

INFLUENCIA DEL TIPO DE CEMENTO SOBRE LA FLUIDEZ DE PASTAS Y MORTEROS CARACTERÍSTICOS DE HORMIGONES DE ALTA PERFORMANCE

Giaccio, G.¹, Matiasich, C.², Vitale, G.² y Zerbino, R.³

RESUMEN

El advenimiento de los aditivos superfluidificantes es uno de los principales factores intervinientes en el desarrollo de hormigones de altas prestaciones. Estos aditivos permiten una importante reducción del agua de mezclado a partir de la defloculación de las partículas de cemento, con sus consecuentes beneficios sobre las propiedades en estado fresco del hormigón y la posibilidad de elaborar hormigones de alta resistencia y durabilidad. En los últimos años se han producido marcados cambios en los cementos comercializados, fundamentalmente a partir de la incorporación de diversas adiciones minerales. En este trabajo se presenta un estudio sobre pastas y morteros que analiza la influencia del tipo de cemento sobre la demanda de superfluidificante y las características de fluidez de las mezclas, a fin de ser aplicado en el diseño de hormigones de alta performance. Los resultados indican que los cementos con adiciones presentan una menor demanda de superfluidificante, con excepción de un cemento puzolánico. A la vez, las mezclas elaboradas con los cementos con adiciones evidencian una mayor cohesión que las elaboradas con cemento portland normal.

INTRODUCCIÓN

La evolución de los aditivos superfluidificantes ha permitido el desarrollo de Hormigones de Altas Prestaciones (HAP), entre los que se encuentran los hormigones de alta resistencia y más recientemente los hormigones autocompactables. En estos hormigones adquieren gran importancia las características de fluidez de las mezclas y su variación durante las primeras horas. Por otro lado, considerando que las matrices requieren alto contenido de finos y que los materiales de mayor costo están presentes en la pasta, surge la optimización de la matriz como un paso importante en el diseño de estos hormigones.

Existen diferentes tipos de aditivos superfluidificantes. Los de base melamínica y naftalénica, primeramente desarrollados, cuyo efecto dispersivo se logra por repulsión electrostática, como resultado de la adsorción sobre la superficie de las partículas de cemento. Se ha observado que las partículas de C_3S y C_2S en mezclas sin aditivos presentan cargas negativas en la superficie, mientras que las partículas de C_3A y C_4AF presentan cargas positivas (1); esto genera una atracción electrostática que produce la coagulación de las mismas. En presencia de estos aditivos todas las partículas presentan cargas del mismo signo, por lo que se produce una repulsión entre ellas, mejorando de este modo las características de fluidez de la mezcla. Más recientemente se han desarrollado

¹ Investigador CIC, LEMIT. Prof. Facultad de Ingeniería UNLP.

² Becario CIC-LEMIT.

³ Investigador CONICET, LEMIT-UNLP. Prof. Facultad de Ingeniería UNLP.

otros tipos de aditivos superfluidificantes, los de base copolimero, que basan su acción en un efecto dispersor de carácter estérico, generado por una molécula de gran tamaño que impide el contacto entre las partículas de cemento. También existen diferencias entre aditivos que pertenecen a un mismo grupo, esto se debe a la síntesis que se utilice, lo cual influencia la composición química del aditivo y el peso molecular.

En general la eficiencia del aditivo depende de su capacidad de adsorción sobre las partículas de cemento. Una de las principales variables que controla la cantidad de aditivo demandado es la finura del cemento, a mayor finura mayor es la superficie específica y por lo tanto mayor es la cantidad de aditivo necesario para dispersar las partículas de cemento. No obstante ello, también se determinó que la adsorción varía con la composición mineralógica de las partículas de cemento y con el tipo de superfluidificante, encontrando que las fases de aluminatos C_3A , C_4AF presentan una adsorción mucho mayor comparada con la fase silicatos C_3S , C_2S (1). En otros estudios (2, 3) se encontró que los cementos que contienen bajo nivel de aluminatos presentan una mayor fluidez y que el contenido de sulfatos tiene efecto sobre la cantidad de aditivo adsorbido por la fase de aluminatos, esto se debe a que en presencia de iones SO_4^{2-} se produce una "competencia" con las moléculas de aditivo por adsorberse sobre dichas partículas, de este modo más moléculas de aditivo quedan libres en la solución para fluidificar la pasta. Resultados similares fueron encontrados por otros autores (1).

Otra variable a la que se otorga gran influencia se relaciona con el orden de incorporación de materiales a la mezcladora y el sistema de mezclado utilizado. En estudios de la fluidez de pastas realizados mediante el uso del cono de Marsh se analizaron como variables la forma de incorporar los materiales a la mezcladora, y el tiempo y la velocidad de mezclado y se encontraron variaciones del tiempo de escurrimiento de hasta 100% (4).

La pasta reviste gran importancia en el diseño de hormigones de altas prestaciones, provee fluidez y cohesión al hormigón. A su vez, como fuera indicado, en la pasta se encuentran los componentes de mayor costo (ligantes y aditivos), lo que justifica su optimización como necesidad económica. El comportamiento reológico de pastas, morteros y hormigones ha sido estudiado por diversos autores y se asume que el sistema muestra las características de un fluido de Bingham (6). Este material se caracteriza por presentar una tensión de corte umbral τ_0 , que es la tensión que se debe superar para que comience el movimiento y está representada por la ordenada al origen del gráfico $\tau - \dot{\gamma}$ (tensión de corte – velocidad de deformación) y por una viscosidad plástica μ , representada por la pendiente de la curva. Dado que la medición de tales propiedades reológicas no es simple e implica el uso de un equipamiento oneroso, se ha sugerido el empleo de diversos métodos ingenieriles que han demostrado una aceptable correlación entre sus resultados y las propiedades reológicas (viscosidad, tensión de corte umbral) de sistemas a base de cemento portland.

En este trabajo se presenta un estudio sobre la fluidez de pastas y morteros característicos de HAP, elaborados con diferentes tipos de cemento y un mismo aditivo superfluidificante, mediante la aplicación del cono de Marsh para las pastas y el ensayo de extendido que emplea un cono troncocónico para valorar la fluidez de los morteros. El estudio busca determinar, de forma racional, el contenido de aditivo para cada tipo de cemento, como también evaluar en forma comparativa la variación de la fluidez en el tiempo para diferentes combinaciones de ligantes y aditivo.

EXPERIENCIAS

Métodos

El estudio sobre pastas se basó en mediciones efectuadas mediante el Cono de Marsh. Este método fue utilizado por diversos autores para optimizar las combinaciones de cemento – adiciones – agua – aditivo, como también para determinar la compatibilidad entre cementos y aditivos. El aparato consta de un embudo troncocónico que presenta una boquilla de salida de 8 mm de diámetro y 60 mm de longitud (Fig. 1). En este caso se colocaron dentro del embudo 800 ml de pasta y se tomó el tiempo que demanda el paso de 200 ml de la misma. Para obtener cada valor se realizaron tres mediciones y se informó el promedio del tiempo de pasaje.

Para la elaboración de las pastas se utilizó una mezcladora Hobart con dos velocidades de mezclado: 260 rpm (alta) y 130 rpm (baja). La secuencia de mezclado fue la siguiente: el aditivo se diluye previamente en 50 gramos del agua de mezclado. Se colocan en la bacha de la mezcladora el agua, el cemento, y 1/3 del aditivo diluido, mezclando 2 minutos a velocidad baja; se agrega el resto del aditivo diluido, mezclando 1 minuto y medio a velocidad alta. Para garantizar un correcto mezclado fueron elaborados dos litros de pasta. La temperatura de ensayo se mantuvo constante en 20°C.

Además de la medida de la fluidez inicial (realizada a los 5 minutos del contacto entre el agua y los materiales) se evaluó la fluidez luego de transcurridos 30 y 60 minutos. Para ello se procedió a remezclar la pasta durante 30 segundos a velocidad alta antes de medir. Durante el período de espera la pasta se mantuvo cubierta con un paño húmedo a fin evitar la pérdida de agua por evaporación. La realización de medidas sobre pastas durante la hora posterior al mezclado es útil para la detección de casos de incompatibilidad entre ligantes y aditivos. Para la determinación del cambio de fluidez, el tiempo se comienza a contar a partir del contacto del agua con el cemento.

A medida que se coloca más cantidad de aditivo la fluidez de la mezcla aumenta lo cual se verifica en la disminución del tiempo de pasaje en el cono, pero este efecto no es indefinido, sino que se verifica que existe un contenido de aditivo a partir del cual el tiempo de pasaje no aumenta en forma significativa, este punto se denomina “punto de saturación”. Aumentar la dosis por encima del punto de saturación es desaconsejable tecnológicamente debido a algunos problemas que pueden surgir, principalmente aumento del tiempo de fraguado y segregación, y económicamente, debido al uso ineficiente de un material (aditivo) de alto costo. Para determinar el punto de saturación se realizó una serie de pastas con distintos contenidos de aditivo, siguiendo la citada metodología.

Para estudiar la fluidez de los morteros se utilizó el ensayo de “extendido” que emplea un molde troncocónico de 60 mm de altura, con diámetros superior e inferior iguales a 70 mm y 100 mm respectivamente (Fig. 2). Se ubica el cono sobre una superficie lisa y nivelada, se llena con el mortero, se enrasa y se levanta suavemente. Finalmente se promedia el diámetro alcanzado considerando dos direcciones ortogonales, el cual se informa como “extendido” y constituye el resultado del ensayo. Durante el ensayo la temperatura se mantuvo constante en 20°C. Con el aumento de la dosis de aditivo crece el “extendido” y permite la definición de un punto de saturación, como la dosis a partir de la cual no se produce un aumento significativo del diámetro o cuando para una dosis mayor comienzan a apreciarse signos de segregación. Para la elaboración de los morteros se

utilizó la misma mezcladora descrita anteriormente. La secuencia de mezclado en los morteros fue la siguiente: se diluyó el aditivo en 50 gramos del agua de la mezcla. Se colocaron en la bacha de la mezcladora el agua restante + el cemento + 1/3 del aditivo diluido y se mezcló durante 1 minuto a velocidad baja; luego se agregó la arena durante 30 segundos y se incorporó el resto del aditivo, y se mezcló 1 minuto más, a velocidad alta.

Para cada porcentaje de aditivo se realizó un nuevo mortero. Además de medir la fluidez inicial se repitieron medidas a los 30 y 60 minutos; remezclando previamente el mortero durante 30 segundos a velocidad alta. Durante el período de espera el mortero se mantuvo cubierto con un paño húmedo de modo de evitar la pérdida de agua por evaporación. Simultáneamente a la determinación de fluidez se midió el peso unitario (PUV) de los morteros y mediante el método gravimétrico se determinó el porcentaje de aire incorporado.

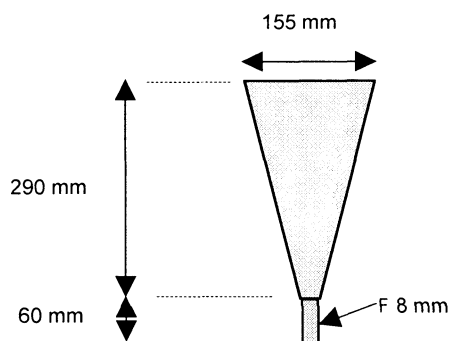


Figura 1. Esquema del Cono de Marsh para la medida de la fluidez de las pastas.

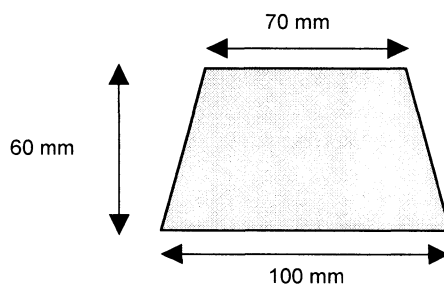


Figura 2. Esquema del Cono para la medida del extendido en morteros.

Materiales y mezclas

En la elaboración de las mezclas se utilizaron los siguientes cementos disponibles en el mercado durante el año 2002: cemento portland normal (CPN), cemento portland compuesto (CPC), dos cementos portland fillerizados con diferente contenido de filler calcáreo (F) (CPF_a, 9 % F y CPF_b, 18 % F) y un cemento portland puzolánico (CPP). Todos los cementos cumplían la norma IRAM 50000. En la Tabla 1 se informan las características físicas y la composición química de los mismos.

Se utilizó un aditivo superfluidificante de base naftalénica, con densidad 1.20, y PH entre 10 y 12. Para dicho aditivo, la dosis recomendada por el fabricante es de 0.8 a 2 % en peso de cemento. En este trabajo las dosis de aditivo serán expresadas siempre como contenido líquido referido al peso de cemento.

Se empleó una relación agua / cemento fija e igual a 0.30 en todas las pastas y morteros, como representativa del rango correspondiente a hormigones de alta resistencia. Para la elaboración de los morteros se utilizó una mezcla de dos arenas silíceas naturales obteniéndose una arena de módulo de finura 2.45. La relación arena / cemento en los morteros se mantuvo constante e igual a 1.60 en peso.

Tabla 1. Características de los cementos.

| Identificación | | CPN | CPC | CPFa | CPFb | CPP |
|---|----------------------|-------|-------|-------|-------|------|
| Retenido tamiz 75 micrones | (%) | 1.4 | 4 | 0.7 | 1.9 | 2 |
| Superficie específica Blaine | (m ² /kg) | 340 | 444 | 350 | 415 | 402 |
| Peso Específico | (g/cm ³) | 3.15 | 3.08 | 3.11 | 3.14 | 2.96 |
| Pasta de Consistencia Normal (%) | | 25.0 | 28 | 25.2 | 23.7 | - |
| Resistencia a compresión | 2 días (MPa) | 19.9 | 19.0 | 17.1 | 12.0 | 21.9 |
| | 7 días (MPa) | 49.9 | 34.2 | 47.4 | 37.2 | 37.3 |
| | 28 días (MPa) | - | 40.5 | 56.7 | 43.0 | 42.6 |
| Pérdida por calcinación | (%) | 2.22 | 7.14 | 5.37 | 6.94 | - |
| Trióxido de Azufre (SO ₃) | (%) | - | 1.80 | 2.50 | 2.51 | - |
| Oxido de Calcio (CaO) | (%) | 64.59 | 58.40 | 63.70 | 62.89 | - |
| Dióxido de Sílice (SiO ₂) | (%) | 21.0 | 20.10 | 20.6 | 19.6 | - |
| Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃) | (%) | 3.64 | 4.72 | 3.50 | 3.28 | - |
| Oxido Férrico (Fe ₂ O ₃) | (%) | 3.49 | 4.50 | 3.20 | 3.11 | - |
| Oxido de Magnesio (MgO) | (%) | 0.74 | 1.70 | 0.60 | 0.61 | - |
| Oxido de Sodio (Na ₂ O) | (%) | 0.13 | 0.14 | 0.1 | 0.07 | - |
| Oxido de Potasio (K ₂ O) | (%) | 1.05 | 0.74 | 1.00 | 1.03 | - |

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Pastas

En la Fig. 3 se muestran las curvas tiempo de escurrimiento versus dosis de aditivo obtenidas mediante el cono de Marsh para pastas elaboradas con diferentes cementos y relación agua/cemento constante. A partir de estas curvas se determina la dosis óptima de aditivo para cada cemento. El ensayo se realizó a 5, 30 y 60 minutos.

Los cementos CPN, CPC, CPFa y CPFb presentan una clara definición de la dosis de saturación iguales a 2, 1, 1.6 y 1 % de aditivo, correspondiéndoles tiempos de escurrimiento por el cono de Marsh de 18, 17, 23 y 23 segundos respectivamente. El cemento puzolánico presenta un comportamiento que hace difícil la determinación de una dosis máxima de superfluidificante. Sobre la base de la curva obtenida a 5 minutos y a observaciones visuales de la pasta se estimó un punto de saturación de 2.6 %, sin embargo, si se consideran las medidas a 30 o 60 minutos la demanda sería muy superior. Esto podría relacionarse con problemas de incompatibilidad entre este cemento y el aditivo usado.

Considerando el efecto del tiempo transcurrido luego del mezclado, en la Fig. 4 se presenta para los diferentes cementos la variación de la fluidez en la dosis correspondiente al punto de saturación. Se observa que en los cementos CPN, CPC y CPFb la fluidez se mantiene estable, mientras que el cemento CPFa presenta una leve pérdida de fluidez durante la primera hora. Por su parte, ya fuera de la escala del gráfico, en la Fig. 3 se aprecia que para una dosis de 2.6 % el cemento CPP, a los treinta minutos, ya presenta una pérdida total de fluidez. Es importante destacar que en las pastas se manifestó un marcado comportamiento tixotrópico, modificando su viscosidad al aplicar energía de mezclado.

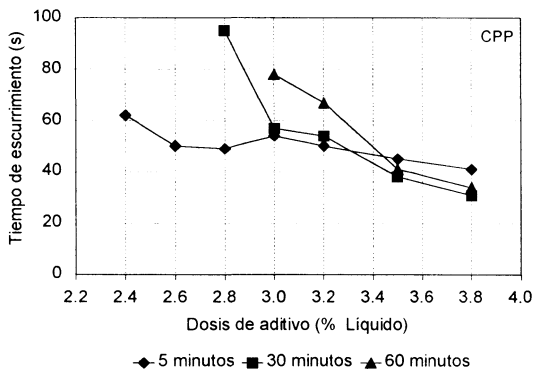
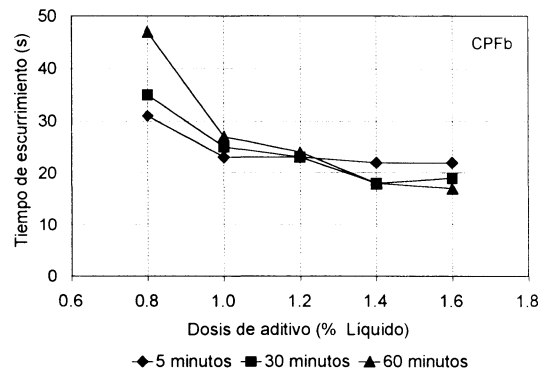
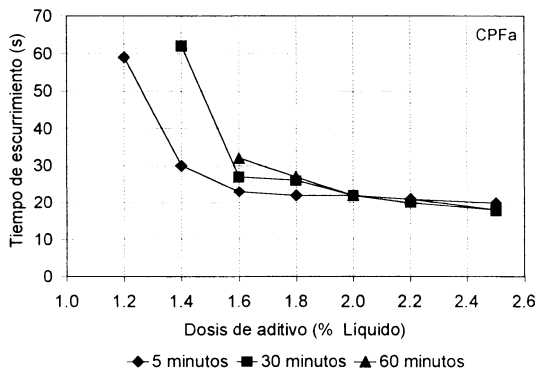
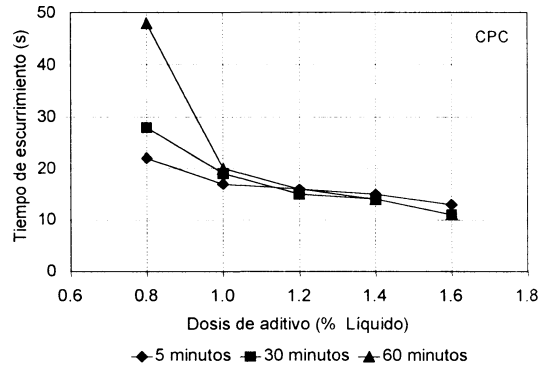
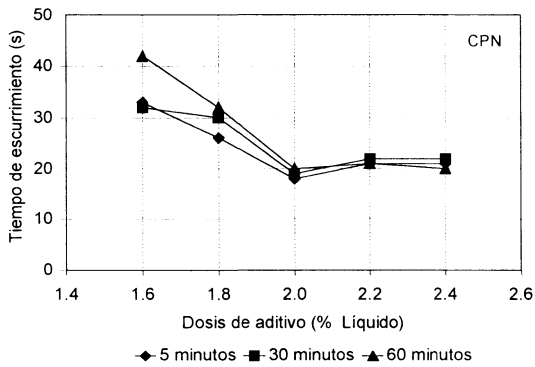
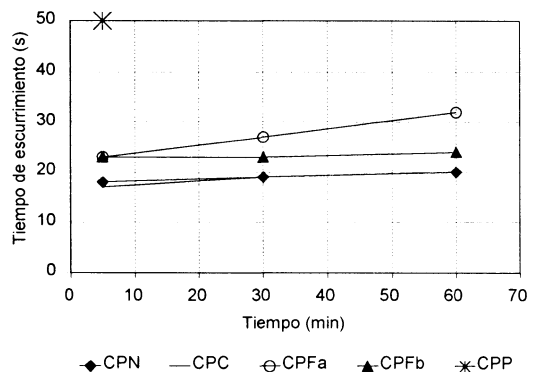


Fig. 3. Curvas tiempo de escurrimiento - dosis de aditivo obtenidas mediante el cono de Marsh en pastas con relación agua / cemento constante, elaboradas con diferentes tipos de cemento.

Fig. 4. Variación de la fluidez durante las primeras horas en pastas elaboradas con distintos cementos y dosis de aditivo correspondiente al punto de saturación.



Morteros

En la Fig. 5, se presentan los resultados de extendido de morteros, realizados a 5, 30 y 60 minutos. Se observa que los cementos CPN, CPC y CPFb presentan un comportamiento que torna relativamente sencilla la determinación de las dosis máximas de aditivo, correspondiéndoles dosis de saturación de 2.2, 1.6 y 1.4 % respectivamente. Para las mismas, los diámetros obtenidos, representativos de la fluidez del mortero, fueron de 250, 265 y 245 mm. En el mortero CPFa no es tan evidente un punto de saturación, se asume como dosis el 2 % de aditivo, al que corresponde un extendido igual a 160 mm. En el mortero con cemento CPP se repite una mayor demanda de aditivo, la dosis de saturación fue de 2.5 % correspondiéndole un diámetro de extendido de 265 mm.

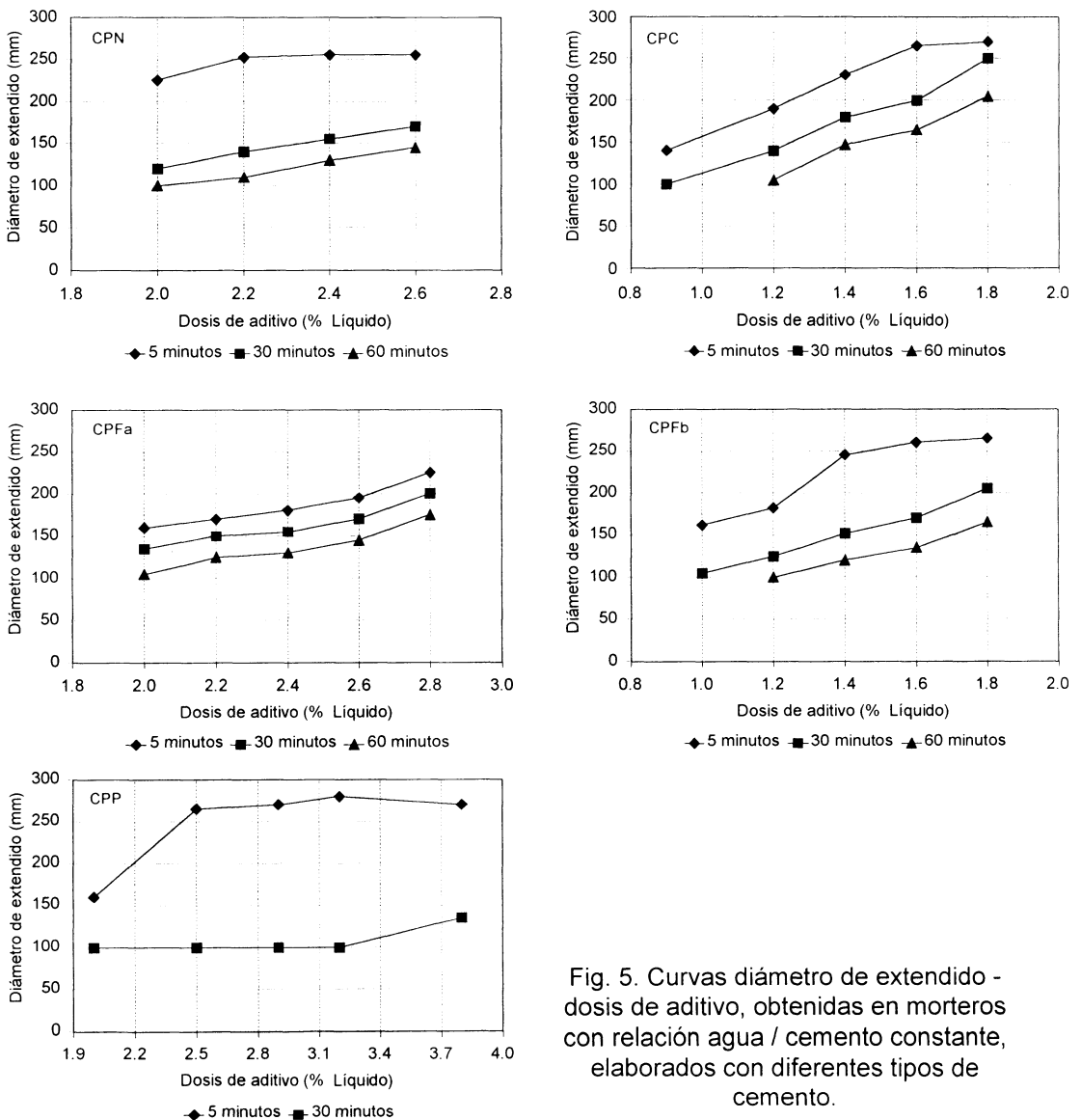


Fig. 5. Curvas diámetro de extendido - dosis de aditivo, obtenidas en morteros con relación agua / cemento constante, elaborados con diferentes tipos de cemento.

Tabla 2. Variación del PUV de los morteros con el contenido de aditivo (% líquido).

| CPN | | CPC | | CPF _a | | CPF _b | | CPP | |
|------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|------------|---------------------------|
| Dosis (%) | PUV (kg/dm ³) | Dosis (%) | PUV (kg/dm ³) | Dosis (%) | PUV (kg/dm ³) | Dosis (%) | PUV (kg/dm ³) | Dosis (%) | PUV (kg/dm ³) |
| <u>2.0</u> | 2.03 | 0.9 | 2.07 | <u>2.0</u> | 1.93 | 1.0 | 2.10 | 2.0 | 2.18 |
| 2.2 | 2.01 | 1.2 | 2.00 | 2.2 | 1.96 | 1.2 | 2.06 | <u>2.5</u> | 2.12 |
| 2.4 | 1.99 | 1.4 | 1.97 | 2.4 | 1.93 | <u>1.4</u> | 2.05 | 2.9 | 2.13 |
| 2.6 | 2.02 | <u>1.6</u> | 1.98 | 2.6 | 1.91 | 1.6 | 2.00 | 3.2 | 2.07 |
| | | 1.8 | 1.97 | 2.8 | 1.91 | 1.8 | 2.09 | 3.8 | 2.11 |

Subrayado: punto de saturación.

Complementariamente se realizaron determinaciones del peso unitario (PUV) 5 minutos después del mezclado. La Tabla 2 muestra para cada cemento la variación del PUV en estado fresco con el contenido de aditivo; se observa que a medida que aumenta la dosis, la densidad tiende a disminuir, lo que implica que aumenta el porcentaje de aire incorporado. Desde el punto de vista físico el efecto debería ser el contrario debido a que una mayor dosis de aditivo, si no produce segregación, debería generar mayor fluidez y capacidad de autocompactación, y por lo tanto una mayor densidad del mortero. Los resultados se representan en la Fig. 6, destacando en cada caso la dosis para el punto de saturación.

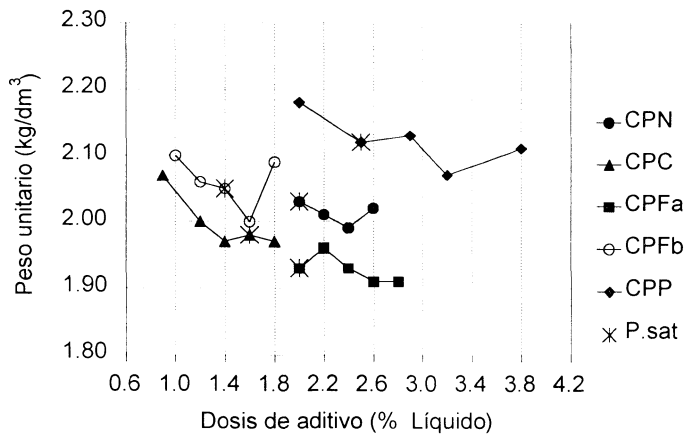


Fig. 6. Variación del PUV del hormigón fresco con el contenido de aditivo.

En la Fig. 7 se presenta para los diferentes cementos, la variación de la fluidez de los morteros durante los minutos posteriores al mezclado, considerando la dosis correspondiente al punto de saturación de cada uno. Se observa que el cemento CPP presenta una fuerte pérdida de fluidez a los 30 minutos, esto refuerza la idea de alguna incompatibilidad entre este cemento y este aditivo. También en los morteros se observó un comportamiento tixotrópico.

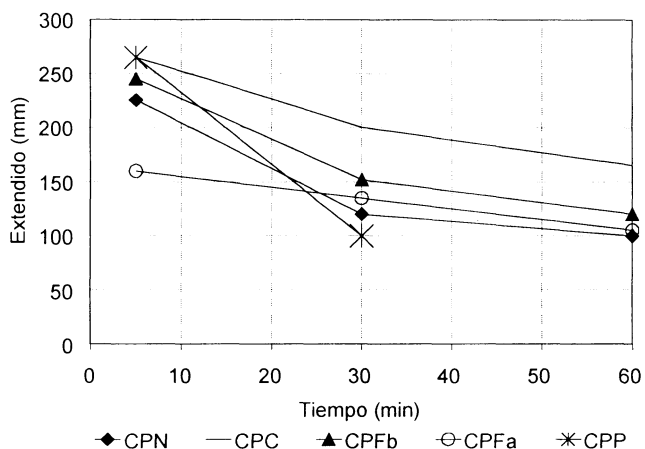


Fig. 7. Variación de la fluidez de morteros elaborados con diferentes cementos, para dosis de aditivo correspondientes al punto de saturación.

DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se resumen las dosis de saturación determinadas en pastas y morteros, junto con los correspondientes tiempos de escurrimiento y diámetros de extendido. A la vez en la Fig. 8 se compara el consumo de aditivo, correspondiente al punto de saturación de pastas y morteros, para cada tipo de cemento.

Es posible observar que el consumo de aditivo correspondiente al punto de saturación, de los cementos CPC, CPFa y CPFb, tanto en pastas como en morteros, es igual o menor al del cemento CPN. La superficie específica de los cementos con adiciones es mayor a la del cemento portland normal, esto demuestra que si bien la finura es uno de los principales factores que afecta la capacidad de retención y fijación del aditivo, existen otros factores, como pueden ser, la composición mineralógica del cemento y la distribución granulométrica de las partículas, que modifican las propiedades reológicas de las mezclas y la demanda de aditivos. Como se observa en la Tabla 3 el cemento CPP presenta un mayor consumo de aditivo y una fluidez baja.

Tabla 3. Dosis de saturación, tiempo de escurrimiento y diámetros de extendido medidos sobre pastas y morteros elaborados con distintos tipos de cemento.

| Cemento | Superficie específica (m ² /kg) | Pastas | | Morteros | |
|---------|--|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| | | Dosis punto de saturación (% líquido) | Tiempo de escurrimiento (s) | Dosis punto de saturación (% líquido) | Diámetro extendido (mm) |
| CPN | 340 | 2.0 | 18 | 2.2 | 250 |
| CPC | 444 | 1.0 | 17 | 1.6 | 265 |
| CPFa | 350 | 1.6 | 23 | 2.0 | 160 |
| CPFb | 415 | 1.0 | 23 | 1.4 | 245 |
| CPP | 402 | 2.6 | 50 | 2.5 | 265 |

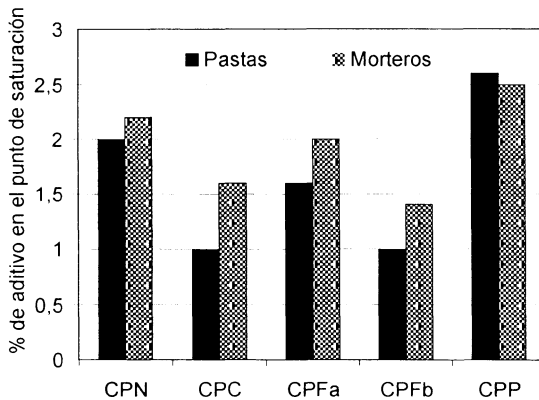


Fig. 8. Demanda de aditivo para el punto de saturación en pastas y morteros.

Es evidente que la fluidez de las pastas será función además del superfluidificante y del tipo de cemento empleados, del contenido de agua, por lo que la dosis de aditivo necesaria para obtener una dada trabajabilidad, depende de la relación agua / cemento. Se ha encontrado (4) que la evaluación de la fluidez de pastas mediante el uso del cono de Marsh es limitada a mezclas con relaciones agua / cemento inferiores a 0.40, para relaciones mayores el método no es sensible a la incorporación de este tipo de aditivos, por lo tanto, mientras el cono de Marsh es directamente aplicable para optimizar pastas en el diseño de hormigones de alta performance, no podría ser aplicado a hormigones convencionales.

En ensayos realizados mediante el cono de Marsh sobre pastas con relación agua / cemento 0.35 elaboradas con diferentes cementos y aditivos (5), se encontraron menores dosis de saturación y tiempos de escurrimiento muy inferiores, para cementos de finura similar y aditivos del mismo tipo a los utilizados en este trabajo. Esto verifica que el método del cono de Marsh, es muy sensible a variaciones de la relación agua / cemento de las pastas. Además se encontró que la finura del cemento utilizado es uno de los principales factores que influye en el consumo de aditivo y en la estabilidad de la fluidez.

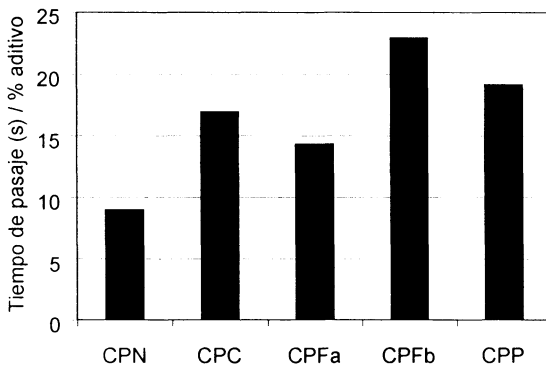


Fig. 9. Relación entre fluidez y % de aditivo para el punto de saturación, en pastas.

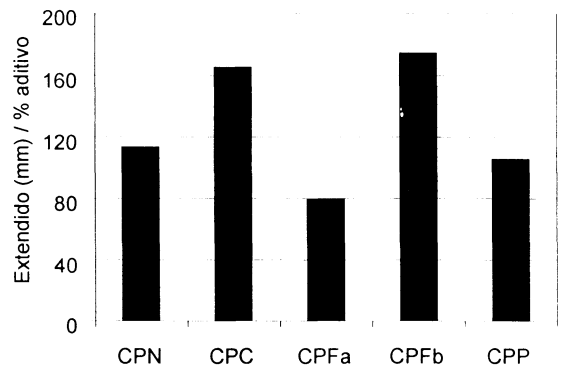


Fig. 10. Relación entre fluidez y % de aditivo para el punto de saturación, en morteros.

En la Fig. 9 se comparan relaciones entre las medidas de fluidez y la dosis de aditivo correspondiente al punto de saturación, para pastas. Se toma como referencia el tiempo de pasaje, por lo cual una menor relación implica mayor movilidad en la pasta. Se observa que las pastas elaboradas con los cementos CPC, CPFa, CPFb y CPP presentan mayor relación tiempo de pasaje - % de aditivo en el punto de saturación. De esta manera los cementos con adiciones presentan un menor consumo de aditivo (a excepción de CPP) pero una fluidez menor que la obtenida con el cemento CPN, poniendo de manifiesto la mayor cohesión de las mezclas, lo que también se apreció visualmente durante su elaboración. La mayor cohesión puede deberse a una mejor distribución y empaquetamiento de las partículas de cemento y adición. Comparando las pastas elaboradas con los cementos CPFa y CPFb se observa que con el mayor contenido de filler calcáreo no se modificó la fluidez en el punto de saturación pero requirió un menor consumo de aditivo.

En la Fig. 10 se comparan relaciones entre las medidas de fluidez y la dosis de aditivo correspondiente al punto de saturación en morteros. Se considera el diámetro de extendido, por lo cual cuanto mayor es la relación mayor será la movilidad para un dado contenido de aditivo. Se observa que los morteros elaborados con los cementos CPFa y CPFb presentan diferencias apreciables tanto en fluidez como en consumo de aditivo, presentando el cemento CPFb mejor comportamiento en estado fresco. Una respuesta similar al CPFb se aprecia en el cemento CPC, nótese que son los cementos de mayor finura. Esto refuerza la idea de una mejor distribución granulométrica de partículas en los cementos con adiciones. Se ha sugerido (6) que la pérdida de fluidez durante la primera hora, es generalmente reflejada por un incremento en la tensión de corte umbral, permaneciendo en la mayoría de los casos, la viscosidad plástica aproximadamente constante. De este modo el ensayo de extendido de morteros estaría más relacionado con la tensión de corte umbral. El fenómeno de tixotropía que presentan pastas y morteros se puede deber a una estructura inestable en el material, la cual puede ser rota al aplicar energía de mezclado (6). Al comparar pastas y morteros, se ha observado una mayor susceptibilidad en el ensayo de extendido ante la pérdida de fluidez en el tiempo (Fig. 4 y 7).

La optimización de pastas y morteros aparece como una etapa muy importante en el diseño de hormigones de alta performance. Los estudios de fluidez sobre pastas y morteros permiten abordar en forma racional la selección de materiales y el diseño de mezclas en el hormigón. Cabe indicar que las medidas del cono de Marsh en pastas y del extendido en morteros resultaron coherentes en cuanto a la demanda de aditivo para los distintos tipos de cemento estudiados, pero se diferenciaron en cuanto a su capacidad de valorar aspectos como la fluidez inicial de las mezclas o su susceptibilidad para detectar las variaciones de movilidad a lo largo del tiempo. En este sentido el uso en forma conjunta de ambos métodos resulta complementario y conveniente. En una etapa posterior, los datos obtenidos sobre pastas y morteros serán de interés para analizar el comportamiento en estado fresco de hormigones y considerar el efecto de los cementos, adiciones y aditivos sobre los parámetros reológicos como la tensión de corte umbral y la viscosidad plástica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron experiencias relacionadas con la aplicación del Cono de Marsh en pastas y del ensayo de Extendido en morteros para el estudio de la influencia del tipo de cemento sobre la fluidez de mezclas con aditivo superfluidificante, características de Hormigones de Alta Performance. Se incluyeron un cemento portland normal (CPN), un

cemento compuesto (CPC), dos cementos fillerizados (CPF_a y CPF_b) y un cemento puzolánico (CPP). Las principales conclusiones se indican a continuación:

Los métodos utilizados, tanto en pastas como en morteros, permiten definir un punto de saturación para cada tipo de cemento. De esta forma se puede establecer un valor máximo en la dosis de superfluidificante, estimando que superado el punto de saturación no aparecen mejoras de fluidez y aumenta el riesgo de segregación y de demoras en el tiempo de fraguado.

Para cada tipo de cemento las dosis de saturación determinadas en pastas y morteros resultaron bastante similares. Aunque existe una ligera tendencia a crecer en los morteros, se destaca que la demanda de aditivo para los distintos cementos siguió un mismo ordenamiento en ambos casos.

La demanda de aditivo en los cementos con adiciones fue inferior a la del cemento CPN, a excepción del cemento CPP que en todos los casos mostró una elevada dosis de superfluidificante y la mayor pérdida de fluidez luego del mezclado. Al mismo tiempo la fluidez de las pastas elaboradas con los cementos con adiciones fue levemente menor a la del cemento CPN, evidenciando una mayor cohesión en estado fresco.

Los morteros elaborados con los cementos CPC y CPF_b mostraron un mejor comportamiento en estado fresco, verificado en base a una elevada fluidez, mayor cohesión y menor consumo de aditivo que el CPN.

La superficie específica del cemento constituye una variable muy importante que afecta la capacidad de retención y fijación del aditivo, pero también existen otras variables como la composición mineralógica del cemento y la distribución granulométrica de las partículas modifican las propiedades reológicas de las mezclas. Esto se evidencia a partir de las menores dosis de aditivo que le corresponden a los cementos con adiciones, que al mismo tiempo son los que presentan mayor superficie específica.

REFERENCIAS

- (1) Kazuhiro Yoshioka, Ei-ichi Tazawa, Kenji Kawai, Tomoyuki Enohata, "Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals", *Cement and Concrete Research*, 2002, Vol. 32, pp. 1507–1513.
- (2) Chandra, S. and Bjornstrom J. "Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars – Part I", *Cement and Concrete Research*, 2002, Vol. 32, pp. 1605–1611.
- (3) Chandra, S. and Bjornstrom J. "Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the slump loss of portland cement mortars – Part II", *Cement and Concrete Research*, 2002, Vol. 32, pp. 1613–1619.
- (4) Agulló, L., Torrales–Carbonari, B., Gettu R. and Aguado, A. "Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer – A study based on the Marsh cone test", *Material and Structures*, 1999, Vol. 32, pp. 479–485.
- (5) Giaccio, G. and Zerbino, R. "Optimum superplasticizer dosage for systems with different cementitious materials", *The Indian Concrete Journal*, 2002, Vol. 76, N° 9, pp. 553–557.
- (6) Chong Hu and de Larrard, F. "The rheology of fresh high – performance concrete", *Cement and Concrete Research*, 1996, Vol. 26, pp. 283–294.