

CEMENTO PORTLAND CON FILLER CALCÁREO PROPIEDADES Y RECOMENDACIONES DE USO

Ing. Edgardo Becker
Líder de Asesoría Técnica
LOMA NEGRA C.I.A.S.A.

INTRODUCCIÓN

Existen varias razones para que los fabricantes de cemento y productores de hormigón de todo el mundo desarrollen el uso de adiciones minerales en el cemento u hormigón entre las cuales podemos mencionar: cuestiones ecológicas (utilización de subproductos de otras industrias o procesos, menor generación de CO₂, etc.), aumento de la capacidad instalada de las cementeras, eventual reducción de costos y cierta flexibilidad para la obtención de cementos u hormigones de mejor comportamiento y/o propiedades especiales sin demasiados esfuerzos de producción ^[1].

En los últimos años, en los países más industrializados surge cierta preocupación respecto de las emisiones de CO₂. La fabricación de clinker portland – componente principal del cemento portland – implica una transformación química de materias primas en un horno a elevadas temperaturas. Este proceso genera importantes cantidades de CO₂ que, si bien en Argentina actualmente no resultan preocupantes debido a que no existe un número elevado de fábricas de cemento (15) en un territorio de 2.791.810 km², en otros países de Europa donde la concentración de plantas cementeras presenta una densidad 4 a 10 veces superior la preocupación es mayor. Es por este motivo que la industria de cemento europea lideró la investigación y el desarrollo de los cementos con adiciones minerales y resulta una buena referencia para establecer cuál será el futuro cercano de la industria del cemento y el hormigón en Argentina y el resto de Latinoamérica.

En general, las adiciones minerales pueden clasificarse como ^[1]:

- 1) Adiciones minerales **activas**. Son aquellos minerales naturales o artificiales que presentan la capacidad de formar productos de hidratación SCH (silicatos de calcio hidratado) similares a los formados durante la hidratación del cemento portland “puro”. Entre estas adiciones podemos mencionar la escoria granulada de alto horno, puzolanas naturales, humos de sílice (*silica fume* o microsilíce), cenizas volantes (*fly ash*) y arcillas activadas entre otras.
- 2) Adiciones minerales **inactivas**. Son minerales que no forman productos de hidratación SCH aunque su utilización suele tener efectos benéficos sobre las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido. Dentro de este tipo de adición mineral se encuentra el “filler calcáreo” de utilización masiva desde hace algunos años en Europa (sobre todo Italia y Francia) y cada vez más habitual en la República Argentina.

DEFINICIÓN Y NORMATIVA ARGENTINA

De acuerdo a la definición de la norma IRAM 1592^[11] (Instituto Argentino de Normalización), el cemento portland con “filler” calcáreo es un “conglomerado hidráulico que se obtiene por la molienda conjunta, en planta de cemento, de clinker portland y material calcáreo, con la adición de pequeñas cantidades de sulfato de calcio. El contenido de material calcáreo no será mayor de 20 g / 100 g”.

El material calcáreo utilizado en la fabricación de este tipo de cemento deberá cumplir los requerimientos de la norma IRAM 1593^[12] que define al “filler” calcáreo como un “material de naturaleza inorgánica y origen mineral carbonatado, compuesto principalmente por carbonato de calcio,



que molido conjuntamente con el clinker de cemento portland, en proporciones determinadas, incide favorablemente en las propiedades y el comportamiento de morteros y hormigones, tanto en estado fresco como endurecido”. Dentro de estos requerimientos, los más importantes son: (1) contenido de CaCO_3 (carbonato de calcio) deberá ser mayor al 75 % en masa y (2) limita el contenido de arcilla a valores inferiores a 1,2 % en masa; es decir, trata de especificar la utilización de una caliza de bastante “alto tenor” (alto contenido de CaCO_3) y pureza.

A partir del 1° de noviembre de 2000, el cemento portland con “filler” calcáreo está normalizado en la República Argentina bajo la norma IRAM 50000^[9] que estipula la composición, características, evaluación y condiciones de recepción de los cementos para uso general y se identifica con las siglas CPF. Adicionalmente esta norma categoriza a los cementos de acuerdo a los niveles de resistencia que alcanzan de acuerdo a la siguiente tabla:

Categoría de Cemento	Resistencia a Compresión				Método de Ensayo
	2 días	7 días	28 días		
CP 30	-	$\geq 16 \text{ MPa}$	$\geq 30 \text{ MPa}$	$\leq 50 \text{ MPa}$	IRAM 1622
CP 40	$\geq 10 \text{ MPa}$	-	$\geq 40 \text{ MPa}$	$\leq 60 \text{ MPa}$	
CP 50	$\geq 20 \text{ MPa}$	-	$\geq 50 \text{ MPa}$	-	

De esta forma los cementos de uso general se identifican del siguiente modo:

- a) Tres letras que indican el tipo de cemento, referido a su composición;
- b) Dos dígitos que indican la categoría de resistencia a la que pertenece el cemento (30, 40 ó 50).

Por ejemplo: CPF40, es un cemento portland con “filler” calcáreo, categoría CP40.

PROPIEDADES

Como es obvio - además de las características y calidad del clinker - las propiedades reológicas de la pasta, el mortero y el hormigón dependen de la calidad del “filler” calcáreo utilizado, su finura y distribución de partículas y de la cantidad de sulfato de calcio (yeso en estado natural) adicionado durante la molienda.

La demanda de agua de las mezclas elaboradas con CPF (cemento portland con “filler” calcáreo) depende de las características del clinker utilizado en la fabricación del cemento y de la finura del material calcáreo. En la figura N° 1 se muestra la influencia del contenido de alúmina (óxido de aluminio) del material calcáreo en la demanda de agua del hormigón. El contenido de alúmina representa el contenido de arcilla del “filler” calcáreo.

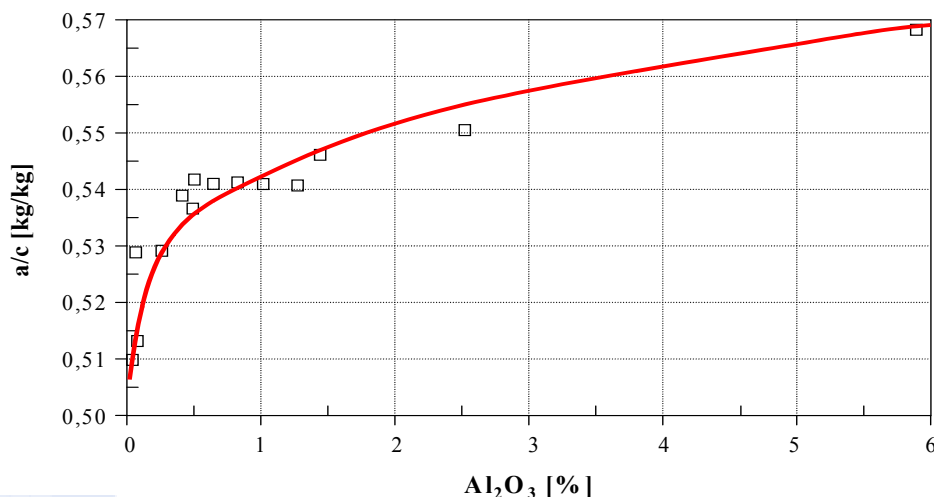


Figura N° 1: demanda de agua (expresado como relación a/c) en función del porcentaje de alúmina (representando el contenido de arcilla del material calcáreo) para un homigones de asentamiento constante utilizando un reemplazo del 18 % de “filler” calcáreo (similar al CPF normalizado en Argentina por la norma IRAM).

Fuente: G. Cochet and F. Sorrentino. *Limestone Filled Cements: Properties an Uses. Progress in Cement and Concrete.*

Analizando el gráfico, resulta evidente que la demanda de agua del hormigón puede mantenerse en valores bajos cuando el material calcáreo es de “alto tenor” y, en forma inversa, la utilización de material calcáreo con un alto contenido de arcilla incrementa fuertemente la demanda de agua y reduce los efectos beneficiosos de la caliza.

Por este motivo, resulta importante que el fabricante de cemento portland utilice en la fabricación del CPF una materia prima de buena calidad y mantenga un riguroso control de calidad de manera de asegurar un adecuado comportamiento del CPF en morteros y hormigones.

Mecanismo de Hidratación del CPF

Tal como se indicó anteriormente, el material calcáreo no tiene la capacidad de generar productos de hidratación de la clase SCH. No obstante, la experiencia indica que la incorporación de determinadas cantidades de material calcáreo finamente molido (“filler” calcáreo) en reemplazo parcial de clinker en la fabricación de cemento portland presenta efectos beneficiosos en morteros y hormigones tanto en estado fresco como endurecido. En la figura N° 2 se muestra un mortero normal (a/c= 0,50) elaborado con CPF presenta una mayor resistencia mecánica a edades tempranas que otros cementos elaborados a partir del mismo clinker utilizando la misma dosificación.

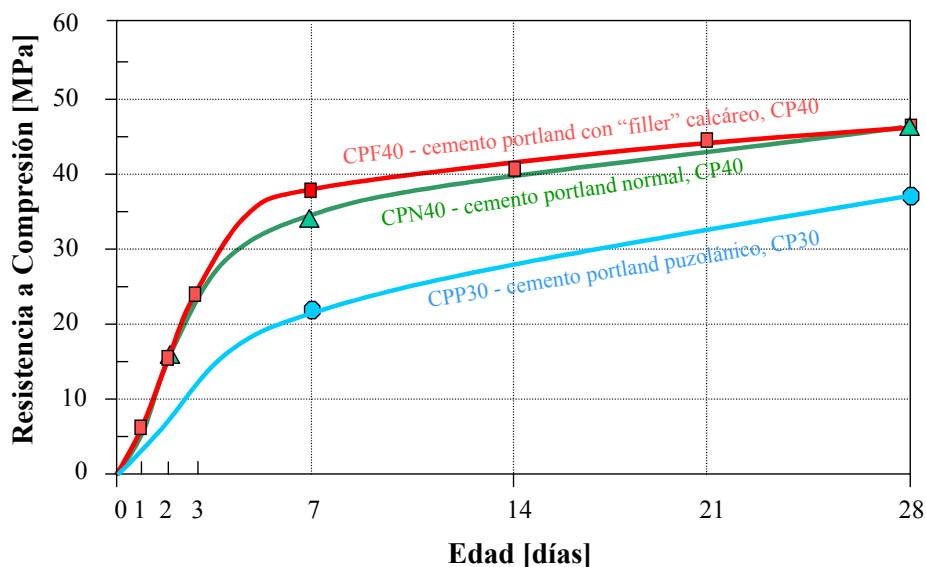


Figura N° 2: evolución de resistencia de morteros normalizados (a/c = 0,50) elaborados con distintos tipos de cemento curados en condiciones normalizadas (temperatura 20°C y HR > 95 %).

Fuente: Laboratorio de Control de Calidad de Fca. Zapala (LOMA NEGRA CIASA).

Luego de varios años de investigación, la influencia del “filler” calcáreo en las propiedades mecánicas del cemento resulta bastante conocida. Algunos autores intentaron explicar sus efectos y no siempre las

investigaciones presentan resultados convergentes. No obstante la mayoría de ellos coinciden en las siguientes hipótesis ^[2]: (1) el efecto “filler” generado a partir de la incorporación de partículas suficientemente finas, (2) el incremento de la velocidad de hidratación del clinker, (3) la formación de carbonatoaluminato y (4) la modificación de la microestructura.

- 1) **Efecto “filler”**. Este fenómeno es el más conocido y tiene que ver fundamentalmente por la capacidad de las partículas finas en “llenar” (*to fill* en inglés) u ocupar los espacios disponibles; es decir, las partículas de “filler” calcáreo son sumamente finas (en general, el filler representa la mayor parte de las partículas más finas del CPF), mejorando la distribución de partículas del cemento y, consecuentemente, mejoran la compacidad de la pasta lográndose una mejor resistencia temprana del mortero u hormigón a partir de una mejor ocupación de espacios.
- 2) **Velocidad de hidratación**. Los principales componentes del clinker portland son el C_3S (silicato tricálcico), C_2S (silicato dicálcico), C_3A (aluminato tricálcico) y FAC_4 (ferroaluminato tetra-cálcico). Dentro de estos componentes, los silicatos (C_3S y C_2S) son los responsables de la formación de los compuestos SCH (silicatos de calcio hidratados) o gel de tobermorita durante la hidratación y principales responsables del desarrollo de resistencia. Mientras la hidratación del C_3S es la responsable del desarrollo de resistencia temprana hasta los 28 días, el C_2S comienza a desarrollar resistencia a partir de los 7 días y resulta el responsable de la evolución de resistencia final de la pasta cementicia como lo muestra la figura N° 3.

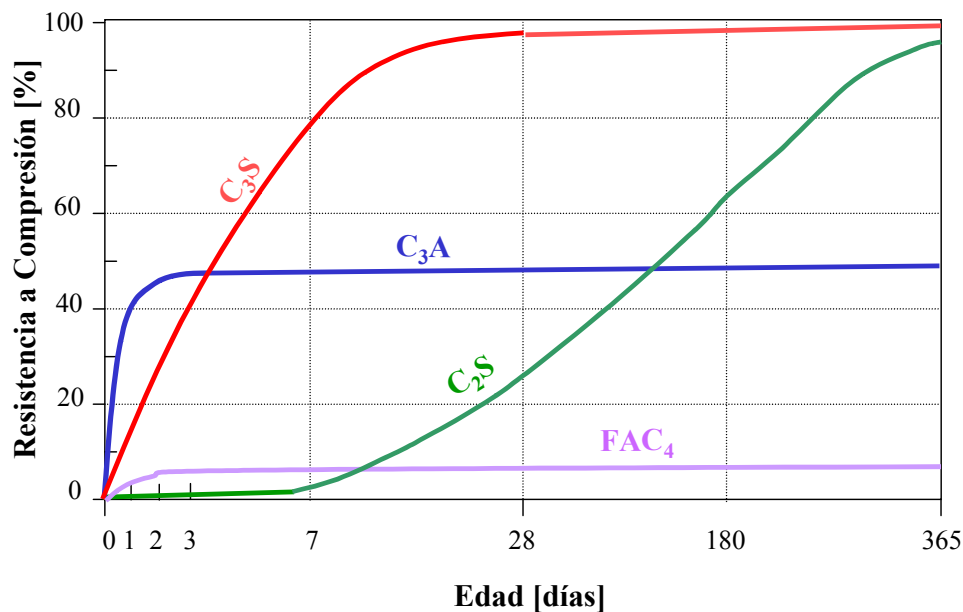


Figura N° 3: Influencia de cada compuesto del clinker portland en la evolución de resistencia mecánica de la pasta cementicia.

Fuente: A. N. Castiarena. *Curso de Tecnología del hormigón*. 3ª Edición.

La adición de $CaCO_3$ (carbonato de calcio) acelera la hidratación del C_3S , sobre todo a tempranas edades contribuyendo al desarrollo de la resistencia temprana. Esta aceleración puede atribuirse a un efecto de modificación de la hidratación superficial del C_3S y al efecto de nucleación ^{[3][4]}.

- 3) **Formación de monocarbonatoaluminato**. Durante el proceso de hidratación el C_3A del clinker reacciona con el $CaCO_3$ para formar carbonatoaluminato de calcio cuya estructura y propiedades



presentan analogías con los sulfatos equivalentes: mono y trisulfoaluminatos de calcio. Algunos autores consideran que esta formación contribuye a mejorar la resistencia de los hormigones y la resistencia a los sulfatos en función del contenido de C_3A del clinker y el contenido y finura del material calcáreo; esta posible mejoría de resistencia mecánica, en general, resulta marginal respecto de los efectos antes explicados. No obstante, la durabilidad puede verse afectada considerablemente con reemplazos de “filler” superiores al 10 % cuando se elaboran hormigones expuestos a sulfatos^[5].

- 4) **Modificación de la microestructura.** Estudios demuestran ^{[6][7]} que con la utilización de CPF se aumenta el grado de hidratación de la pasta de cemento y se modifica la relación C/S de los compuestos SCH. Cuando se utiliza una elevada cantidad de material calcáreo, el hidróxido de calcio cristaliza en cristales largos que se concentran en algunas zonas formando un puente entre los granos de material calcáreo logrando una estructura compacta.

DURABILIDAD

La durabilidad de los morteros y hormigones depende fundamentalmente de la porosidad de la pasta (distribución del tamaño y estructura de poros). Según algunos estudios^[2] para cementos de similares niveles de resistencia se obtienen cantidades similares de productos de hidratación. Consecuentemente, resultaría adecuado pensar que se obtienen hidratos de similar densidad, porosidad y su distribución es la misma, con lo cual si la distribución de las partículas de aire se encuentra bien controlada, la durabilidad no se vería afectada.

Sin embargo, resulta bastante conocido que la porosidad de la pasta de cemento es mayor cuando aumenta el reemplazo de clinker por material calcáreo debido a una menor formación de compuestos SCH. No obstante existen factores que pueden modificar esta regla general que tienen que ver con la calidad del “filler” utilizado (por ejemplo: recordar el tema de la demanda de agua) y las características del clinker.

Contracción del Hormigón

Si bien la contracción de los morteros y hormigones depende fundamentalmente del contenido de agua de la mezcla, los hormigones elaborados con CPF suelen presentar una contracción un tanto superior a la producida con CPN (cemento portland normal) durante las primeras 24 hs, aunque luego de este período no se encuentran diferencias^[2]. No obstante, esta tendencia puede diferir con distintos cementos (aún dentro de los CPF) en función del requerimiento de agua de la mezcla y otros parámetros, por lo cual si esta propiedad resulta importante para el tipo de obra a ejecutar, se recomienda realizar pruebas y ensayos de manera de establecer el comportamiento de la mezcla.

Propagación de Fisuras

Generalmente los CPF presentan una mayor finura que los CPN. Esto resulta muy beneficioso para la retención de agua de la mezcla debido a una menor velocidad de exudación y, consecuentemente, tiende a mejorar la resistencia superficial del hormigón; no obstante, los cementos más finos tienden a aumentar el riesgo de fisuración por retracción plástica. De cualquier manera utilizando adecuadamente las prácticas de protección y curado convencionales este riesgo se minimiza.

Otro importante riesgo de fisuración, se genera cuando se hormigonan elementos masivos. En estos casos se recomienda la utilización de cementos que generen la menor cantidad posible de calor durante su hidratación.



Si bien varios estudios demuestran que la adición de “filler” calcáreo disminuye la generación de calor durante la hidratación, generalmente el CPF es más fino que el CPN de similar nivel de resistencia por lo cual es de esperar que esa mayor finura compense el efecto del “filler” y, consecuentemente, se obtengan similares niveles de calor de hidratación para ambos tipos de cemento. También existe la posibilidad que algunos CPF generen un mayor calor de hidratación que ciertos CPN debido no sólo a la mayor finura sino a una mayor velocidad de hidratación ^[14].

Carbonatación

El hormigón es un material altamente alcalino (aproximadamente $\text{pH} = 13$), esto resulta fundamental en la protección de las armaduras ya que el alto pH impide la corrosión de las mismas. Esta alta alcalinidad se produce a partir de la formación de $(\text{OH})_2\text{Ca}$ (hidróxido de calcio) como subproducto de la hidratación del clinker portland. Si el $(\text{OH})_2\text{Ca}$ entra en contacto con el CO_2 del aire se forma CaCO_3 que resulta un material menos alcalino. De esta manera puede afirmarse que la durabilidad de las estructuras se encuentra fuertemente condicionada por la velocidad de carbonatación del hormigón.

El espesor de carbonatación y su velocidad de propagación hacia el interior dependen fundamentalmente de la humedad ambiente y la porosidad de la pasta. Aquí los diferentes autores presentan opiniones divergentes acerca de este tema: mientras algunos trabajos concluyen que la porosidad de la pasta de los hormigones elaborados con CPF es mayor a los de CPN, otros concluyen que es similar y no observan influencia de la composición del cemento. No obstante, solamente la utilización de una baja relación a/c permite obtener una estructura de poros que le confiera una adecuada durabilidad del hormigón.

Difusión de iones cloruro

La penetración de cloruros en el hormigón depende de la capacidad del cemento portland en fijar los iones cloruro, la resistencia del hormigón y de su permeabilidad. En la figura N°4 se muestra la influencia de la porosidad de la pasta de cemento en el coeficiente de difusión de cloruros para distintos cementos. De acuerdo a este gráfico, queda claro que la difusión de iones cloruro esencialmente depende de la porosidad de la pasta de cemento y no necesariamente del contenido y/o calidad de “filler” del CPF. Sin embargo, la adición de “filler” tiende a incrementar el coeficiente de difusión de cloruros a temperaturas similares. Esto significa que algunos fabricantes desarrollan un clinker especial para ser utilizado en CPF por lo cual no resulta posible sacar conclusiones antes de realizar los ensayos correspondientes.

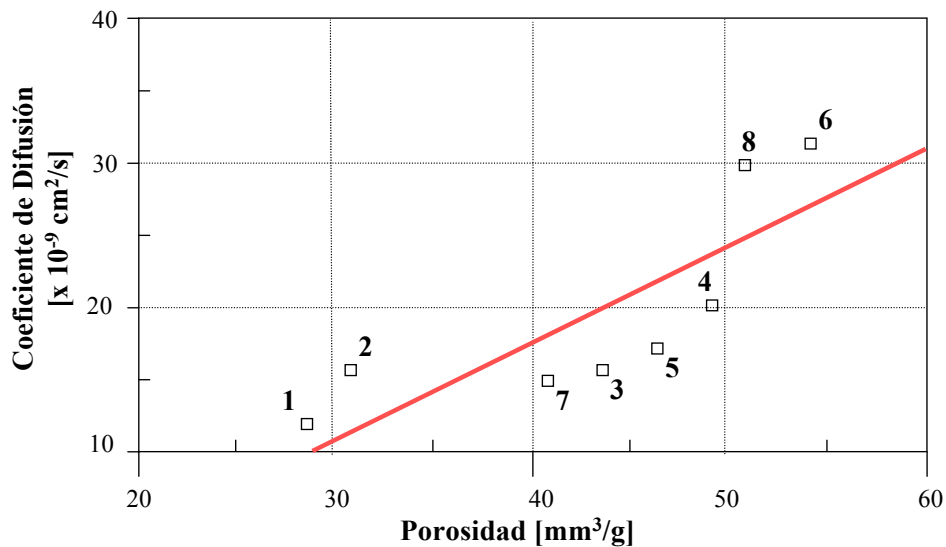


Figura N° 4: Relación entre la porosidad de la pasta de cemento y el coeficiente de difusión de cloruros. Los cementos 1 a 4 no contienen ninguna adición (cementos “puros”), los cementos 5 y 6 contienen 15 % y 27 % de “filler” calcáreo respectivamente y los cementos 7 y 8 contienen 12 % y 20 % de microsílíce respectivamente.

Fuente: G. Cochet and F. Sorrentino. *Limestone Filled Cements: Properties an Uses. Progress in Cement and Concrete.*

No obstante una buena aproximación puede obtenerse a partir de conocer que existe una cierta relación inversa entre la resistencia mecánica y la porosidad; es decir, a menor porosidad hay mayor resistencia, entonces a mayor resistencia menor coeficiente de difusión de cloruros.

Resistencia al agua de mar

La resistencia del hormigón ante la agresión que supone su exposición al agua de mar depende esencialmente del contenido de C_3A del clinker. La adición de “filler” tiende a disminuir la resistencia del hormigón al agua de mar. Por este motivo no se recomienda la utilización de CPF que presente contenidos de “filler” superiores al 10 % en masa para hormigones que estarán sometidos a ambiente marino.

Resistencia a los sulfatos

Similarmente al caso anterior, en presencia de sulfatos resulta fundamental la utilización de un cemento que presente un bajo contenido de C_3A (en general, $C_3A \leq 8 \%$ para ataque moderado y $C_3A \leq 4 \%$ para ataque fuerte). Es bien conocido que los iones sulfato reaccionan con los carbonatoaluminatos de calcio o los sulfoaluminatos formando ettringita. El carbonato de calcio reacciona con monosulfoaluminato formando monocarbonoaluminato. Consecuentemente, al formarse antes, los iones carbonato no reaccionan con la ettringita. De acuerdo a este razonamiento, es esperable un mejor desempeño al ataque de sulfatos de aquellos CPF producidos a partir de clinker con alto C_3A ; es decir, aquellos cementos que naturalmente tendrían un pobre desempeño ante este ataque.

En los últimos años, se encontró que hormigones elaborados a partir de piedra caliza o con ciertos contenidos de $CaCO_3$ pueden formar taumasita cuando están expuestos a altos niveles de humedad,



contacto con sulfatos y bajas temperaturas. Esta formación cuya fórmula química es: $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ ^[13], puede generarse rápidamente si el hormigón está expuesto consistentemente a temperaturas inferiores a 4°C y es más lenta cuando mayor es la temperatura de exposición hasta que no se forma luego de los 15°C. Esto indica que no resulta recomendable la utilización de CPF en la elaboración de hormigones que serán utilizados en bases y fundaciones superficiales además de otras estructuras en presencia de sulfatos y clima frío.

Resistencia a ciclos de congelación y deshielo

Los estudios muestran que, a igual relación a/c, la resistencia del hormigón a ciclos de congelación y deshielo solamente se vería afectada cuando la adición de “filler” calcáreo supera el 15 %. Reemplazos inferiores de “filler” calcáreo en la fabricación de CPF resultan beneficiosos cuando disminuye el factor de espaciado de las burbujas de aire incorporado utilizadas en los hormigones que serán sometidos a esta severa condición^[2]. Si no se utiliza aire incorporado en la mezcla, el hormigón elaborado con CPF mostrará un menor desempeño que hormigones de similar relación a/c elaborados a partir de otros tipos de cemento^[14]. No obstante, puede afirmarse que en climas fríos siempre resulta altamente recomendable (e imprescindible) la utilización de aire intencionalmente incorporado en el hormigón, por lo cual no se debe esperar importantes diferencias de comportamiento de los diferentes cementos cuando el diseño de la mezcla de hormigón es adecuado.

CONCLUSIONES

Como regla general, se puede afirmar que el CPF puede utilizarse en todas aquellas aplicaciones donde resulta factible utilizar CPN o cualquier otro cemento de uso general que no posea requisitos especiales (IRAM 50000); es decir, en obras o elementos estructurales donde el hormigón no estará sometido a ambientes especialmente agresivos.

Cuando se requieran propiedades especiales del hormigón por cuestiones de durabilidad debido a que será sometido a un ambiente agresivo se deberá especificar – además de una baja relación a/c del hormigón – la utilización de cementos de propiedades especiales^[10] (IRAM 50001) donde se especificará cuál sería el más adecuado en cada caso (ARS, MRS, BCH o RRAA).

La utilización de CPF implica la obtención de hormigones que en estado fresco presentan muy buena trabajabilidad, plasticidad, bombeabilidad y terminación superficial a partir de los finos aportados por el “filler” calcáreo. En estado endurecido, las mezclas presentan mayor resistencia inicial. Todos estos beneficios hacen del CPF un producto adecuado para ser utilizado en la fabricación de elementos premoldeados y hormigón elaborado, sin olvidar las ventajas que se obtienen a partir de su utilización en trabajos de albañilería.

REFERENCIAS

- [1] E. Becker, (2000) Cemento Portland – Características y Recomendaciones de Uso. LOMA NEGRA CIASA
- [2] G. Cochet and F. Sorrentino, (1995). Limestone Filled Cements: Properties and Uses. Progress in Cement and Concrete, pp. 265 – 295
- [3] P. Lu and S. Lu, (1985). Hydration of Carbo-aluminis Cement at Different Temperatures. Cem. Concr. Res. 15, pp. 622 – 630

- [4] R. Ramachachan and Z. Chun-Mei, (1986). Influence of CaCO_3 on Hydration and Microstructural Characteristica of Tricalciun Silicate, II Cem. 83, # 3, pp. 129 – 152
- [5] M. González, V. Rahhal, E. F. Irassar y H. Donza, (1998). Resistencia a los Sulfatos de Cementos ARS con Adición de Filler y Puzolana. 1^{er} Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires.
- [6] M. Regourd, (1987). Microstructure of Blended Cements Containing Fly Ash, Silica Fume, Slag and Fillers, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 85
- [7] J. Jambir, (1980). Influence of CaO , Al_2O_3 , CaCO_3 , $n\text{H}_2\text{O}$ on the Structure of Cement Paste. Proc. 7th Int. Congr. Chem. Cem., Paris, 4: 487 – 492
- [8] A. N. Castiarena, (1993) Curso de Tecnología del Hormigón. 3^{era} Edición.
- [9] Proyecto 1 de norma IRAM 50000, (2000) Cemento para Uso General – Composición, Características, Evaluación de Conformidad y Condiciones de Recepción
- [10] Proyecto de norma IRAM 50001, (2000) Cementos con Propiedades Especiales
- [11] Norma IRAM 1592, (1994). Cemento Portland con “Filler” Calcáreo
- [12] Norma IRAM 1593, (1994). Material Calcáreo para Cemento Portland con “Filler” Calcáreo
- [13] Thaumasite Expert Group, (1999). The Thaumasite Form of Sulfate Attack: Risks, Diagnosis, Remedial Works and Guiance on New Construction
- [14] Graeme K. Moir and Steven Kelham, (1997). Developments in the Manufacture and Use of Portland Limestone Cement, SP 172-42. ACI International Conference: High-Performance Concrete.
- [15] G. Menéndez, V. Bonavetti, E. F. Irassar, (2000). Hormigones Elaborados con Cemento con Adiciones. Congreso de la Ingeniería 2000, Buenos Aires.