

Anejo

B

**Estudio sobre pastas con
aditivo polifuncional**

B.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

El presente anejo forma parte de los trabajos realizados dentro de un convenio de colaboración [UPC-CMI-PROMSA, 2002], y fueron realizados por Joana Roncero, por lo tanto, a efectos de esta tesis se mostraran los resultados obtenidos haciendo referencia siempre al texto del cual han sido tomados, otorgándole siempre el debido crédito a la autora. De igual forma, en este trabajo se presenta el programa de trabajo y el análisis de los resultados hechos por ella.

En las campañas experimentales contenidas en esta tesis, se muestra la notable influencia que tiene la temperatura sobre la trabajabilidad del hormigón fresco, así como sobre sus propiedades mecánicas y su evolución. Además, los resultados obtenidos muestran la necesidad de estudiar en profundidad la influencia de la temperatura sobre los componentes del hormigón, es decir sobre la pasta, los áridos y el mortero como el mejor camino para comprender los numerosos fenómenos que tienen lugar en el hormigón.

En esta línea se planteó estudiar la influencia de las condiciones de verano e invierno en la microestructura de la pasta de cemento, así como en las propiedades mecánicas y consistencia de morteros. El análisis de los resultados obtenidos en cada uno de los componentes del hormigón permitirá analizar de forma más racional el comportamiento del hormigón.

La razón de incluir este estudio en la tesis como un anejo, radica en la importancia que tiene la comprensión del efecto de la temperatura sobre el comportamiento de las pastas de cemento con aditivo polifuncional. Por lo tanto, los resultados y conclusiones obtenidas del mismo son de gran ayuda para entender el comportamiento del hormigón preparado en verano.

Este anejo tiene como objetivo estudiar la influencia de la temperatura en las propiedades de la pasta de cemento fresca considerando la dosis de aditivo polifuncional. En concreto, las propiedades objeto de estudio son la fluidez, punto de saturación y pérdida de fluidez con el tiempo de pastas de cemento, así como su influencia sobre la demanda de agua del cemento y los tiempos de inicio y fin de fraguado incluyendo la evolución de la penetración de la aguja de Vicat durante el proceso de fraguado. La composición de las pastas de cemento fabricadas corresponde a la que tendrá en el hormigón suponiendo que los áridos se encuentran en la condición de saturados con superficie seca.

B.2 PLAN DE TRABAJO

B.2.1 Introducción y objetivo

El presente apartado tiene por objeto definir la metodología y el plan de trabajo aplicado con el objetivo de estudiar el comportamiento de pastas de cemento con y sin aditivo polifuncional que han sido fabricadas y ensayadas a tres diferentes temperaturas (6, 20 y 38 °C). Los resultados de estos ensayos se muestran y analizan posteriormente en otro apartado de este mismo anejo.

El principal objetivo de esta serie de ensayos consiste en evaluar la influencia de la temperatura sobre la fluidez, punto de saturación y pérdida de fluidez con el tiempo de la pasta de cemento, así como su influencia sobre la demanda de agua del cemento y los tiempos de inicio y fin de fraguado incluyendo la evolución de la penetración de la aguja de Vicat durante el proceso de fraguado. La composición de las pastas corresponde a la que tendrá en el hormigón suponiendo que los áridos se encuentran en la condición de saturados con superficie seca.

B.2.2 Variables estudiadas

Con el objetivo de comprender mejor el comportamiento de la pasta de cemento fresca y reducir el número de variables, el presente estudio se ha llevado a cabo a tres temperaturas diferentes que se mantienen constantes a lo largo de todos los ensayos. Estas temperaturas pretenden abarcar un amplio rango considerando dos temperaturas extremas, 6 y 38 °C y representativas de las condiciones de invierno y verano, respectivamente, y una temperatura media o de referencia, 20°C.

Los ensayos se realizaron en pastas de cemento con diferentes dosis de aditivo polifuncional (ap/c) a las tres temperaturas indicadas. La **tabla B.1** muestra los ensayos realizados y las variables analizadas.

B.2.3 Dosificación de las pastas de cemento

Los datos correspondientes a los materiales utilizados y su caracterización (cemento y aditivo polifuncional) pueden consultarse en el **apartado 3.2** del **Capítulo 3** de esta tesis.

La dosificación de las pastas de cemento, excepto las pastas fabricadas para evaluar la demanda de agua, se ha determinado en función de la dosificación del hormigón planteada en los anteriores informes. En este sentido, la relación agua/cemento (a/c) de las pastas de cemento es igual a 0,56 como en el hormigón.

La dosis de aditivo con respecto al peso de cemento (ap/c) empleada en el hormigón corresponde a 0,28%, expresada como residuo seco del aditivo (considerando el producto tal y como es suministrado esta dosis corresponde a 0,70%). En las pastas

de cemento, el agua contenida en el aditivo polifuncional es considerada como parte de la relación a/c y, por tanto, descontada del agua total añadida.

Aspecto estudiado	Método de ensayo	Temperatura (° C)	Dosis de aditivo polifuncional, (ap/c)*
Fluidez y punto de saturación del aditivo polifuncional	Cono de Marsh	6° 20° 38°	Variable 0% < ap/c < 0,32%
Pérdida de fluidez con el tiempo	Cono de Marsh	6° 20° 38°	0% punto de saturación 0,28%
Demanda de agua del cemento	Aparato de Vicat (con sonda para la determinación de la consistencia normal, EN196-3)	6° 20° 38°	0% punto de saturación 0,28%
Tiempo de inicio de fraguado	Aparato de Vicat (con aguja para determinar el principio de fraguado, EN196-3)	6° 20° 38°	0% punto de saturación 0,28%
Tiempo de final de fraguado	Aparato de Vicat (con aguja para determinar el principio de fraguado, EN196-3)	6° 20° 38°	0% punto de saturación 0,28%
Evolución de la penetración de la aguja de Vicat durante el fraguado	Aparato de Vicat (con aguja para determinar el principio de fraguado, EN196-3)	6° 20° 38°	0% punto de saturación 0,28%

* *Expresada como residuo seco de aditivo respecto al peso de cemento*

Tabla B.1.- Aspectos estudiados en las pastas y variables consideradas

B.2.4 Descripción de los ensayos

Ensayo del cono de Marsh

El ensayo del cono de Marsh es un procedimiento rápido y sencillo para evaluar la fluidez de pastas de cemento y para determinar la dosis de saturación de plastificantes y superplastificantes, así como la compatibilidad entre cemento y el aditivo. También permite evaluar la pérdida de fluidez con el tiempo. Este ensayo es similar al descrito en la norma [ASTM C939-87](#) para la verificación de la fluidez de morteros.

El cono de Marsh consiste en un recipiente metálico tronco-cónico invertido con una apertura de 8 mm en su base. En el presente trabajo, se vierte en el cono de Marsh 800 ml de pasta y se determina el tiempo que tarda en fluir 200 ml. Cuanto menor es este tiempo mayor es la fluidez de la pasta. Aplicando este procedimiento en pastas con distintas dosis de aditivo polifuncional se puede determinar el punto de saturación. Este punto corresponde a un contenido óptimo a partir del cual no se obtienen mejoras

significativas de la fluidez. Una dosificación de aditivo polifuncional por encima del punto de saturación no sólo no modifica la fluidez de la pasta, sino que puede causar efectos negativos (retraso de fraguado, segregación) además de encarecer notablemente el coste del hormigón.

El efecto de la temperatura en la pérdida de fluidez con el tiempo se ha evaluado en pastas sin aditivo polifuncional y con dosis de aditivo correspondientes al punto de saturación en pasta de cemento y a la dosis empleada en hormigón ($ap/c = 0,28\%$). La evolución del tiempo de fluidez del cono de Marsh se ha determinado cada 15 minutos durante un periodo de 2 horas después del mezclado. El mezclado del material se detiene después de cada medida conservando la pasta dentro de la amasadora cubierta con plástico y se procede a mezclar la pasta a velocidad baja 1 minuto antes de cada medida.

Demanda de agua

La demanda de agua del cemento se considera como la relación a/c necesaria para obtener una pasta de cemento de una determinada consistencia, denominada consistencia normal. Para su determinación se ha seguido el procedimiento descrito en [EN 196-3](#), en el apartado “Ensayo de Consistencia Normal”. Para ello se emplea el aparato Vicat equipado con una sonda con un diámetro de 10 mm y se fabrican pastas de cemento con diferente a/c . La a/c correspondiente a una penetración de la sonda de 34 mm, es decir consistencia normal, es considerada como la demanda de agua.

La demanda de agua se ha determinado en pastas sin aditivo polifuncional y en pastas de cemento con dosis de aditivo correspondientes al punto de saturación en pasta y a la dosis empleada en hormigón ($ap/c = 0,28\%$). En este sentido, a cada temperatura, se han fabricado pastas con diferente a/c para cada dosis de aditivo químico estudiada hasta obtener una pasta con consistencia normal tal y como ha sido definida en el párrafo anterior. Para determinar la demanda de agua en presencia de aditivo se ha realizado una modificación del procedimiento descrito en la normativa incorporando el aditivo químico junto con el agua de mezclado.

Tiempo de fraguado

El principio de fraguado de las pastas de cemento se ha determinado siguiendo el procedimiento descrito en [EN 196-3](#), empleando el aparato de Vicat equipado con una aguja de diámetro 1,13 mm. Aunque en el procedimiento descrito en la normativa el principio de fraguado se determina en pastas con consistencia normal, en el presente trabajo se ha determinado en pastas con una relación a/c igual a la que tendría en hormigón, es decir $a/c = 0,56$. El principio de fraguado de las pastas se considera como el momento en el que la distancia entre la aguja y la placa base es de 4 ± 1 mm.

A diferencia de la norma [EN 196-3](#), en este trabajo, el final del fraguado se considera como el momento en que la aguja de Vicat no penetra en la pasta. Así mismo,

se determina la evolución de la penetración de la aguja de Vicat entre el principio y el final de fraguado.

Los tiempos de fraguado y la evolución de la penetración de la aguja de Vicat se ha determinado en pastas sin aditivo polifuncional y en pastas de cemento con dosis de aditivo correspondientes al punto de saturación en pasta y a la dosis empleada en hormigón ($ap/c = 0,28\%$).

B.2.5 Fabricación de las pastas de cemento

Las pastas se han preparado en una amasadora de tipo Hobart de 5 litros de capacidad empleando dos velocidades, una rápida (84 rpm) y otra lenta (60 rpm). La velocidad rápida está limitada por la pérdida de material debido a la alta fluidez de las pastas. La secuencia de mezclado empleada, excepto para la determinación de la demanda de agua, ha sido la siguiente: el cemento y el 80% del agua (correspondiente a $a/c = 0,40$) se mezclan durante 1 minuto a velocidad baja. A continuación, se añade el aditivo polifuncional junto con el resto de agua (correspondiente a $a/c = 0,10$) y se mezclan durante 30 segundos a velocidad baja y 90 segundos más a velocidad alta.

El agua contenida en el aditivo polifuncional se ha descontado de la segunda fracción de agua añadida. El mezclado de las pastas en dos pasos contribuye a obtener un mezclado uniforme, especialmente en pastas con relaciones a/c medio-altas.

La secuencia de mezclado de las pastas preparadas para determinar la demanda de agua es la indicada en la normativa correspondiente (EN 196-3) con una ligera modificación para considerar las pastas con aditivo polifuncional. La secuencia de mezclado empleada es la siguiente: se mezclan 500 g de cemento, agua y aditivo polifuncional durante 90 segundos, parando 15 segundos para limpiar las paredes de la amasadora y volviendo a mezclar durante 90 segundos más, todo ello a velocidad baja.

Los materiales y equipos de ensayos se han mantenido a la temperatura de ensayo un mínimo de 48 horas antes de realizar los ensayos en la cámara de control ambiental ubicada en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (**apartado 3.3, Capítulo 3**); asimismo, todos los ensayos se han realizado en el interior de la cámara climática.

B.3 RESULTADOS OBTENIDOS

El presente anejo tiene por objeto mostrar los resultados obtenidos en las pastas de cemento fabricadas y ensayadas a las tres temperaturas estudiadas. En este anejo, además, se presenta el análisis de dichos resultados.

B.3.1 Determinación del punto de saturación en función de la temperatura

La **figura B.1** muestra las curvas de fluidez obtenidas en el cono de Marsh a las tres temperaturas estudiadas (6, 20 y 38 °C). La gráfica muestra los resultados obtenidos en pastas de cemento fabricadas con diferentes dosis de aditivo polifuncional abarcando un rango que incluye desde la pasta sin aditivo hasta una dosificación mayor que la empleada en el hormigón. La figura muestra la dosis de aditivo con respecto al peso de cemento como residuo seco y, también, considerando el peso total de aditivo tal y como es suministrado.

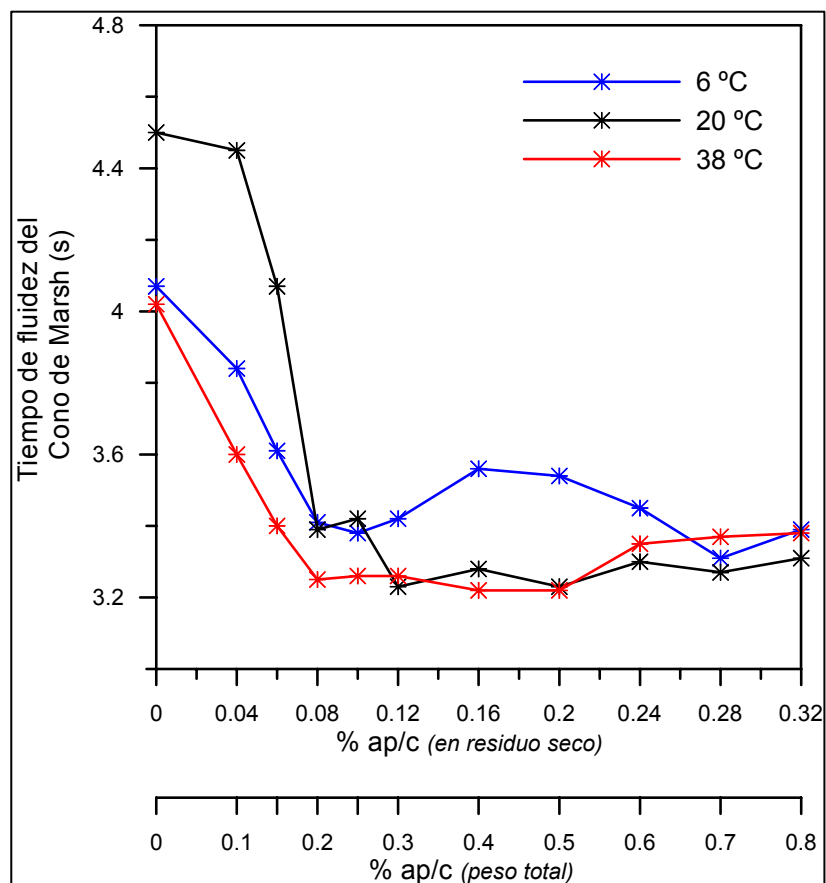


Figura B.1.- Fluidez y punto de saturación en función de la temperatura

El punto de saturación del aditivo polifuncional se define mediante las curvas de fluidez mostradas en la figura anterior como la dosis de aditivo a partir de la cual el tiempo de fluidez del cono de Marsh no varía de forma significativa. Se observa que el punto de saturación obtenido en las pastas de cemento corresponde a una dosis de aditivo de 0,08 %, notablemente inferior a la empleada en el hormigón. Otro aspecto interesante radica en que el punto de saturación no depende de la temperatura, como muestra dicha figura. Se observa, además, que la fluidez inicial de las pastas no está influenciada significativamente por la temperatura, ya que los valores del tiempo de fluidez obtenidos en el cono de Marsh oscilan en un rango bastante limitado.

B.3.2 Pérdida de fluidez en función de la temperatura y de la dosis de aditivo polifuncional

La pérdida de fluidez con el tiempo se ha determinado a las tres temperaturas estudiadas (6, 20 y 38 °C) en pastas de cemento sin aditivo polifuncional y con dosis de aditivo correspondientes al punto de saturación determinado en la sección anterior ($ap/c = 0,08\%$) y a la empleada en el hormigón ($ap/c = 0,28\%$). La **figura B.2** muestra la pérdida de fluidez de todas las pastas de cemento estudiadas durante un periodo de dos horas; las medidas se han realizado en intervalos de 15 minutos.

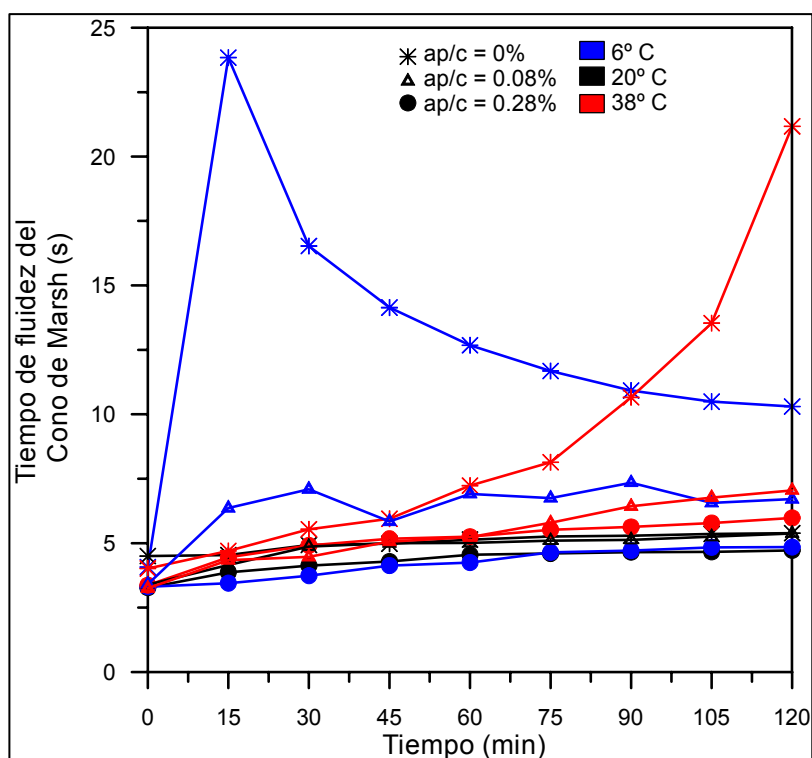


Figura B.2.- Efecto de la temperatura en la pérdida de fluidez de pastas de cemento con dosis de aditivo polifuncional correspondientes a 0, 0,08 y 0,28%

La anterior figura muestra algunos aspectos interesantes con respecto a la evolución de la fluidez en el tiempo de las pastas estudiadas. Se observa que las pastas con aditivo polifuncional no experimentan una pérdida de fluidez significativa durante un periodo de dos horas independientemente de la dosis empleada ($ap/c = 0,08\%$ y $0,28\%$).

Sin embargo, la figura muestra comportamientos significativamente diferentes en las pasta sin aditivo, especialmente a 6 y a 38 °C. En este sentido, a 38 °C se observa una significativa pérdida de fluidez de la pasta que se manifiesta por un paulatino incremento del tiempo de fluidez del cono de Marsh. Por otro lado, a 6 °C, la pasta de cemento sin plastificante experimenta una importante disminución de fluidez durante los primeros 15 minutos y, a continuación, una paulatina recuperación de la fluidez con el tiempo.

Con el objetivo de visualizar mejor los resultados, a continuación se presentan los datos de la figura anterior (**figura B.2**) desglosados en tres figuras (**figuras B.3**, **B.4** y **B.5**) en las que se muestran los datos obtenidos para cada temperatura en función de la dosis de aditivo polifuncional.

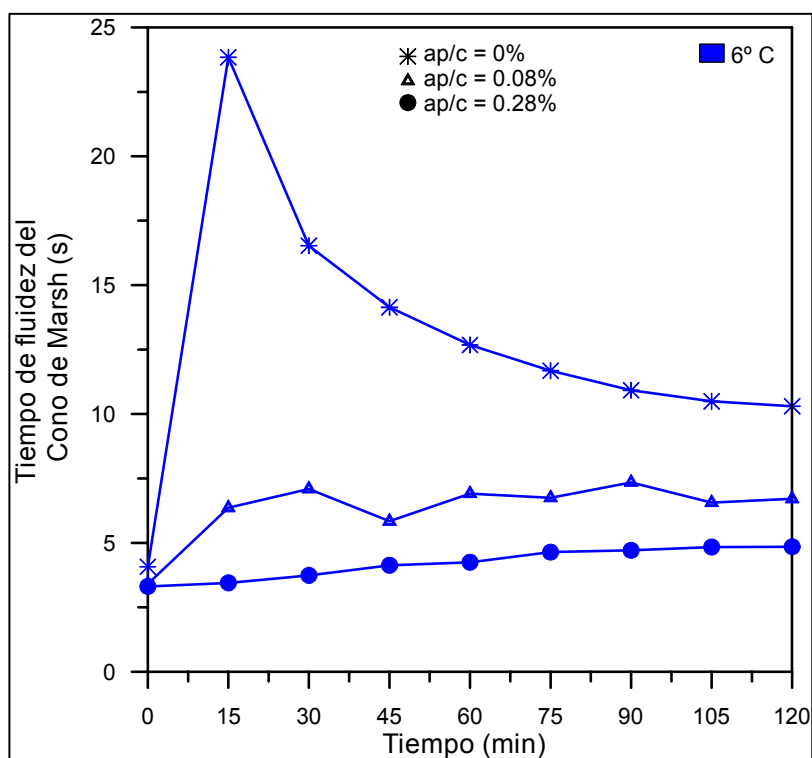


Figura B.3.- Pérdida de fluidez a 6 °C en función de la dosis de aditivo polifuncional ($ap/c = 0, 0,08$ y $0,28\%$)

Las **figuras B.3, B.4 y B.5** muestran que la pérdida de fluidez durante un periodo de dos horas de la pasta de cemento con una dosis de aditivo de $ap/c = 0,28\%$ es despreciable en las tres temperaturas estudiadas (6, 20 y 38 °C) y, además, en todos los casos el valor del tiempo de fluidez obtenido después de dos horas es siempre inferior al de las otras pastas estudiadas.

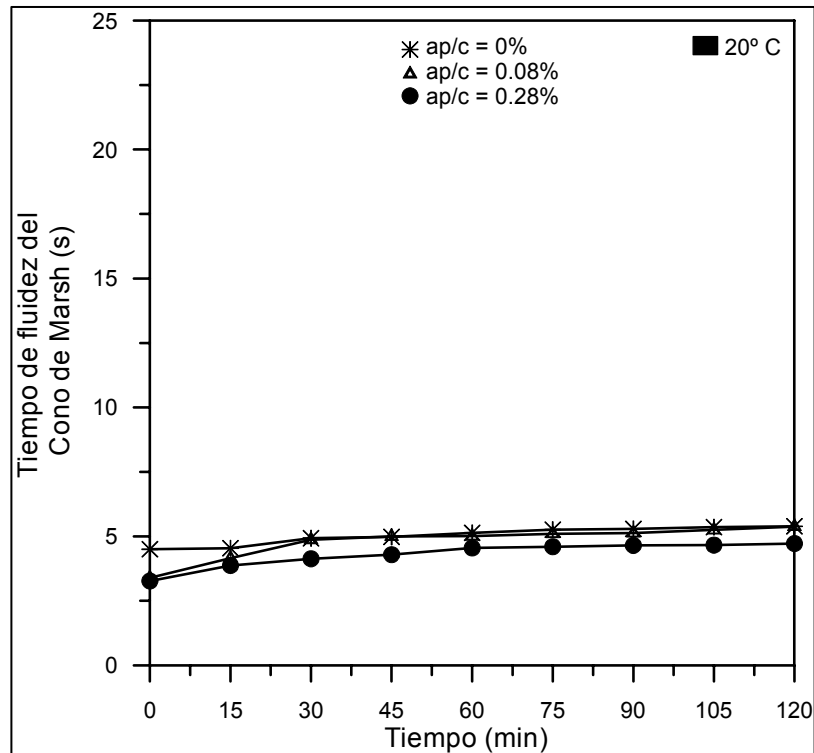


Figura B.4.- Pérdida de fluidez a 20 °C en función de la dosis de aditivo polifuncional ($ap/c = 0, 0,08$ y $0,28\%$)

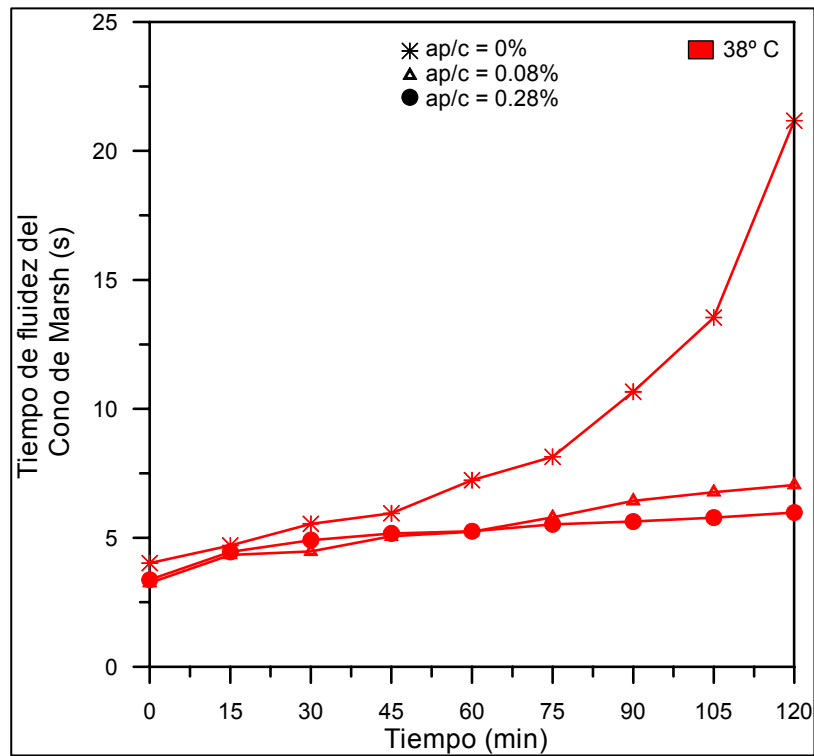


Figura B.5.- Pérdida de fluidez a 38 °C en función de la dosis de aditivo polifuncional (ap/c = 0, 0,08 y 0,28 %)

Sin embargo, la pasta de cemento con una dosis de aditivo correspondiente al punto de saturación (ap/c = 0,08%) muestra una pérdida de fluidez algo mayor a la temperatura de 6 °C, además de una tendencia algo confusa con ligeras oscilaciones del valor del tiempo de fluidez. A 20 y 38 °C, estas pastas de cemento muestran un comportamiento similar al de las pastas con ap/c = 0,28%, aunque alcanzando tiempos de fluidez ligeramente superiores después de dos horas.

Por otro lado, la pasta de cemento sin plastificante muestra un comportamiento significativamente diferente al de las pastas con aditivo, especialmente a temperaturas extremas. En este sentido y como se ha indicado anteriormente, a 38 °C, la pasta experimenta una significativa pérdida de fluidez con el tiempo. Sin embargo, a 6 °C, la fluidez disminuye de forma significativa durante los primeros 15 minutos, experimentando después una paulatina recuperación con el tiempo. Por otro lado, a 20 °C, la pasta muestra un comportamiento similar al de las pastas con aditivo con una pérdida de fluidez despreciable.

B.3.3 Demanda de agua en función de la temperatura y de la dosis de aditivo polifuncional

La **figura B.6** muestra la demanda de agua, a las temperaturas de 6, 20 y 38 °C, de pastas de cemento sin aditivo y con dosis de aditivo polifuncional correspondientes al punto de saturación en pasta ($ap/c = 0,08\%$) y a la empleada en hormigón ($ap/c = 0,28\%$).

Los resultados muestran que la temperatura influye de forma significativa en la demanda de agua del cemento, así como la presencia y dosis de aditivo polifuncional.

En este sentido, la menor demanda de agua de la pasta de cemento sin aditivo químico se obtiene a 20 °C, siendo ligeramente superior a 6 °C. Por otro lado, a 38 °C, la demanda de agua del cemento es significativamente superior a los valores obtenidos a 6 y 20 °C.

Los resultados en las pastas de cemento con aditivo polifuncional muestran que la demanda de agua aumenta al aumentar la temperatura y, además, este aumento es mucho más significativo al pasar de 20 a 38 °C que al aumentar la temperatura desde 6 a 20 °C.

Por otro lado, a 6 y 20 °C, la incorporación de aditivo polifuncional en las pastas de cemento conduce a una ligera disminución de la demanda de agua, es decir, dichas pastas requieren menor cantidad de agua para alcanzar consistencia normal, como cabe esperar. Sin embargo, a 38 °C la incorporación de aditivo químico conduce a un ligero incremento de la demanda de agua para obtener consistencia normal.

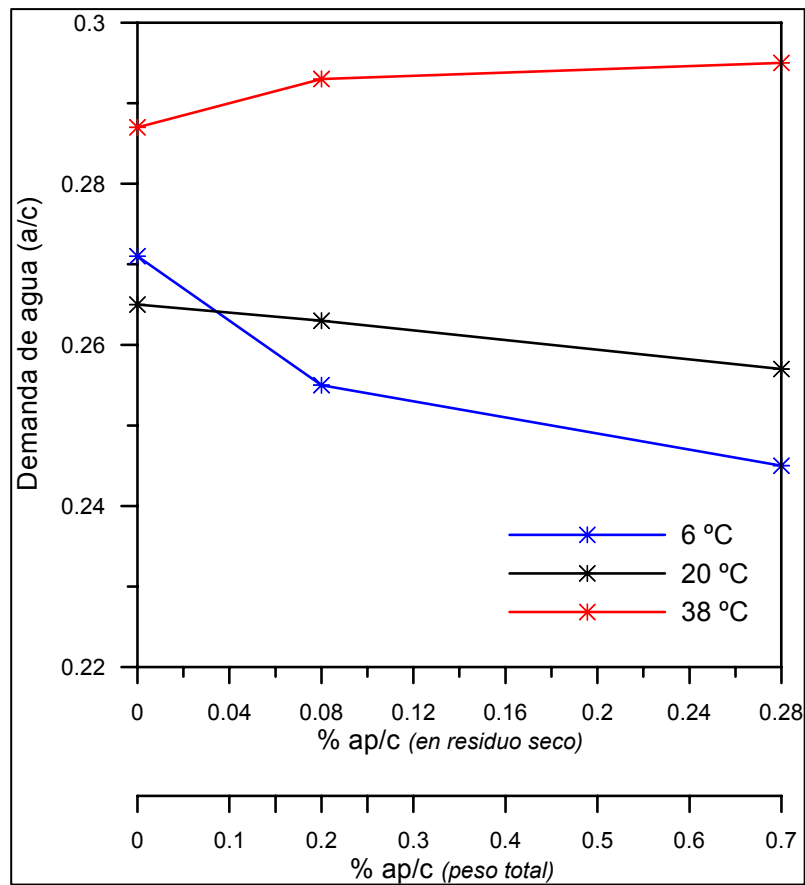


Figura B.6.- Demanda de agua en función de la temperatura

B.3.4 Tiempo de fraguado en función de la temperatura y de la dosis de aditivo polifuncional

Los tiempos de inicio y final de fraguado se han determinado en pastas de cemento sin aditivo polifuncional y con dosis de aditivo equivalentes al punto de saturación en pasta ($ap/c = 0,08\%$) y la empleada en hormigón ($ap/c = 0,28\%$) empleando un aparato de Vicat automático.

La **figura B.7** muestra los tiempos de principio y final de fraguado de las pastas estudiadas a 20 y 38 °C. Los resultados a la temperatura de 6 °C no se muestran en la figura debido a la imposibilidad de poder ser determinados debido al mal funcionamiento a esta temperatura del aparato de Vicat empleado. Por tanto, en esta sección se mostrarán únicamente los resultados obtenidos a las temperaturas de 20 y 38 °C.

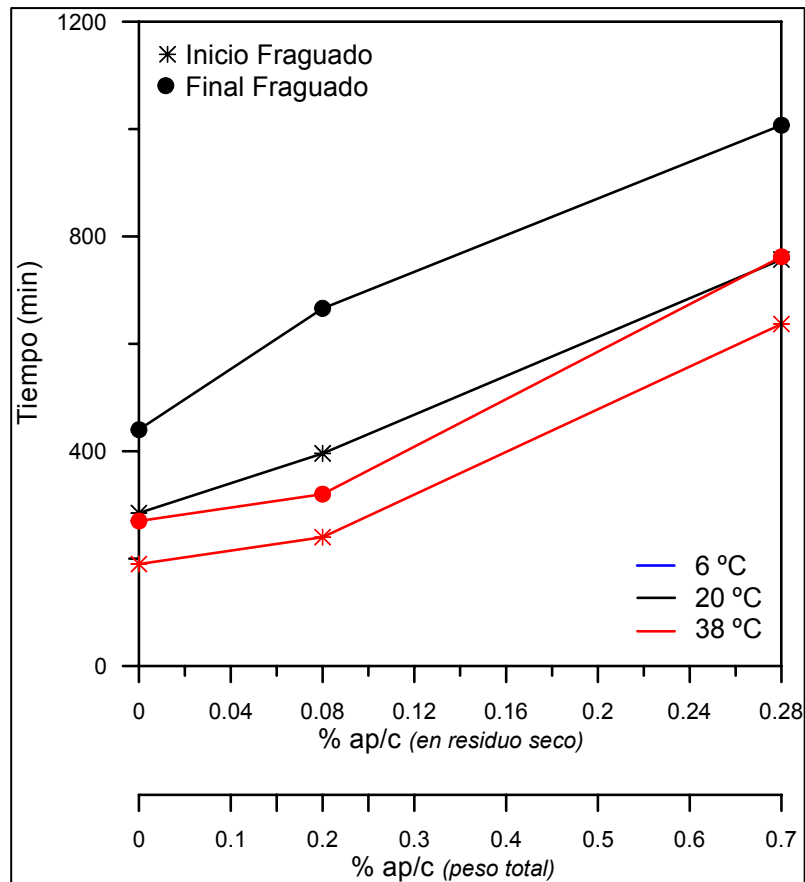


Figura B.7.- Tiempo de inicio y final de fraguado a 20 y 38° C en función de la dosis de plastificante

Los resultados obtenidos en pastas sin aditivo químico muestran que los tiempos de inicio y final de fraguado disminuyen al aumentar la temperatura y, como consecuencia, las pastas experimentan una aceleración del fraguado con la temperatura como cabe esperar. Por otro lado, la duración del periodo de fraguado, considerada como la diferencia entre el tiempo final y el inicial de fraguado, es significativamente menor a 38 °C cuando se compara con la duración del fraguado a 20 °C.

Por otro lado, la incorporación de aditivo polifuncional conduce a un retraso del fraguado de las pastas de cemento que se manifiesta por un aumento de los tiempos de principio y final de fraguado cuando se compara con la pasta de cemento sin aditivo químico. La magnitud de este retraso depende de la dosis de aditivo siendo mayor a mayor dosis de aditivo polifuncional. Sin embargo, la incorporación del aditivo no afecta de manera significativa a la duración del fraguado, considerado como la diferencia entre el tiempo final y el inicial de fraguado.

La **figura B.8** muestra la evolución de la penetración de la aguja de Vicat entre el principio y el final de fraguado. Las pastas de cemento, que poseen una relación $a/c = 0,56$, experimentan una considerable exudación y, como consecuencia, se observa una disminución de altura de la pasta de cemento en el interior del molde del orden de 6-7 mm debido a la pérdida de agua. Por tanto, el final del fraguado, tal y como se ha considerado en el presente estudio, no corresponde a una penetración de 0 mm de la aguja de Vicat, sino al momento en que la aguja de Vicat no penetra en la superficie de la pasta de cemento y, consecuentemente, no deja huella. Los resultados muestran la disminución de la duración del fraguado a la temperatura de 38 °C cuando se compara con los resultados a 20 °C.

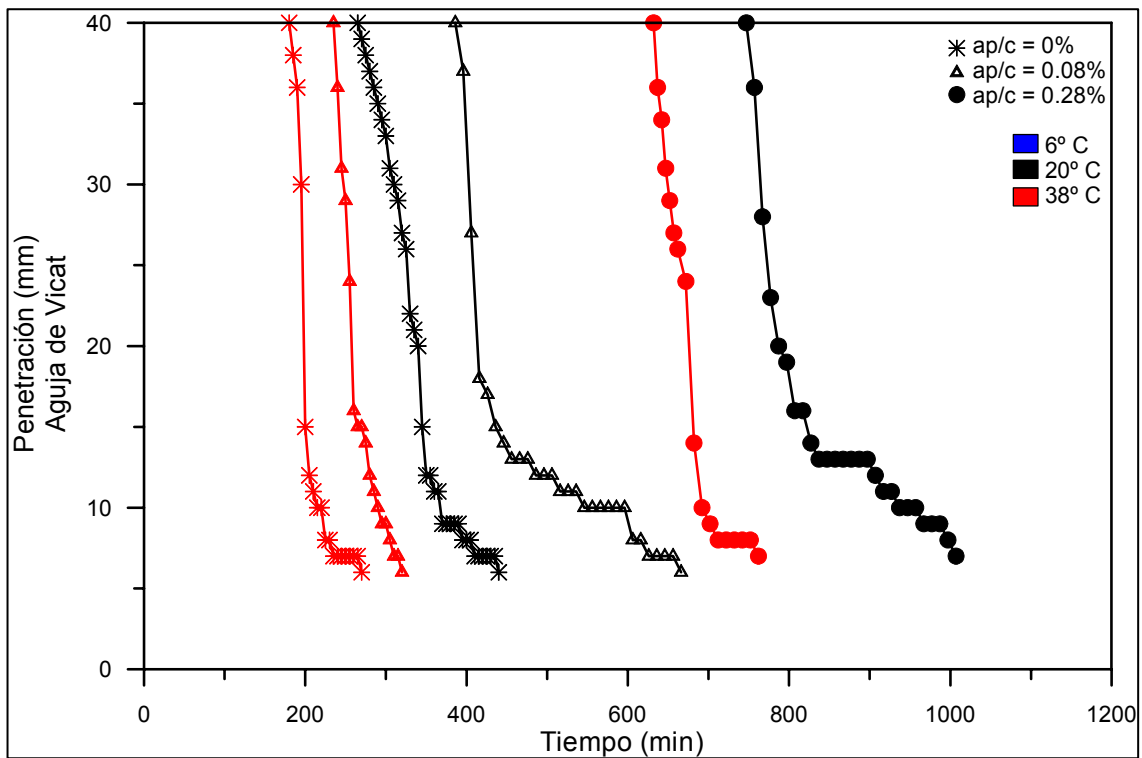


Figura B.8.- Evolución de la penetración de la aguja de Vicat a 20 y 38 °C en función de la dosis de plastificante

B.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

B.4.1 Fluidez y punto de saturación

Las curvas de fluidez obtenidas con el cono de Marsh (**figura B.1**) muestran que la fluidez inicial de las pastas no depende de forma significativa de la temperatura. Este aspecto debe entenderse en el contexto de unas pastas altamente fluidas en las que tanto la temperatura como la incorporación del aditivo polifuncional no permiten obtener una variación significativa del tiempo de fluidez del cono de Marsh. En este sentido los valores obtenidos analizando todas las pastas ensayadas oscilan entre 4,50 y 3,22 segundos. Sin embargo, estas ligeras variaciones en la fluidez de las pastas de cemento pueden llegar a ser significativas en cuanto a la trabajabilidad obtenida en el hormigón.

Un aspecto a destacar es que el punto de saturación obtenido en pasta de cemento no depende de la temperatura. Por otro lado, se observa que el punto de saturación obtenido en pasta de cemento es significativamente menor a la dosis empleada en hormigón. El punto de saturación en hormigón puede diferir notablemente del obtenido en pasta de cemento por diversos motivos entre los que cabe destacar, un mezclado más enérgico en hormigón debido al tipo de amasadora industrial y la acción de los áridos durante el mezclado, y la presencia de áridos con elevado coeficiente de absorción.

Sin embargo, debido a la significativa diferencia observada, se ha creído conveniente determinar el punto de saturación del aditivo polifuncional en mortero a la temperatura de referencia, es decir 20 °C. Para ello se han fabricado morteros con una dosificación equivalente a la del hormigón planteada en las campañas anteriores con hormigón. En este sentido, se han empleado arenas calizas de machaqueo de fracciones 0-2 mm y 0-5 mm cuyas características se describen en el **apartado 3.2 del Capítulo 3**. La relación arena 0-2/cemento y arena 0-5/cemento son, respectivamente, 0,70 y 2,95, como en el hormigón. Se supone que la arena se encuentra en la condición de saturada con superficie seca y, por tanto, se ha modificado la cantidad de agua añadida en función de los coeficientes de absorción y la humedad de ambas arenas.

La relación agua/cemento del mortero es de 0,56 y el agua contenida en el aditivo polifuncional se ha considerado en la relación a/c. Los morteros se han fabricado en la amasadora descrita anteriormente empleando la siguiente secuencia de amasado: se mezclan los materiales sólidos (cemento y arenas) durante 30 segundos a velocidad baja y, a continuación, se incorpora el 80% de la relación a/c junto con el agua necesaria para saturar los áridos y se continúa mezclando durante un minuto a velocidad baja, para, finalmente, añadir el resto del agua con el aditivo químico y amasar durante 30 segundos a velocidad baja y 90 segundos más a velocidad alta.

La consistencia de los morteros se ha determinado empleando la mesa de sacudidas (UNE 83-811-92) ya que su nivel de fluidez es inferior al necesario para poder emplear el cono de Marsh. Se han fabricado morteros con diferentes dosis de

aditivo químico con el objetivo de determinar el punto de saturación del aditivo químico, definido como aquel a partir del cual la consistencia del mortero en la mesa de sacudidas no varía significativamente.

La **figura B.9** muestra los resultados obtenidos. En ella se observa que la dosis de aditivo, expresada como residuo seco del aditivo con respecto al peso del mortero, a partir de la cual no se obtiene un aumento significativo de la consistencia del mortero es aproximadamente $ap/c = 0,24 \%$, correspondiente a una dosis de aditivo de $0,6 \%$ cuando se expresa como peso total del aditivo químico con respecto al peso de cemento. Esta dosis indica que la incorporación de las arenas conduce a un significativo aumento del consumo de aditivo polifuncional que justifica la gran diferencia observada entre el punto de saturación obtenido en pasta de cemento y la dosis de aditivo que se emplea en hormigón.

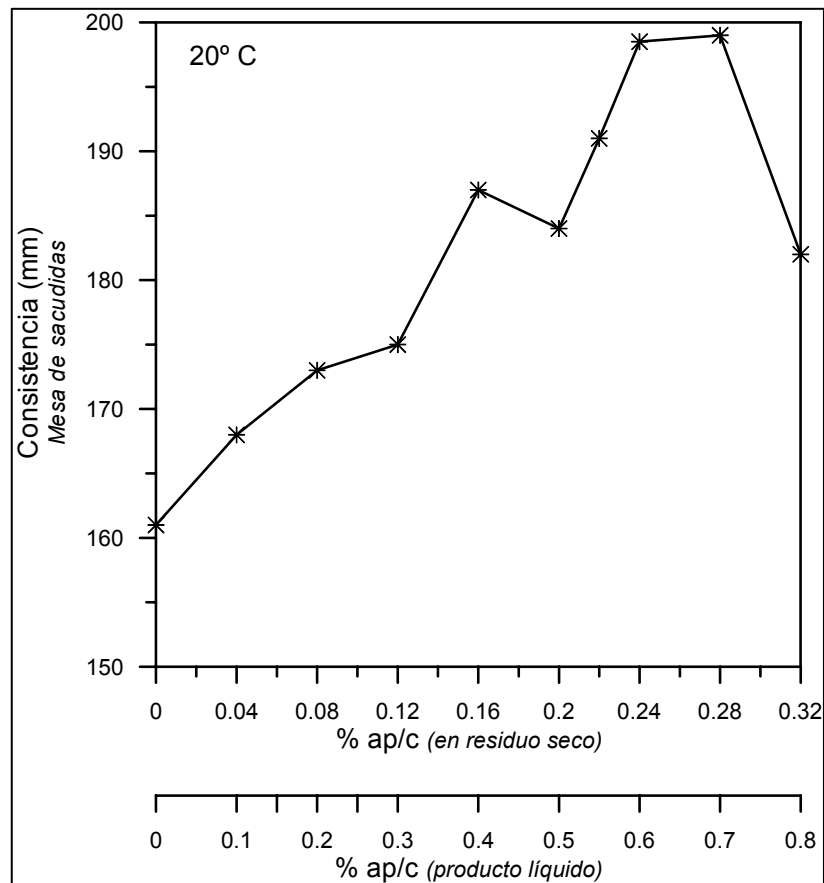


Figura B.9.- Determinación del punto de saturación en mortero a la temperatura de 20°C (mesa de sacudidas)

Una vez determinado el punto de saturación de la pasta de cemento los siguientes ensayos se han realizado en todos los casos considerando pastas de cemento con dos contenidos de aditivo químico diferentes que corresponden a la dosis de

saturación en pasta ($ap/c = 0,08\%$) y a la dosis empleada en hormigón ($ap/c = 0,28\%$). Los resultados se han comparado en todos los casos con una pasta de referencia sin aditivo polifuncional.

B.4.2 Pérdida de fluidez con el tiempo

Los resultados obtenidos en el estudio de la pérdida de fluidez de las pastas con el tiempo muestran tendencias interesantes. Se observa que, así como la incorporación de aditivo químico no afecta significativamente a la fluidez inicial de las pastas, su presencia es absolutamente fundamental para obtener un buen mantenimiento de la fluidez durante un periodo de dos horas en las tres temperaturas estudiadas.

En este sentido, la dosis aditivo correspondiente a la dosis de saturación en pasta ($ap/c = 0,08\%$) se muestra ineficiente para el correcto mantenimiento de la fluidez de la pasta a la temperatura de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, a 20 y $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, la pasta con $ap/c = 0,08\%$, muestra un comportamiento satisfactorio en cuanto a mantenimiento de la fluidez en el tiempo.

Sin embargo, la pasta de cemento con una dosis de aditivo polifuncional superior a la dosis de saturación en pasta, en este caso corresponde a la dosis empleada en hormigón ($ap/c = 0,28\%$), muestra un comportamiento satisfactorio a las tres temperaturas estudiadas, sin pérdida significativa de fluidez a lo largo de las dos horas estudiadas. En este sentido, aunque no por requerimientos de fluidez de la pasta, parece obvio recomendar el empleo de una dosis de aditivo superior al punto de saturación en pasta, con el objetivo de minimizar la pérdida de fluidez con el tiempo a las tres temperaturas estudiadas.

Por otro lado, la pasta de cemento sin aditivo químico muestra un comportamiento inusual a la temperatura de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ manifestando una súbita pérdida de fluidez durante los primeros 15 minutos y una continua recuperación de fluidez a lo largo de las dos horas estudiadas. Este comportamiento puede ser debido a diferentes causas, aunque se necesitarían estudios complementarios para determinar su origen. Las posibles causas que podrían estar relacionadas y que podrían orientar en un futuro estudio para dilucidar el origen de tal comportamiento son las siguientes:

- Un retraso de la primera reacción del aluminato tricálcico (C_3A) altamente exotérmica que, en condiciones normales, suele ocurrir durante los primeros 1-2 minutos después del contacto del cemento con el agua para dar una primera formación de etringita usualmente micro-cristalina que, normalmente, ocurre durante el amasado. La formación de estos cristales una vez finalizado el amasado puede causar un endurecimiento prematuro de la pasta de cemento. Los posteriores re-amasados de la pasta de cemento previamente a cada ensayo con el cono de Marsh, pueden contribuir a la rotura de estos cristales y, consecuentemente, a la mejora de la fluidez de la pasta. La morfología de estos

crisales también podría estar influida por la temperatura y, consecuentemente, podría afectar a la fluidez de la pasta de cemento.

- Otra posible causa podría estar relacionada con la disponibilidad de los sulfatos y la posible influencia de la temperatura en ésta. Si la cantidad de aniones SO_4^{2-} se viera afectada por efecto de la temperatura podría influir en la reactividad del C_3A dando lugar a la reacción directa de éste o la precipitación de cristales de yeso. En ambos casos se produciría un endurecimiento de la pasta de cemento que en el segundo caso sería recuperable por la acción del re-amasado.

Además, la pasta de cemento sin aditivo muestra una importante pérdida de fluidez con el tiempo a la temperatura de 38 °C, efecto que no se observa en las pastas con aditivo polifuncional. Esta observación vuelve a confirmar la necesidad de incorporar aditivo químico con el objetivo de obtener un correcto mantenimiento de la fluidez durante las dos primeras horas.

B.4.3 Demanda de agua

La demanda de agua de la pasta de cemento sin aditivo polifuncional muestra un comportamiento diferente al de las pastas con aditivo. En este sentido, las pastas con aditivo químico ($\text{ap/c} = 0,08\%$ y $0,28\%$) requieren una mayor cantidad de agua para mantener la consistencia normal al aumentar la temperatura, es decir, su demanda de agua aumenta con la temperatura.

Además, cabe destacar que, el incremento de la demanda de agua al pasar de una temperatura de 20 a 38 °C es significativamente mayor que el aumento de demanda de agua al aumentar la temperatura desde 6 °C hasta 20 °C. En este sentido, el incremento en la demanda de agua de las pastas con dosis de aditivo de 0,08 % y 0,28 % es, respectivamente, de un 3% y 5% al pasar de 6 °C a 20 °C; y de un 11% y 15% al pasar de 20 °C a 38 °C.

Por otro lado, si se analiza el efecto de la incorporación de aditivo polifuncional en la demanda de agua se observa que, a 6 y 20 °C, la demanda de agua disminuye con la incorporación de aditivo y esta disminución es mayor al aumentar la dosis de aditivo. Este comportamiento se debe al efecto reductor de agua del aditivo, que permite disminuir el contenido de agua necesario para obtener una fluidez determinada.

Sin embargo, a la temperatura de 38 °C la incorporación de aditivo polifuncional da lugar a una tendencia no esperada, de manera que la demanda de agua aumenta al aumentar la dosis de aditivo polifuncional. Este inesperado efecto contribuye al significativo incremento de la demanda de agua al aumentar la temperatura desde 20 a 38 °C.

Por último, el comportamiento de la pasta de cemento sin aditivo polifuncional donde la menor demanda de agua se obtiene a 20 °C, siendo mayor a 6 °C y,

especialmente, a 38° C, puede estar relacionado con el efecto observado en la pérdida de fluidez donde se detectaba un endurecimiento prematuro de la pasta durante los primeros 15 minutos. La determinación de la demanda de agua puede verse afectada por este endurecimiento dando lugar al resultado descrito.

Cabe destacar que, a pesar del notable interés científico de las inesperadas tendencias obtenidas en pasta de cemento sin aditivo polifuncional a la temperatura de 6 °C, desde un punto de vista práctico, no son resultados relevantes ya que los hormigones objeto de estudio no se fabrican sin la presencia de aditivo polifuncional.

B.4.4 Principio y final de fraguado

Los resultados obtenidos en cuanto a la influencia de la temperatura y la dosis de aditivo polifuncional en los tiempos de fraguado de las pastas de cemento han sido limitados debido a la imposibilidad de realizar los ensayos a la temperatura de 6 °C.

Los resultados a 20 °C y 38 °C muestran la aceleración del fraguado al aumentar la temperatura y el efecto retardante en función de la dosis del aditivo polifuncional. Además, se observa que la duración del proceso de fraguado también depende de la temperatura siendo menor a la temperatura más alta.

B.5 CONCLUSIONES

De los trabajos realizados en esta fase considerando los materiales y rangos de variables estudiados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La fluidez de las pastas de cemento estudiadas, determinada mediante el ensayo del cono de Marsh, no depende significativamente de la temperatura. Estas pastas presentan una elevada fluidez y, por tanto, no se obtienen variaciones sustanciales del tiempo de fluidez del cono de Marsh.
- El punto de saturación determinado en pasta de cemento corresponde a una dosis de aditivo polifuncional de 0,08 %, expresada como residuo seco del aditivo con respecto al peso de cemento. Esta dosis es significativamente inferior a la empleada en hormigón, la cual corresponde a 0,28 %. Sin embargo, la dosis de saturación en mortero, determinada mediante el ensayo de la mesa de sacudidas, es de 0,24%. Esto indica que existe un elevado consumo de aditivo por parte de las arenas y justifica la gran diferencia observada entre el punto de saturación en pasta y la dosis empleada en hormigón.
- El punto de saturación determinado en pasta de cemento no depende de la temperatura.
- Aunque el aditivo polifuncional no afecta significativamente a la fluidez de las pastas de cemento, su incorporación es fundamental para obtener un correcto mantenimiento de la fluidez de la pasta de cemento a las tres temperaturas estudiadas.
- La dosis de aditivo polifuncional empleada en hormigón ($ap/c = 0,28\%$) conduce a pérdidas de fluidez despreciables después de dos horas, mostrando un comportamiento satisfactorio en las tres temperaturas estudiadas. Sin embargo, la dosis de saturación, determinada en pasta de cemento, no permite mantener de forma eficaz la fluidez a la temperatura de 6 °C, aunque su comportamiento es satisfactorio a 20 y 38 °C.
- La demanda de agua de las pastas de cemento con aditivo polifuncional aumenta al aumentar la temperatura. En este sentido, el incremento al pasar de una temperatura de 20 °C a 38 °C es significativamente mayor que el incremento de la demanda de agua al aumentar la temperatura desde 6 °C hasta 20 °C.
- La incorporación de aditivo polifuncional disminuye la demanda de agua en función de la dosis empleada a las temperaturas de 20 °C y 38 °C debido al efecto reductor de agua del aditivo químico. Sin embargo, a la temperatura de 38 °C, la incorporación de aditivo conduce a un ligero aumento de la demanda de agua.

- El aumento de temperatura conduce a una aceleración del fraguado y a una disminución de la duración del mismo, entendida como la diferencia entre el tiempo final y el inicial de fraguado. Los resultados muestran, también, el efecto retardante en función de la dosis del aditivo polifuncional.
- La pasta de cemento sin aditivo químico muestra un comportamiento inusual a la temperatura de 6 °C manifestando una súbita pérdida de fluidez durante los primeros 15 minutos y una continua recuperación de fluidez a lo largo de las dos horas estudiadas. Además, la demanda de agua de esta pasta es ligeramente superior a la obtenida a 20 °C. Estas inesperadas tendencias tienen un notable interés científico aunque, dentro del marco del presente convenio, no son resultados relevantes ya que los hormigones objeto de estudio no se fabrican sin la presencia de aditivo polifuncional.

A la luz de los resultados obtenidos, presentados en este anejo, se pueden presentar las siguientes consideraciones finales:

- El aditivo utilizado tiene un papel de gran importancia como regulador de cinéticas de reacción. Las estrategias de reducir un punto (en la dosificación al millar) en invierno y aumentar un punto de verano son correctas.
- Habría que ahondar el estudio en la búsqueda de explicaciones más profundas en cuanto el comportamiento de la pasta sin aditivos en condiciones de invierno y de la mayor demanda de agua que presenta las pastas con aditivos en condiciones de verano
- El aditivo polifuncional empleado parece que no es una variable principal en el estudio respecto a la optimización del consumo de cemento en hormigones con diferentes condiciones climáticas. Sin embargo esto no puede extrapolarse a otros aditivos sin una contrastación experimental.