedimientos experimentales de los ensayos realizados sobre los áridos estudiados. En todos los casos, los materiales (áridos, agua, cemento) así como el equipo utilizado, fueron depositados en la cámara funcionando según la condición térmica, 72 horas antes de realizar los ensayos, con el objeto de que fueran adaptados a las condiciones de temperatura y humedad relativa constantes. Los resultados obtenidos así como el análisis de cada uno de los ensayos se muestran más adelante en este mismo capítulo.

#### Evolución del contenido de humedad de los áridos

Tal como se mencionó anteriormente, se agregó humedad progresivamente a los áridos y se iba midiendo el contenido de humedad de éstos por diferencias de peso entre estado húmedo y seco. El procedimiento seguido corresponde a lo indicado en la norma [ASTM C566-97](#), con la única excepción de que los áridos eran secados en un horno de microondas después de 5 minutos de exposición.

Los niveles de contenido de humedad iban desde cero hasta un poco más allá del valor correspondiente al estado de saturación y superficie seca. Aproximadamente se hacían de 5 a 7 puntos de contenido de humedad (incluyendo los extremos) y para cada punto se realizaban todos los demás ensayos, exceptuando la realización de morteros con arena 0-5 mm.

Dichos morteros se realizaron en estado de humedad de la arena seco (inicial), intermedio y húmedo (final). A manera de ilustración del método de ganancia de humedad de los áridos, se muestran a continuación las siguientes fotografías ([figuras 5.52, a y b](#)), en las cuales se observan las diferencias en cuanto apariencia entre los áridos secos y húmedos al final del ensayo.



(a)-arena seca

(b)-arena húmeda

Figura 5.52.- Áridos secos y húmedos

Penetración de la sonda de Vicat ( $\varphi = 10 \text{ mm}$ ,  $m = 300 \text{ g}$ )

Este ensayo consiste en medir la capacidad de la arena de ser penetrada por una sonda de Vicat de 10 mm de diámetro sin ejercer ninguna fuerza de penetración más que la propia fuerza correspondiente a la aceleración por la masa de la sonda, que es de 300 gramos.

Para efectuar este ensayo se utiliza el aparato de Vicat señalado en la norma [ASTM C187-98](#). El procedimiento consistió en llenar el recipiente especificado con dos tongadas de arena sin ejercer compactación alguna, posteriormente se enrasaba y se colocaba la sonda por encima de la superficie de la arena, es decir, casi al ras de esta. Luego se dejaba caer y se medía la penetración de la sonda desde la parte superior del recipiente. Este ensayo se repetía cuatro veces para cada contenido de humedad. En la siguiente fotografía ([figura 5.53](#)) se muestra la configuración del ensayo una vez realizado.



*Figura 5.53.- Ensayo de penetración de la sonda de Vicat en la arena*

Densidad compactada (mecánicamente)

Un factor importante durante el amasado y transporte del hormigón es la energía dinámica de agitación que sufre el hormigón durante estos procesos, esta energía dinámica hace que el hormigón se compacte y que las partículas se acomoden entre ellas

en función de su tamaño. Cuando este acomodamiento de partículas o compactación es muy prolongado en el tiempo, la trabajabilidad del hormigón disminuye y complementada con los otros factores que afectan esta trabajabilidad, el hormigón perderá calidad en algunas de sus propiedades.

Por otro lado, partiendo de la suposición de que el mejor o peor acomodamiento de partículas de los áridos dependa de su condición de temperatura y humedad, nos planteamos en esta serie experimental determinar la influencia de estas dos variables (contenido de humedad superficial de los áridos y temperatura ambiental) en la capacidad de compactación de los áridos bajo energía dinámica (vibratoria).

Este mismo ensayo se realizó anteriormente y los procedimientos experimentales y resultados se muestran en este mismo capítulo en el **apartado 5.4**, sin embargo, en este caso se modificaron algunos aspectos experimentales como el recipiente utilizado y el tiempo de vibración. En este caso el recipiente era cilíndrico y de 5 litros de capacidad volumétrica (diámetro = 188,1 mm y altura = 180,0 mm) y por otra parte no tenía perforaciones en la parte inferior.

El procedimiento experimental era llenar el molde progresivamente con un cucharón metálico teniendo cuidado de no ejercer compactación alguna sobre el material previamente vertido. Una vez llenado el molde se enrasaba con una regla metálica, también sin ejercer compactación sobre el material. El molde se pesaba y posteriormente se colocaba sobre la mesa de vibración (afuera de la cámara climática).

El hecho de realizar la vibración fuera de la cámara climática responde a la posible influencia de la temperatura en la frecuencia de vibración de la mesa por la capacidad de la temperatura de modificar las propiedades de viscosidad del aceite del motor, este efecto podría alterar los resultados obtenidos. El tiempo de vibración en este caso fue de 15 segundos, ya que el material se compactaba en los primeros segundos de vibración y por lo tanto, mayores tiempos de vibración no aportaban una compactación mayor.

En las **figuras 5.54 (a y b)**, se muestran algunas diferencias entre los áridos antes y después de ser compactada. En estas fotografías puede verse la compactación provocada por la aplicación de energía mediante vibración.

Posteriormente al vibrado, se medían los asentamientos en 9 puntos, incluyendo el centro y se obtiene la media de los asentamientos; con estos datos se calculaba la densidad compactada. Como siempre, los resultados obtenidos y su análisis se muestran mas adelante en este mismo capítulo. En la **figura 5.55**, puede verse también la configuración de la malla empleada dentro de la sección del molde para realizar las mediciones de asentamiento.



(a)-antes de compactación



(b)-después de compactación

Figura 5.54.- Detalle de compactación dinámica de los áridos

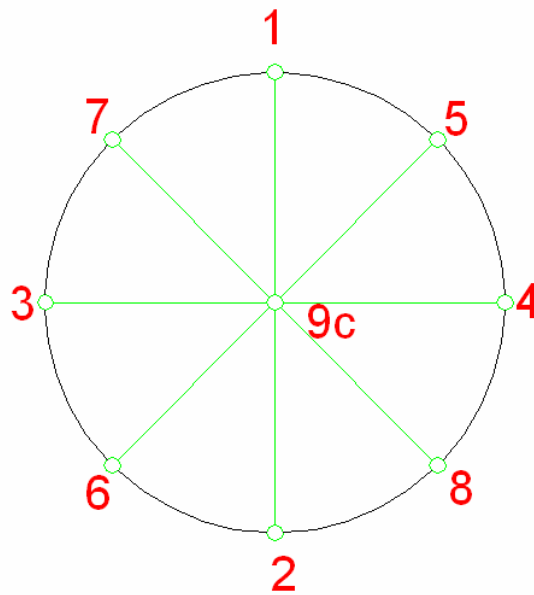


Figura 5.55.- Configuración de la malla empleada para medir asentamientos

### Determinación de los ángulos de reposo y estabilidad

Con el objeto de determinar aproximadamente y de manera indirecta el ángulo de rozamiento o de fricción interna de la arena y su influencia con la temperatura, se ideó un método específico para su sencilla realización sin tener que recurrir a ensayos más elaborados como el de corte directo, los cuales se utilizan normalmente en geotecnia. En este sentido, se utilizó un inclinómetro que nos permite de manera rápida y sencilla obtener este valor mediante la inclinación de la superficie sobre la cual se coloca el árido y de esta forma medir el ángulo al cual la arena se desploma totalmente.

En este caso el contenido de humedad de la arena fue solamente uno, el cual fue nulo (0%) secándose previamente en el horno por 24 horas.

El procedimiento experimental utilizado se explica a continuación; el ensayo se hizo para cada una de las tres condiciones climáticas (invierno, referencia y verano) y para las dos arenas estudiadas de 0-5 y 0-2 mm, asimismo cada ensayo se repitió 3 veces. Una vez dejada 24 horas la arena en su condición climática correspondiente se procedía a llenar un molde metálico tronco-cónico, como el especificado normalmente para medir la consistencia del mortero en estado fresco en la mesa de sacudidas (EN 196-1), colocado en el centro de la superficie. El procedimiento consiste en verter suavemente la arena sobre este molde, se enrasa y sin ejercer ninguna compactación se retira el molde verticalmente y despacio dejando que la arena caiga libremente a los lados. Posteriormente se miden los dos diámetros perpendiculares entre sí de la extensión que ocupa la arena y la altura del cono en la cresta con un vernier. El valor del talud estático o de reposo de la arena se calcula en función del diámetro final (dividido entre 2) y la altura del cono.

El ángulo de estabilidad de la arena se obtiene por medio del inclinómetro, girando la manivela hasta que debido a la inclinación de la superficie la arena se colapse. El ángulo de inclinación registrado en grados sexagesimales es lo que se le llamó 'ángulo de estabilidad'. En todos los casos, el contenido de humedad de las muestras de arena era cero.

Con el objeto de verificar y comparar los valores del ángulo de reposo, en este caso también se determinaron en laboratorio los ángulos de rozamiento interno de las arenas objeto de estudio, de acuerdo con la norma [ASTM D3080-98](#), utilizando tres esfuerzos normales de 50, 100 y 150 kPa, a una temperatura constante de 21 °C.

A continuación en la [figura 5.56](#) se muestra una fotografía del inclinómetro utilizado para cuantificar el ángulo de inclinación de las arenas así como del recipiente tronco-cónico.



Figura 5.56.- Detalle del Inclínómetro y llenado del molde

También se incluyen las siguientes fotografías (**figuras 5.57 a y b**) donde muestran algunos detalles de enrase y medición del diámetro del cono de arena una vez retirado el molde. Asimismo, las figuras **5.58 (a y b)** muestran como el cono de arena pierde su forma conforme se inclina la superficie.



(a)-enrase

(b)-medición

Figura 5.57.- Enrase y medición



(a) (b)  
 Figura 5.58.- Proceso de inclinación de superficie

Fabricación y consistencia del mortero en estado fresco (mesa de sacudidas) - (arena 0-5 mm).

Con el objeto de determinar la influencia de la humedad superficial de la arena, así como de la temperatura ambiental y de la propia arena, en la trabajabilidad y resistencia mecánica del mortero, se elaboraron morteros con arena de 0-5 mm (caliza) y cemento Portland CEM I 42,5 R, el mismo que se ha venido utilizando anteriormente para fabricar hormigones y morteros en las campañas pasadas. La dosificación empleada se muestra a continuación en la **tabla 5.13**. Esta dosificación es la que se especifica en la normativa empleada, que en este caso fue la norma EN 196-1 “Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas.”.

Material	Dosificación (gramos)
Cemento	450 ± 2
Agua	225 ± 1
Arena 0-5 mm	1350 ± 5

Tabla 5.13.- Materiales y dosificación para la fabricación de morteros

A diferencia de la norma, en lugar de haber utilizado arena normalizada, en este caso se utilizó la arena de 0-5 mm, caliza. La relación agua/cemento se mantuvo constante siempre en 0,5, es decir antes de elaborar cada mortero se determinaba el

contenido de humedad real de la arena y se realizaba un ajuste en la cantidad de agua por peso. Por lo anterior siempre se contaba con la misma cantidad de agua, pudiendo estar libremente o contenida en los áridos (superficialmente o parcialmente absorbida por éstos).

La secuencia de adición de materiales y amasado corresponde a la especificada en las normas antes mencionadas, cambiando solamente algunos detalles. A continuación se muestra la secuencia utilizada (Método 1):

- a) Verter el agua dentro del recipiente y añadir el cemento.
- b) Inmediatamente arrancar la amasadora a velocidad lenta y, después de 30 segundos, parar e introducir toda la arena. Amasar por 30 segundos más a velocidad lenta. Cambiar a velocidad rápida y continuar el amasado durante otros 30 segundos.
- c) Parar la amasadora durante 1 minuto. En los primeros 15 segundos quitar, por medio de una espátula de goma todo el mortero adherido fuera de la zona de amasado y volverlo a la mezcla.
- d) Continuar el amasado a la velocidad rápida durante 60 segundos.

Sin embargo, cabe mencionar aquí que con el objeto de determinar la influencia de la secuencia de adición de materiales en la consistencia y en la resistencia, se modificó este método de adición de materiales de la siguiente forma (Método 2):

- a) Verter toda la arena dentro del recipiente y añadir una parte del agua de amasado, aproximadamente la mitad del agua.
- b) Inmediatamente arrancar la amasadora a velocidad lenta y, después de 30 segundos, parar e introducir el cemento. Amasar por 30 segundos más a velocidad lenta.
- c) Parar e introducir el resto de agua de amasado. Amasar 30 segundos a velocidad lenta, posteriormente pasar a velocidad rápida sin parar y amasar así durante otros 30 segundos.
- d) Parar la amasadora durante 1 minuto. En los primeros 15 segundos quitar, por medio de una espátula de goma todo el mortero adherido fuera de la zona de amasado y volverlo a la mezcla.
- e) Continuar el amasado a la velocidad rápida durante 60 segundos.

Esta modificación del método de amasado solamente se realizó para la situación de la arena en estado seco o casi seco. A este segundo método de amasado modificado, se le llamó ‘Método 2’ y al primer método se le llamó ‘Método 1’, lo anterior con el objeto únicamente de diferenciación. Asimismo es preciso mencionar que la amasada del mortero se llevó a cabo fuera de la cámara climática en una amasadora eléctrica.

Por otro lado, a continuación se muestra la **figura 5.59 (a y b)** en donde se exponen dos fotografías con detalles del amasado del mortero.





(a)-Amasadora eléctrica

(b)-mortero en el amasado

Figura 5.59.- Amasadora eléctrica utilizada para la fabricación del mortero

Inmediatamente después de haber amasado el mortero, se introducía a la cámara para determinar la consistencia. Dicha consistencia fue medida en la mesa de sacudidas y de acuerdo a la norma [ASTM C1437-01](#). El valor de la consistencia se expresa como la media de dos diámetros perpendiculares entre sí después de haber sacudido el mortero 15 veces. En la [figura 5.60](#) se muestra la diferencia de consistencia entre un mortero amasado utilizando la primera secuencia de adición y el otro utilizando la segunda secuencia de adición de materiales, en ambos morteros el estado de humedad era seco. Por otro lado, cabe mencionar que en general la apariencia y textura de los morteros era rugosa y poco manejable, lo que tal vez se deba a que la arena 0-5 mm carece de partículas más finas, este hecho tiene consecuencias también sobre la apariencia del acabado una vez desmoldadas las probetas.



(a)-Método 1

(b)-Método 2

Figura 5.60.- Diferencia de consistencia entre los dos métodos de adición de materiales

Por otro lado, también se muestra más abajo la **figura 5.61** en donde se aprecia un detalle del instrumento utilizado y la precisión con que fueron medidos los diámetros en la mesa de sacudidas.



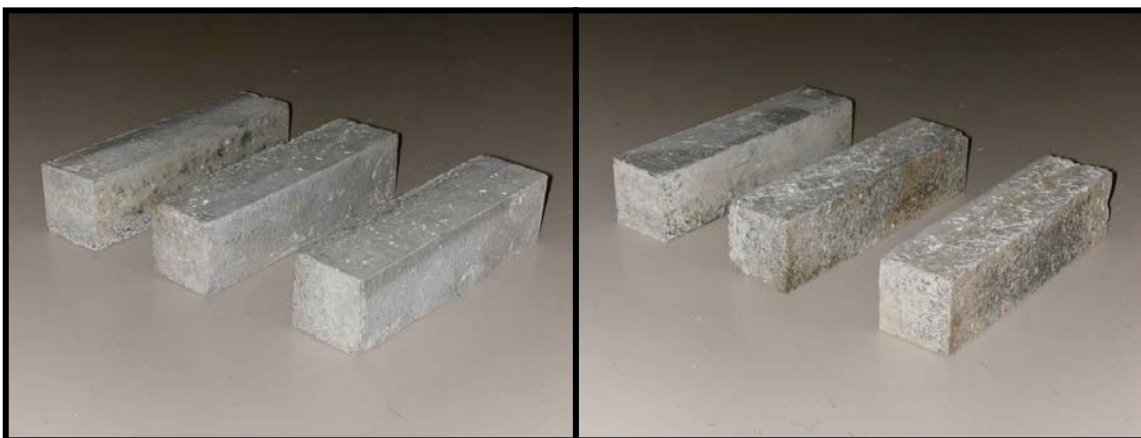
*Figura 5.61.- Detalle de medición de los diámetros*

Asimismo, después de haber determinado la consistencia del mortero, se procedió a fabricar las probetas prismáticas para la determinación de las propiedades mecánicas del mortero. El procedimiento consistió en llenar los moldes para las probetas con dos tongadas de mortero compactadas cada una mediante 60 sacudidas en la mesa. Se enrasaron con una regla metálica y se cubrieron con un cristal para evitar la posible evaporación de humedad. Para ilustrar el llenado del molde de probetas se muestra a continuación la **figura 5.62**.



Figura 5.62.- Llenado de las probetas prismáticas de mortero

Estas probetas fueron desmoldadas 24 horas después de ser fabricadas y se dejaron este tiempo (desde la fabricación hasta el desmoldeo) en la cámara a la misma temperatura y humedad relativa correspondiente a cada condición climática estudiada. Posteriormente, y habiendo pasado dichas 24 horas se curaron en la cámara húmeda hasta la fecha de su ensayo (28 días), a una temperatura de 20 °C y humedad relativa de al menos 95%. A continuación se muestran algunas fotografías ([figuras 5.63](#)) de las probetas prismáticas en donde se pretende ilustrar la textura y apariencia superficial de ellas con el objeto de señalar la influencia del contenido de humedad de la arena en este aspecto; estas fotos corresponden a la condición climática de referencia.



(a)-w seca

(b)-w intermedia



*(c)-w saturada*

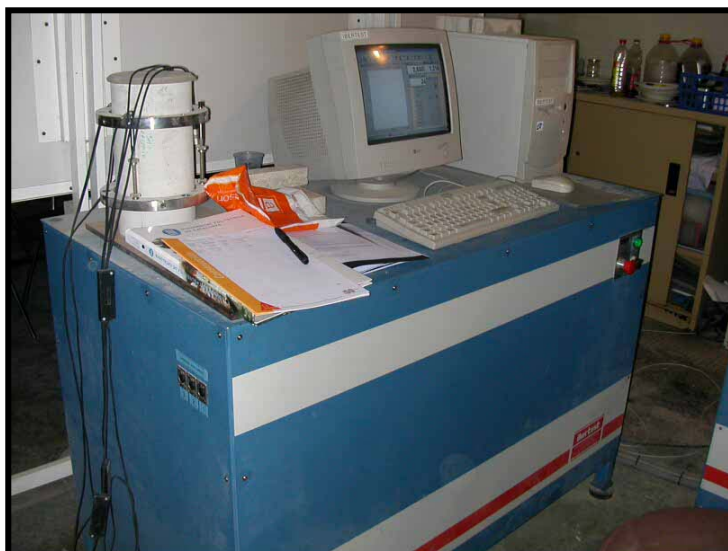
*Figura 5.63.- Probetas prismáticas de mortero (condición de referencia)*

Podemos ver en las fotografías anteriores, que las probetas que presentan una apariencia superficial peor son las que corresponden al contenido de humedad intermedio de la arena, seguidas por el contenido de humedad cero (seca) y las mejores las que corresponden a un contenido de humedad saturado. Posteriormente se analizarán estos resultados y se correlacionarán con los resultados de consistencia.

#### Resistencia a flexión de probetas prismáticas de mortero 28 días (arena 0-5 mm)

Una vez que las probetas pasaran 28 días en la cámara de curado, se procedió a ensayarlas a flexión, para lo cual se procedió conforme a la norma [EN 196-1](#) “Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas”. Dicho ensayo fue realizado en el equipo Ibertest del LTE de la UPC. A continuación se muestran algunas fotografías de los ensayos a flexión de las probetas de mortero ([figuras 5.64](#)).

Los ensayos a flexión realizados no son objeto de estudio en esta tesis, sin embargo su determinación es parte del procedimiento descrito en la norma aplicable: [ASTM C349](#). En la cual la resistencia a compresión se hace sobre las porciones de probeta prismática resultante del ensayo a flexión.



(a)-detalle de máquina de ensayo (Ibertest)



(b)-probeta antes del ensayo

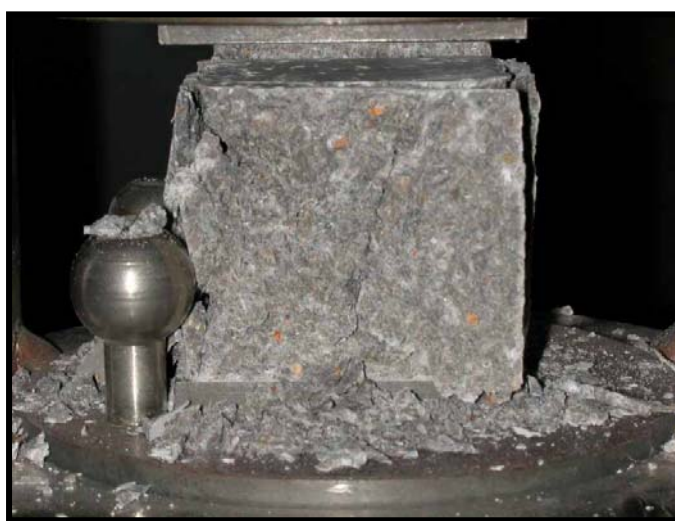


(b)-probeta después del ensayo

Figura 5.64.- Ensayo a flexión de probetas prismáticas de mortero

Resistencia a compresión de mortero a 28 días (arena 0-5 mm)

Una vez realizado el ensayo a flexión de las probetas de mortero, cada mitad se ensaya a compresión en el mismo equipo pero en la sección de compresión. Para la determinación de la resistencia a compresión del mortero se procedió conforme a la norma EN 196-1 “Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas”. A continuación se muestra una fotografía (**figura 5.65**) que ilustra en detalle una probeta de mortero ensayada a compresión en la cual se observan las líneas de falla principales.



*Figura 5.65.- Ensayo a compresión del mortero*

### **5.6.8 Resultados obtenidos**

A continuación se muestran los resultados obtenidos para todos y cada uno de los ensayos realizados y para todos los áridos estudiados. La forma de mostrarlos será gráficamente y agrupando las tres diferentes condiciones climáticas en cada gráfica.

En cada gráfica se indica en el eje correspondiente al contenido de humedad, el valor de la absorción como medida de referencia. Cabe mencionar que este valor de la absorción es el obtenido a 20 °C, ya que es preciso recordar que en el **apartado 5.3** de este capítulo se determinó la variación de la absorción en función de la temperatura ambiental y dicha absorción variaba en función de esta temperatura.

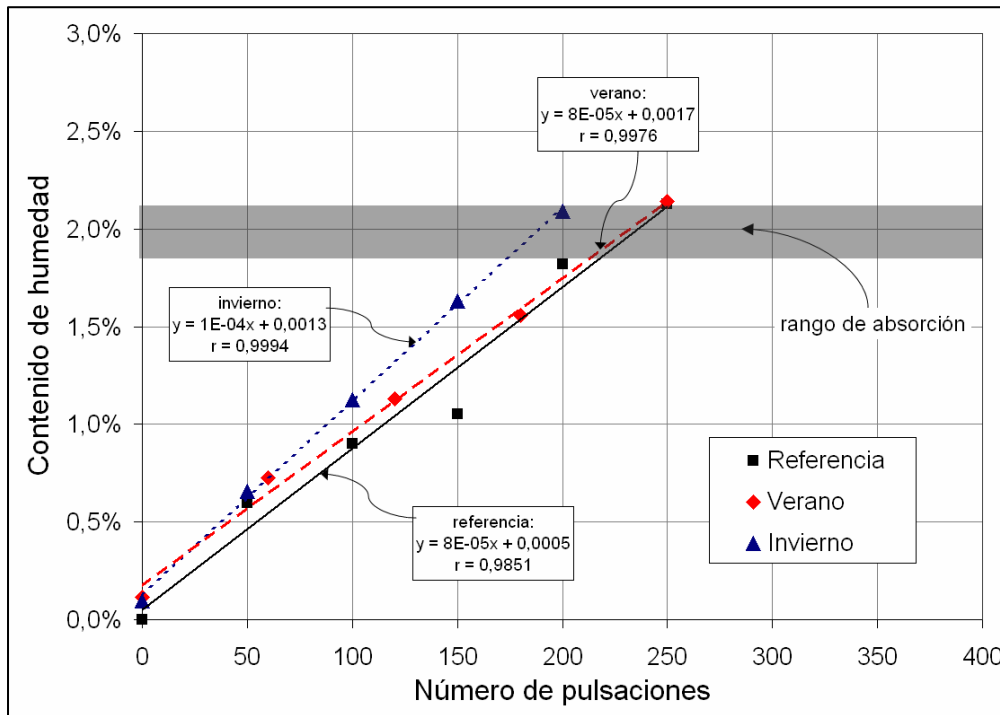
En la **tabla 5.14** se presentan estos valores de la absorción.

Absorción	Temperatura ambiente (° C)		
Arena	6	20	38
0-5 mm	1,84%	1,95%	2,12%
0-2 mm	2,11%	2,28%	2,45%

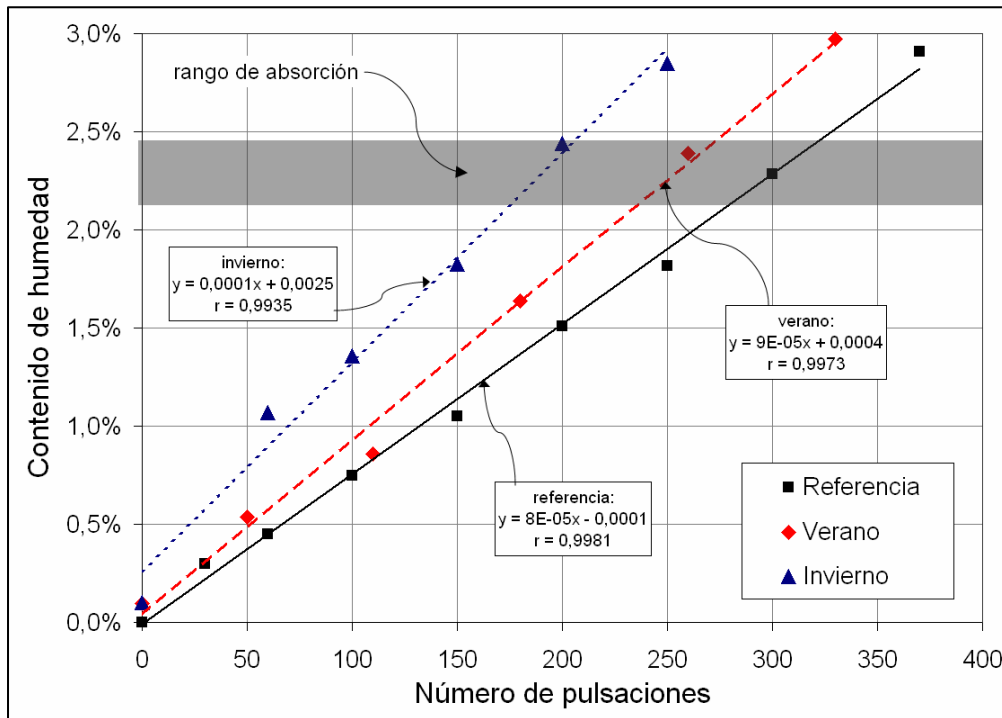
Tabla 5.14.- Absorción de los áridos

Evolución del contenido de humedad de los áridos

Se muestra a continuación en la **figura 5.66** la ganancia de humedad de la arena en función de la adición de agua mediante la contabilización del número de pulsaciones, como se ha señalado anteriormente. Con los puntos obtenidos que representan el valor del contenido de humedad, se ha realizado una regresión lineal de cada curva, la ecuación obtenida así como el coeficiente de correlación se muestran en cada gráfica.



(a)-arena 0-5



(b)-arena 0-2

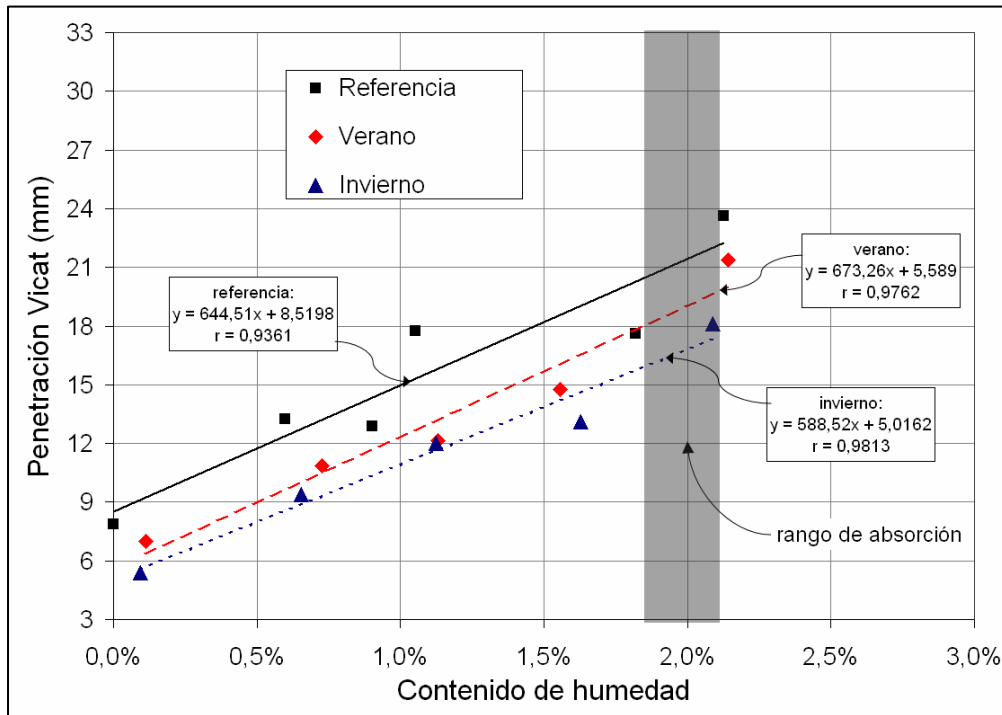
Figura 5.66.- Evolución del contenido de humedad de los áridos

Puede verse en las figuras anteriores que las tendencias de la ganancia en el contenido de humedad de la arena presentan en todos los casos un comportamiento lineal creciente, lo cual es como era de esperarse. De igual forma, los coeficientes de correlación obtenidos son muy buenos, lo que indica que el ajuste es correcto. Por otro lado, la condición climática que mayor contenido de humedad gana en función del número de pulsaciones es la correspondiente a las condiciones de invierno, seguida por las de verano y al final las de referencia. Este resultado resulta ser coherente con lo esperado para el caso de invierno, sin embargo para las otras dos condiciones no, debido a que en verano gana más humedad que en referencia. Este comportamiento parece no tener un significado físico real, sino que obedece simplemente al grado de imprecisión del método empleado, es decir, tal vez en la serie de verano, la abertura de la válvula de salida de agua era mayor. Asimismo, si consideramos que el comportamiento del agua no es constante en función de su temperatura, nos puede dar algunas pistas sobre la capacidad de absorción del árido en relación a la variación de las propiedades físicas del agua (densidad, viscosidad y tensión superficial). Otro aspecto que hay que mencionar y que es lógico pensar, es que cuando menor sea la clasificación granulométrica del árido, mayor agua se necesitará (pulsaciones) debido a la mayor superficie específica por cubrir de cada tipo de árido.

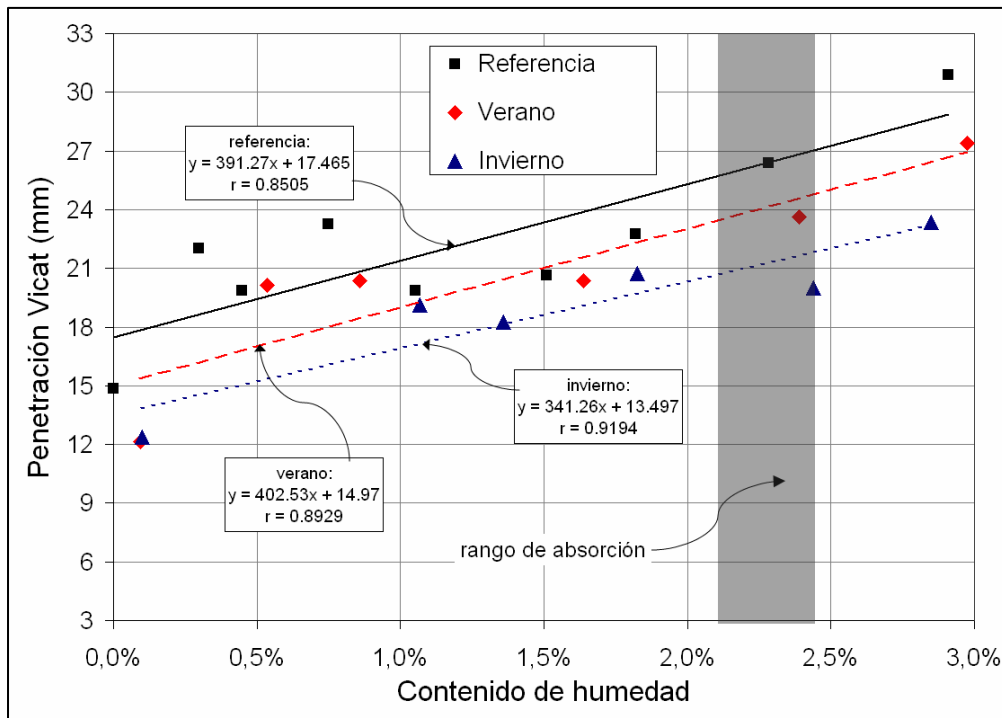


Penetración de la sonda de Vicat ( $\phi = 10 \text{ mm}$ ,  $m = 300 \text{ g}$ )

A continuación se muestran en la **figura 5.67** los resultados obtenidos del ensayo de penetración de la sonda de Vicat en las arenas. De igual forma, en este caso también se ha hecho un ajuste de regresión lineal incluyendo las ecuaciones y los factores de correlación.



(a)-arena 0-5



(b)-arena 0-2

Figura 5.67.- Penetración de la sonda de Vicat

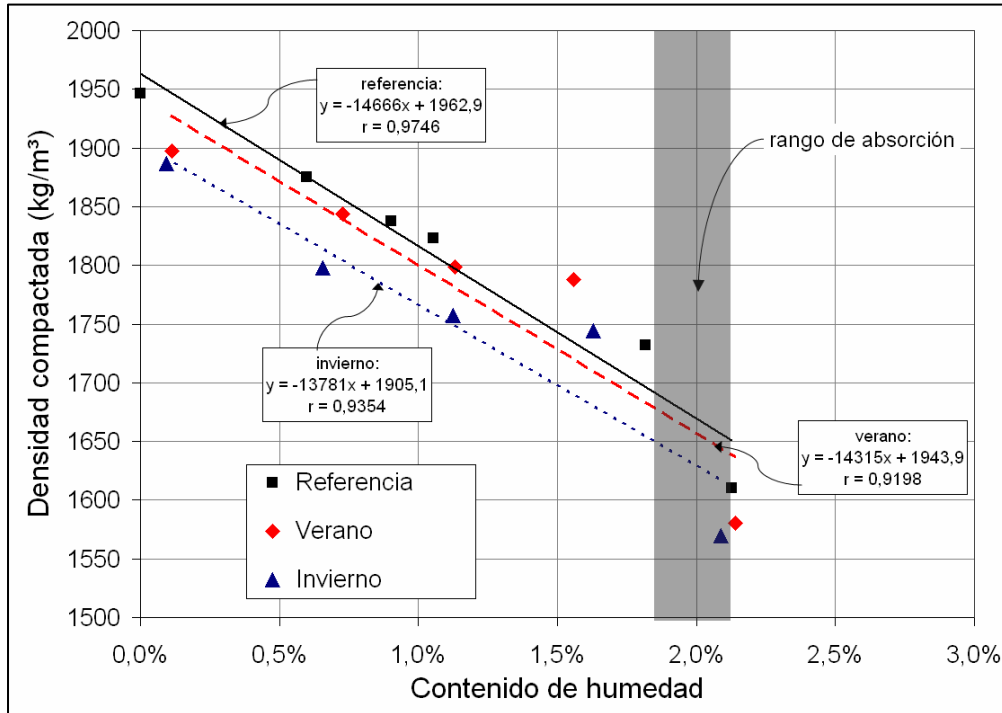
Observando los resultados anteriores, podemos decir que la tendencia de penetración de la sonda en función del contenido de humedad es creciente y más o menos lineal, si bien presenta algunos segmentos con diferencias de pendiente. En cuanto a la influencia de la temperatura en este aspecto, podemos ver que las arenas ensayadas bajo condiciones de referencia permiten una penetración mayor, seguidas por las de verano y, por último, por las de invierno. Este hecho concuerda en general con los resultados obtenidos anteriormente en el sentido de que en general se obtienen valores mayores de compactación y trabajabilidad a 20 °C.

En cuanto a la influencia de la granulometría, podemos ver que, como es lógico, la arena 0-2 mm permite una mayor penetración debido a que como existe un mayor número de partículas de menor tamaño, la reacomodación de ellas por efecto de la ocupación de espacio por la sonda, es mayor y más fácil.

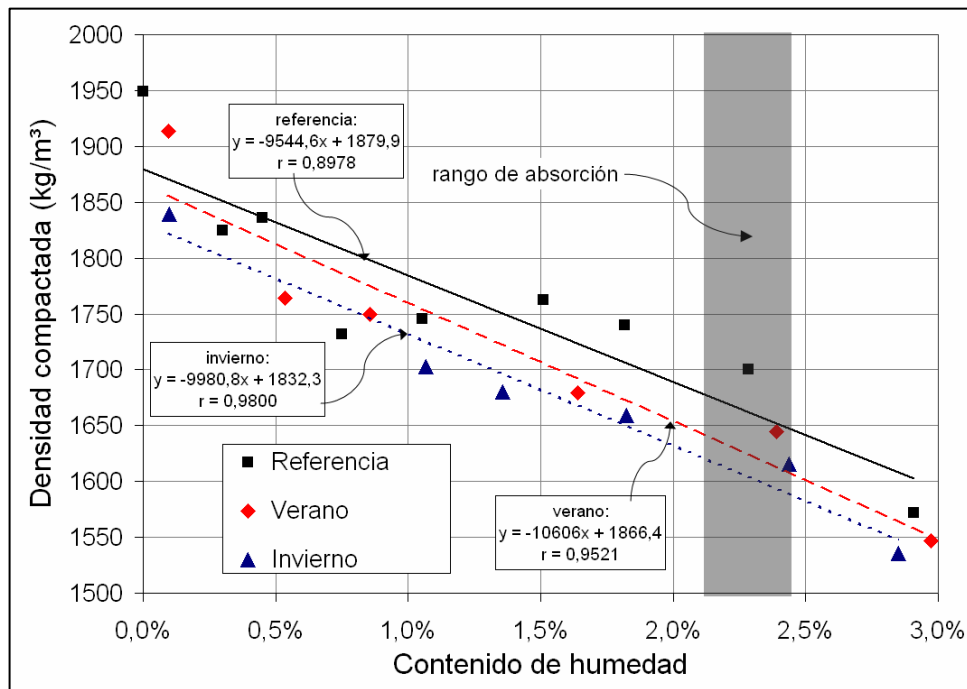
Si recordamos ensayos anteriores podemos ver que el nivel de compactación era mayor para esta misma clasificación, este hecho concuerda con lo observado en este ensayo.

Densidad compactada (mecánicamente)

A continuación se muestran en la **figura 5.68** los resultados obtenidos de la densidad compactada mecánicamente en las arenas. De igual forma, en este caso también se ha hecho un ajuste de regresión lineal incluyendo las ecuaciones y los factores de correlación.



(a)-arena 0-5



(b)-arena 0-2

Figura 5.68.- Densidad compactada de las arenas

Las tendencias seguidas por las arenas en cuanto a la densidad compactada mecánicamente en función del contenido de humedad son en ambos casos decrecientes y en relación a la influencia de la temperatura, tienen el mismo comportamiento en general observado en ensayos anteriores.

Por otro lado, el hecho de que la densidad disminuya con el incremento del contenido de humedad puede ser debido a que cuando el agua se adiciona a la arena se produce un efecto local de densificación o agrupación de las partículas granulares, lo cual resulta en una mayor porosidad y por lo tanto en una densidad menor.

#### Determinación de los ángulos de reposo y estabilidad

A continuación se muestran en la **tabla 5.15** los valores obtenidos para los ángulos de reposo y estabilidad para todas las condiciones climáticas estudiadas. Los valores de los ángulos de rozamiento interno obtenidos de acuerdo a la norma **ASTM D3080-98**, son los siguientes: 42,2° para la arena 0-5 mm y 46,0° para la arena 0-2 mm.

Condición climática	Invierno (6 °C)		Referencia (20°C)		Verano (38°C)	
	Reposo	Estabilidad	Reposo	Estabilidad	Reposo	Estabilidad
Árido/Ángulo						
Arena 0-5 mm	32,7°	29,3°	32,4°	28,0°	31,0°	27,7°
Arena 0-2 mm	36,6°	32,8°	36,4°	30,5°	34,8°	30,3°

Tabla 5.15.- Valores de los ángulos de reposo y estabilidad

Los valores de los ángulos de reposo y estabilidad son decrecientes en ambas arenas en función de la temperatura, siendo los valores de la arena 0-2 siempre mayores. Los comportamientos aquí observados son muy suaves, sin embargo, desde un punto de vista de tendencias, estos resultados confirman lo que se mencionó anteriormente, en el sentido de que los ángulos de fricción interna son en cierto modo, dependientes de la temperatura.

En relación a los valores de ángulo de rozamiento interno obtenidos del ensayo de corte directo, se puede ver que éstos son mucho más grandes que los ángulos de reposo. Este hecho está relacionado con el efecto de la dilatancia y el grado de empaquetamiento de los áridos, ya que el esfuerzo cortante de la arena seca depende de varios factores, tales como la composición mineralógica de los áridos, tamaño, forma, textura superficial y graduación. [Head, 1982], [Wood, 1990]

La dilatancia también depende de la angularidad del material, el confinamiento (esfuerzo normal en corte directo) y la densidad; la dilatancia aumenta si el material presenta mayor angularidad y mayor densidad, y disminuye si se incrementa el esfuerzo normal. [Assaad et al., 2004]

#### Consistencia del mortero en estado fresco (mesa de sacudidas) - (arena 0-5 mm).

A continuación se muestra la **figura 5.69**, en la cual se han graficado los valores obtenidos de consistencia del mortero fabricado con la arena 0-5 mm para todas las condiciones climáticas estudiadas. En esta gráfica se han trazado mediante líneas los puntos correspondientes al diámetro medio del mortero obtenido en la mesa de sacudidas para cada contenido de humedad y para las diferentes condiciones climáticas, estos corresponden a los morteros amasados por el método tradicional ó ‘Método 1’. Los resultados obtenidos para el ‘Método 2’ se muestran como puntos y son indicados por flechas.

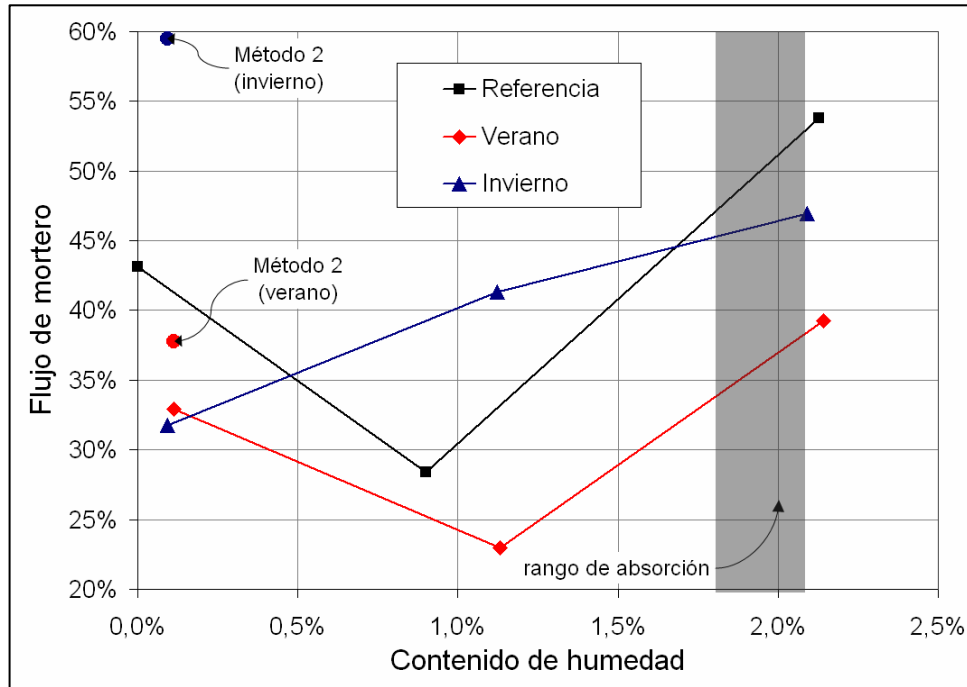


Figura 5.69.- Consistencia del mortero

Antes que nada, puede verse que el comportamiento del mortero en condiciones de referencia y verano es similar, ya que las mejores consistencias fueron obtenidas bajo condiciones de humedad equivalentes a la absorción, pasando a través del estado seco y los peores resultados, fueron obtenidos con contenidos de humedad intermedios; esta tendencia no es seguida por el mortero de invierno.

El hecho de tener las mejores trabajabilidades cuando el contenido de humedad es mayor que la capacidad de absorción de los áridos puede tener la siguiente explicación. A pesar de que en estado seco, la cantidad de agua de amasado es mayor, una porción de esta agua es absorbida rápidamente por los áridos, mientras que en estados cercanos al de saturación y superficie seca, el agua libre no es absorbida y actúa como “lubricante”, teniendo finalmente una mejor consistencia, este efecto también fue observado por [Buenfeld y Okundi, 1999].

Por lo tanto, las peores trabajabilidades en condiciones de verano y referencia son obtenidas en niveles de humedad intermedios debido al hecho de que una porción del agua de amasado es absorbida por los áridos y la otra parte no es suficiente como para dar una trabajabilidad adecuada. Por otro lado, puede verse también que los menores niveles de trabajabilidad corresponden a las condiciones de verano, y los mayores a las de referencia; las condiciones de invierno presentan un comportamiento intermedio.

Es bien sabido que la cantidad de agua requerida para producir una cierta consistencia es siempre mayor con el aumento en la temperatura de los áridos. A altas temperaturas, generalmente la evaporación de cierta cantidad del agua de amasado se observa durante las fases de colocación del hormigón. [Mouret et al., 1997] Además, analizando los resultados obtenidos de consistencia aplicando el ‘Método 2’ de amasado, puede verse una mejora muy efectiva en los niveles de trabajabilidad, teniendo un incremento del 4% y 21% en condiciones de verano e invierno, respectivamente.

La explicación de esta mejoría puede residir en el hecho de que cuando se vierte una porción del agua de amasado a la arena en el proceso de fabricación, las partículas de cemento tienden a dispersarse uniformemente y evitar así, floculaciones masivas de cemento con arena húmeda, además, esto proporciona más agua libre al mortero y se reduce la fricción entre partículas, incrementando así el efecto de lubricación.

Para el caso de las condiciones de invierno, las mejoras obtenidas aplicando este segundo método de amasado, evidentemente se deben al efecto de absorción, debido a que bajo esta situación, la absorción es menor y más lenta, por lo que los áridos absorben menos agua libre en comparación a cuando se trabaja bajo condiciones de verano. No obstante, en este trabajo experimental, los niveles de contenido de humedad eran menores al 2,5%, es decir, niveles muy bajos. Sería interesante aplicar este mismo método modificado de amasado para niveles mayores de contenido de humedad, igualmente, estimar la pérdida de trabajabilidad en función del tiempo para cada condición climática.

Otro hecho que hay que mencionar es que las correcciones se hicieron en función del peso de la arena y del agua, manteniendo la relación agua/cemento (en peso) y la relación cemento/peso total, constantes. Sin embargo, en términos de volumen, el volumen de cemento en relación al volumen total del mortero no siempre fue el mismo, lo cual implica que las resistencias pudiesen estar afectadas por este factor, favoreciendo en un momento dado, a las resistencias en estados de humedad de la arena cercanos al de la absorción. Sin embargo, estas variaciones no son muy importantes, ya que las variaciones respecto a la relación en el volumen del cemento respecto al volumen total, del caso más desfavorable al más positivo, son menores al 4% aproximadamente.

#### Resistencia a flexión de probetas prismáticas de mortero 28 días (arena 0-5 mm)

A continuación se muestra la **figura 5.70**, en la cual se han graficado los valores obtenidos de la resistencia a flexión del mortero fabricado con la arena 0-5 mm para todas las condiciones climáticas estudiadas.

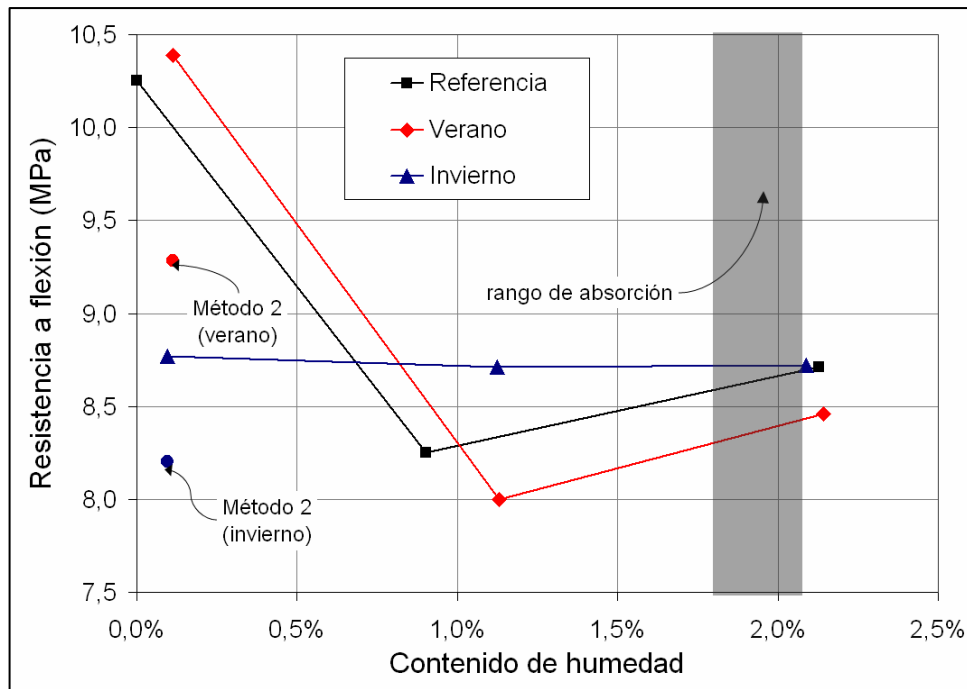


Figura 5.70.- Resistencia a flexión del mortero

Puede verse en la gráfica anterior que el comportamiento de los morteros de referencia y verano sigue una tendencia análoga en el sentido de que las mejores resistencias se obtienen con la arena seca, después con la arena húmeda y por último con la arena con humedad intermedia. El mortero correspondiente a las condiciones de invierno presenta una tendencia decreciente y más o menos lineal respecto al aumento en el contenido de humedad de la arena, de hecho, estas variaciones pueden considerarse insignificantes prácticamente.

Respecto a los resultados del ‘Método 2’ de adición de materiales, hay una caída de resistencia respecto al ‘Método 1’, del 11,90% y del 6,86% para las condiciones de verano y de invierno, respectivamente.

Por otro lado, la temperatura parece no ser un factor decisivo en la resistencia a flexión del mortero, lo cual es opuesto al comportamiento de este material bajo compresión. Esto es debido a los diferentes mecanismos de fractura y deformación de los materiales cementantes bajo estos dos tipos de esfuerzos.



### Resistencia a compresión de mortero a 28 días (arena 0-5 mm)

A continuación se muestra la **figura 5.71**, en la cual se han graficado los valores obtenidos de la resistencia a compresión del mortero fabricado con la arena 0-5 mm para todas las condiciones climáticas estudiadas.

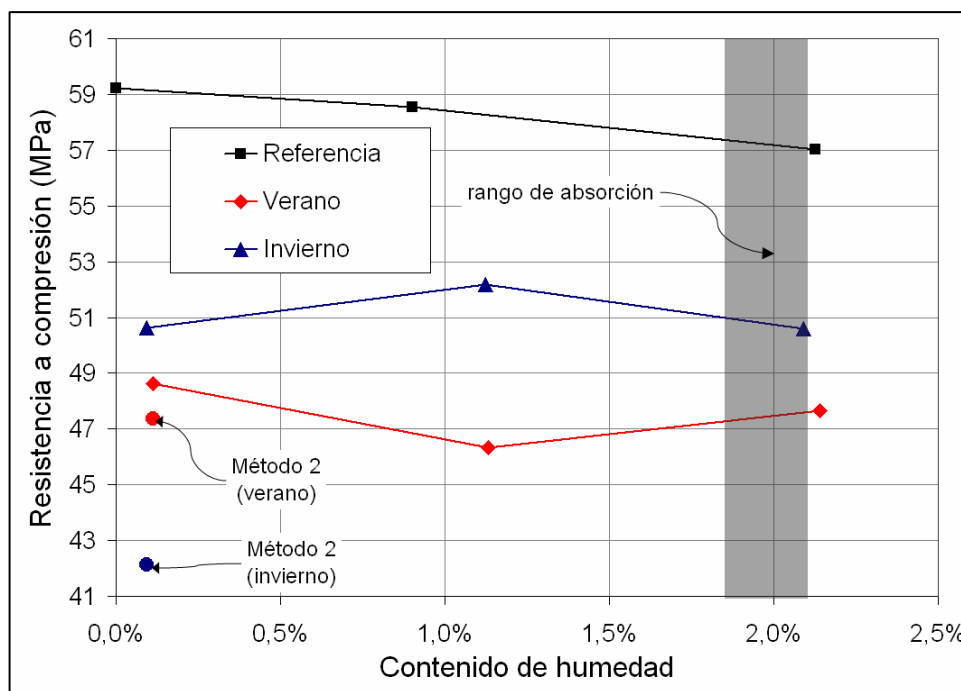


Figura 5.71.- Resistencia a compresión del mortero

Podemos ver en esta gráfica que las variaciones de resistencia, en relación a los contenidos de humedad para cada condición climática, son insignificantes. No obstante, y contrario a lo esperado, las resistencias en invierno son menores a las de referencia. Con respecto a los resultados del ‘Método 2’ de amasado, hay una disminución de resistencia respecto al método tradicional; esta caída es más radical para las condiciones de invierno.

Por otro lado, debido a que para cada condición climática los tres morteros tienen la misma relación agua/cemento, la variación en cuanto resistencia es despreciable, de esta forma, ciertas variables como la trabajabilidad o la porosidad pueden ser descartadas. En este sentido, los coeficientes de variación son los siguientes: referencia = 1,9%, verano = 2,4% e invierno = 1,8%.

Es bien sabido que la resistencia del hormigón depende de la resistencia de la matriz de cemento hidratada, los áridos y las interfaces entre esta matriz y los áridos. Los resultados menores de resistencia a compresión obtenidos por el ‘Método 2’ pueden

ser atribuidos al sangrado del mortero, el cual se observó durante el proceso de compactación. Durante el vibrado, el agua interior de las partículas de árido pudo haber sido movido hacia la matriz de cemento, creando una relación local agua/cemento relativamente mayor en las cercanías de las partículas. Este proceso pudo haber debilitado el vínculo o enlace entre los áridos y la matriz.

Por el contrario, cuando el ‘Método 1’ es llevado a cabo, el agua pudo haber ido de la matriz de cemento hacia los áridos, acumulándose así algunas partículas de cemento alrededor de éstos; teniendo como resultado un vínculo o interfaz más fuerte entre la matriz de cemento y los áridos. [Poon et al., 2004]

En relación a la influencia de la temperatura sobre la resistencia a compresión, en este caso son aplicables los mismos puntos expuestos en el **apartado 4.7** de “Discusión”, del **Capítulo 4**.

#### **5.6.9 Discusión**

Los comportamientos observados reflejan la influencia de la humedad y la temperatura en el ángulo de rozamiento interno de los áridos. Así, el ángulo de rozamiento interno aumenta con la humedad hasta un máximo, superado el cual, dicho ángulo disminuye al existir un efecto de lubricación entre los áridos. Si existe exceso de agua se produce una segregación del árido, manteniendo prácticamente constante el ángulo de rozamiento interno. Estos efectos son fáciles de observar en la construcción de castillos de arena en la playa. Las consecuencias sobre el flujo en el mortero son de signo contrario, por lo que explica que a mayor ángulo de rozamiento interno la extensión del flujo sea menor.

Por otro lado, tal como se ha visto, el ángulo de rozamiento disminuye a medida que aumenta la temperatura, y consecuentemente, al contrario el flujo aumenta con la temperatura. Ello explica que para las condiciones de invierno, con el árido seco, el porcentaje de flujo obtenido sea menor.

Estos mismos comportamientos se observan en el ‘Método 2’, en el que, por un lado, el flujo en invierno es menor y, por otro lado, el aportar agua de forma previa a los áridos por encima del punto de saturación disminuye el ángulo de rozamiento interno y, consecuentemente, aumenta el flujo.

### 5.6.10 Conclusiones

De los resultados obtenidos correspondientes al estudio de la influencia de la humedad superficial y la temperatura de los áridos, se presentan las siguientes conclusiones:

- Los valores de los ángulos de reposo, estabilidad y rozamiento interno son menores a mayor temperatura. En este caso los valores de estos ángulos serán mayores para arenas con mayor módulo de finura.
- En el caso del mortero, la peor consistencia se obtuvo para las condiciones de verano y, en relación al contenido de humedad, los mejores resultados se obtuvieron generalmente con contenidos de humedad cercanos al grado de saturación y superficie seca.
- En relación al método de amasado, el 'Método 2' (en el cual se añade parte del agua junto con la arena en el inicio del mezclado y el resto del agua casi al final del proceso, después de haber añadido el cemento) resultó en mejores consistencias. No obstante, este efecto fue contraproducente desde el punto de vista de resistencia mecánica.
- Dentro de cada condición climática, no se dieron diferencias significativas en relación a los valores de resistencia a compresión entre los tres niveles de contenido de humedad, debido a la misma relación agua/cemento.
- Los ensayos experimentales muestran que la trabajabilidad depende de la temperatura de los áridos, debido a cambios en la absorción y en la fricción interna de éstos.
- En cuanto a posibles aplicaciones industriales en la producción de hormigón, es posible optimizar el consumo de cemento en éste por medio de algunas de las propiedades de los áridos que dependan de la temperatura ambiental.

## **5.7 DISCUSIÓN GENERAL**

A la luz de los resultados contemplados en el presente capítulo, y de los obtenidos en toda la investigación, se entiende que el árido es, probablemente, el factor principal, no sólo por las características específicas de su comportamiento con la temperatura, sino también, porque es el componente más numeroso en el hormigón. Esto es, su importancia responde tanto a parámetros cualitativos como cuantitativos. Por ello se proponen las siguientes recomendaciones de actuación dentro del presente proyecto, desde una perspectiva industrial:

- En verano los áridos deberían pasar por un proceso de humidificación antes de entrar en la amasadora (por ejemplo en la cinta transportadora). Con ello se pretende reducir la demanda de agua de los áridos, así como enfriarlos a nivel superficial.
- En invierno deberían preverse medidas de protección térmica de los áridos. Estas medidas podrían pensarse tanto en las zonas superficiales superiores de los almacenamientos, como en las zonas inferiores.
- Sería conveniente desarrollar a nivel de planta industrial algunas de las propuestas que salgan de estas recomendaciones.
- No hay que descartar el profundizar en el conocimiento de las propiedades reológicas de los áridos bajo diferentes contenidos de agua y temperaturas, así como una búsqueda bibliográfica orientada de forma temática en estos temas.
- Desarrollar una metodología para conocer la temperatura de la masa fresca del hormigón en el momento del amasado en función de la temperatura individual de cada uno de los constituyentes así como de las propiedades térmicas como la conductividad, difusividad, calor específico, etc.
- Determinar una temperatura crítica sobre la cual decidir si se lleva a cabo una sobredosificación de cemento en el hormigón para reducir los efectos perjudiciales de las altas temperaturas. Dicha temperatura crítica tendrá que ser determinada de acuerdo a la metodología planteada en el párrafo anterior, la composición del propio hormigón y el conocimiento de las prestaciones obtenidas en trabajos anteriores.
- La temperatura de los áridos, los cuales constituyen casi el 75% del volumen del hormigón, puede ser determinada en función de la temperatura ambiental y de los desfases térmicos (conductividad) y horarios que se describen en este trabajo. Las actuaciones principales de tipo industrial apuntan en la dirección de los áridos, por lo que sería conveniente desarrollar a nivel de planta industrial algunas de las propuestas que salgan de estas recomendaciones.

## 5.8 CONCLUSIONES GENERALES

Después de la realización de estas campañas experimentales sobre la influencia de las condiciones ambientales sobre el comportamiento y algunas propiedades de los áridos, las siguientes conclusiones generales pueden ser hechas:

- El orden de magnitud de la absorción para las arenas es significativamente mayor que para las gravas, lo que es un fenómeno conocido y normal debido a la mayor superficie específica que tienen las arenas con respecto a las gravas.
- El coeficiente de absorción de los áridos aumenta con el incremento de la temperatura ambiental y de los áridos; esta tendencia es más marcada con los áridos finos (arenas).
- Dentro del rango de tiempos de saturación estudiados (30 minutos y 24 horas), las diferencias son poco significativas, lo que representa que el mayor porcentaje de absorción se produce durante los primeros minutos, esto es, durante el amasado del hormigón, lo que significa pérdidas de trabajabilidad inicial.
- El porcentaje de compactación aumenta con la temperatura; esto es a mayor temperatura el porcentaje es mayor.
- Los desfases térmicos y horarios obtenidos en base a los perfiles térmicos característicos, medidos por el ensayo de inercia térmica, son exactamente iguales para la arena y para la grava.
- Es necesario comprobar si el planteamiento propuesto en base a la medición de los desfases térmicos y horarios es funcional para niveles diferentes de temperatura y para condiciones de almacenamiento real de los áridos en silos metálicos o en acopios donde no se tengan silos de almacenamiento mediante la contrastación del modelo propuesto con datos reales.
- Los valores de los ángulos de reposo, estabilidad y rozamiento interno son menores a mayor temperatura. En este caso los valores de estos ángulos serán mayores para arenas con mayor módulo de finura.
- En el caso del mortero, la peor consistencia se obtuvo para las condiciones de verano y, en relación al contenido de humedad, los mejores resultados se obtuvieron generalmente con contenidos de humedad cercanos al grado de saturación y superficie seca.

- En relación al método de amasado, el ‘Método 2’ (en el cual se añade parte del agua junto con la arena en el inicio del mezclado y el resto del agua casi al final del proceso, después de haber añadido el cemento) resultó en mejores consistencias. No obstante, este efecto fue contraproducente desde el punto de vista de resistencia mecánica.
- Los ensayos experimentales muestran que la trabajabilidad del mortero depende de la temperatura de los áridos, debido a cambios en la absorción y en la fricción interna de éstos.
- En cuanto a posibles aplicaciones industriales en la producción de hormigón preparado, es posible su optimización mediante el tratamiento de algunas de las propiedades de los áridos que dependan de la temperatura ambiental.