CEMENTO PORTLAND

CARACTERÍSTICAS Y RECOMENDACIONES DE USO

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

CEMENTOS NORMALIZADOS EN ARGENTINA

En nuestro país se fabrican y comercializan los siguientes tipos de cementos portland normalizados bajo normas IRAM:

- Cemento portland normal
- Cemento portland con "filler" calcáreo
- Cemento portland compuesto
- Cemento portland con escoria
- Cemento de alto horno
- Cemento portland puzolánico
- Cemento portland de alta resistencia inicial
- Cemento portland moderadamente resistente a los sulfatos
- Cemento portland altamente resistente a los sulfatos
- Cemento portland de bajo calor de hidratación
- Cemento portland resistente a la reacción álcali – agregado
- Cemento portland blanco

SELECCIÓN DEL TIPO DE CEMENTO

Los cementos enumerados anteriormente pueden clasificarse, entre otras formas, por:

1. Uso (cementos de uso general o con propiedades especiales)
2. Composición (cementos con adiciones o sin adiciones)
3. Nivel de resistencia (categorías CP30, CP40 o CP50)

1.- Clasificación por Uso

1.1.- Cementos de Uso General

Son aquellos cementos utilizados en la elaboración de hormigones que serán colocados en elementos estructurales simples o armados donde **no se requieran propiedades especiales** del cemento debido a cuestiones de durabilidad (riesgo de ataque por sulfatos, utilización de agregados categorizados como potencialmente reactivos en elementos con posibilidades de estar sometidos a condiciones de humedad y temperatura en forma permanente o semipermanente, riesgo de fisuración en elementos masivos por efectos térmicos, etc.), resistencia temprana del hormigón o importancia del color en elementos estructurales y/u ornamentales, entre otros.

En Argentina, los cementos de uso general deben cumplir los requerimientos de la norma IRAM 50.000 que especifica los siguientes materiales:

- CPN - Cemento portland normal
- CPF - Cemento portland con "filler" calcáreo

- CPE - Cemento portland con escoria
- CPC - Cemento portland compuesto
- CPP - Cemento portland puzolánico
- CAH - Cemento de alto horno

En la Tabla I, puede observarse que cada tipo de cemento, pude reconocerse por 3 letras que brindan al usuario cierta información acerca de la composición con la cual se elabora.

Tipo de Cemento	Nomenclatura	Composición [g / 100 g]			
		Clinker + sulfato de calcio	Puzolana (P)	Escoria (E)	"Filler" calcáreo (F)
Cemento portland normal	**CPN**	**100 - 90**		**0 - 10**	
Cemento portland con "filler" calcáreo	**CPF**	**99 - 80**			**1 - 20**
Cemento portland con escoria	**CPE**	**89 - 65**		**11 - 35**	
Cemento portland compuesto	**CPC**	**98 - 65**	**2 ó más, con P + E + F ≤ 35**		
Cemento portland puzolánico	**CPP**	**85 - 50**	**15 - 50**		
Cemento de alto horno	**CAH**	**65 - 25**		**35 - 75**	

Tabla I: Tipos de cemento y composición

1.2.- Cementos con Propiedades Especiales

Cuando se requieren propiedades especiales en el hormigón, adicionalmente a los requisitos de los cementos de uso general se especifican otros requerimientos en función de las propiedades especiales buscadas en el producto. Estos requisitos están especificados en la norma IRAM 50.001:

- ARI - de alta resistencia inicial
- MRS - moderadamente resistente a los sulfatos
- ARS - altamente resistente a los sulfatos
- BCH - de bajo calor de hidratación (BCH)
- RRAA - resistente a la reacción álcali – agregado
- B - blanco

Estos cementos se utilizan cuando: (1) los hormigones deben tener importantes niveles de resistencia temprana por razones de proyecto o constructivas se puede utilizar cemento portland de alta resistencia inicial (ARI), (2) serán sometidos a agresión por sulfatos en cuyo caso se utiliza cemento portland altamente o moderadamente resistente a los sulfatos (ARS o MRS) en función al grado de agresión, (3) cuando se construyen secciones cuya menor dimensión lineal es 75 cm y existe riesgo de fisuración del hormigón por efectos térmicos, por lo cual se prefiere el uso de un cemento portland de bajo calor de hidratación (BCH), (4) se construirá un elemento en hormigón que será sometido en forma constante a humedad y se utilizarán agregados que fueron identificados como potencialmente reactivos por lo cual se deberá utilizar un cemento portland resistente a la reacción álcali-agregado (RRAA) o (5) se necesita

elaborar un hormigón blanco en cuyo caso se deberá utilizar un cemento portland blanco en forma conjunta con agregados de coloración clara.

En cuanto a la nomenclatura, la norma IRAM 50.001 especifica los requisitos "especiales" aunque la composición del cemento está especificada en la norma IRAM 50.000, indicándose en primera instancia el tipo de cemento y luego el requisito "especial" que cumple si correspondiese. De esta manera surgen los cementos: CPN (ARI), CPN (MRS), CPN (ARS), CPE (RRAA), CPP (ARS, BCH, RRAA), etc.

Los cementos con propiedades especiales suelen tener un precio superior a los cementos de uso general, sin embargo es posible encontrar en el mercado cementos con adiciones minerales activas como la escoria granulada de alto horno o las puzolanas naturales que cumplan los requerimientos de los cementos de uso general y simultáneamente los requisitos de alguna/s norma/s de los cementos con propiedades especiales que se comercializan a precios similares a los cementos de uso general.

2.- Clasificación por Composición

2.1.- Cementos sin Adiciones Minerales o "Puros"

Estos cementos suelen denominarse "puros" debido a que su composición surge de la molienda conjunta de clinker portland y pequeñas cantidades de sulfatos de calcio (yeso). Entre estos cementos encontramos:

- CPN - Cemento portland normal
- CPN (ARI) - Cemento portland normal, de alta resistencia inicial
- CPN (MRS) - Cemento portland normal, moderadamente resistente a los sulfatos
- CPN (ARS) - Cemento portland altamente resistente a los sulfatos sin adiciones
- CPN (BCH) - Cemento portland normal, de bajo calor de hidratación
- CPN (RRAA) - Cemento portland normal, resistente a la reacción álcali – agregado

2.2.- Cementos con Adiciones Minerales

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 CO_2, etc.), aumento de la capacidad instalada de las cementeras, eventual reducción de costos y cierta flexibilidad para la obtención de cementos u hormigones de propiedades especiales sin demasiados esfuerzos de producción.

Los cementos con adiciones normalizados en Argentina son:

- CPN - Cemento portland normal
- CPF - Cemento portland con "filler" calcáreo
- CPE - Cemento portland con escoria
- CPC - Cemento portland compuesto
- CPP - Cemento portland puzolánico
- CAH - Cemento de alto horno

Resulta algo extraño que el cemento portland normal (CPN) aparezca en las dos clasificaciones, es decir como "puro" y con adiciones minerales, esto se debe a que la norma IRAM 50.000 permite la incorporación de hasta un 10 % de escoria granulada de alto horno para este tipo de cemento.

3.- Clasificación por Nivel de Resistencia

Es conocido que la resistencia del hormigón depende, en primera instancia, de la relación a/c (agua / cemento) y, en segunda instancia de otros factores entre los que se encuentra la resistencia del cemento utilizado entre otros como la calidad de los agregados, etc. Este hecho puede resumirse en la siguiente fórmula:

$$f'_c = C \times \frac{A}{B^{a/c}}$$

f'_c : resistencia a compresión del hormigón
C : resistencia del cemento portland medido en mortero normalizado (a/c= 0,50)
A y B : constantes que dependen del tipo de agregado y otras condiciones
a/c : relación entre la masa de agua y de cemento utilizadas en la elaboración del hormigón

En todos los casos –salvo en el cemento portland de alta resistencia inicial donde la norma requiere valores de resistencia a 1, 2, 3, 7 y 28 días- los cementos son categorizados por su resistencia de acuerdo a la siguiente tabla:

Categoría de Cemento	Resistencia a Compresión				Método de Ensayo
	2 días	7 días	28	días	
CP 30	-	≥ 16 MPa	≥30 MPa	≤ 50 MPa	IRAM 1622
CP 40	≥ 10 MPa	-	≥40 MPa	≤ 60 MPa	
CP 50	≥ 20 MPa	-	≥50 MPa	-	

Ejemplos de nomenclatura: CPN40 (cemento portland normal, categoría 40); CPP30 (ARS,BCH, RRAA) (cemento portland puzolánico, categoría 30, altamente resistente a los sulfatos, de bajo calor de hidratación y resistente a la reacción álcali-agregado).

Por lo mencionado anteriormente, es de esperar que del uso de cementos que presenten una mayor resistencia resulten hormigones de mayor resistencia siempre que se utilice la misma relación a/c como lo indica la figura N° 1. También se debe considerar que existe la posibilidad que cementos que corresponden a diferentes categorías pueden presentar valores de resistencia similares debido a que existe una superposición en la categorización (por ejemplo: un cemento portland de 42 MPa de resistencia a 28 días puede cumplir simultáneamente los requerimientos de las categorías 30 y 40), es por eso que la figura presenta con línea de puntos las bandas habituales de comportamiento de los cementos de cada categoría (sombreado para la categoría 40).

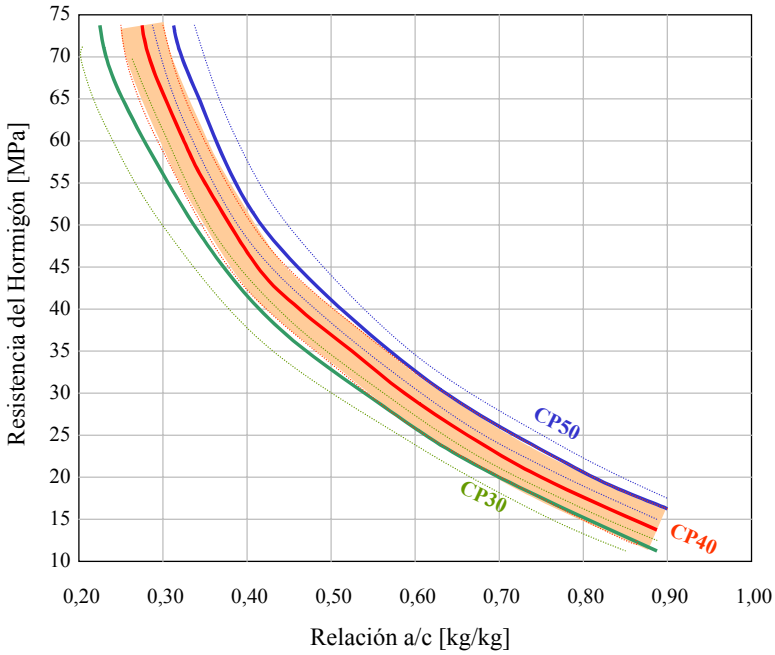

Figura N°1: Influencia de la resistencia del cemento en la resistencia del hormigón. El presente gráfico es conceptual y no responde necesariamente al comportamiento real de los cementos del mercado Argentino.

También se deberá considerar que habitualmente que los hormigones se ajustan en función a los requerimientos de asentamiento y/o trabajabilidad necesarios para lograr adecuadas condiciones de colocación, compactación y terminación, por lo cual, no siempre la relación a/c se mantiene constante si se utilizan distintos materiales (incluido el cemento) para lograr una trabajabilidad similar de la mezcla. Es por ello que se recomienda probar el comportamiento de los cementos en forma conjunta con los materiales disponibles de manera de establecer la mejor combinación del conjunto cemento, agua, agregados y aditivos que permita la obtención de hormigones que cumplen los requerimientos solicitados por el comitente al precio más conveniente.

ESPECIFICACIONES DE LOS CEMENTOS

A continuación explicaremos brevemente algunas características de cada uno de ellos. En todos los casos se especifica el tipo de cemento de acuerdo a la nomenclatura establecida en las normas IRAM 50.000 y 50.001 vigentes a partir de noviembre de 2000.

CPN - Cemento Portland Normal

Pude decirse que este cemento portland es apto para todo tipo de construcción que no requiere propiedades especiales por cuestiones de resistencia y/o durabilidad.

CPF - Cemento Portland con “filler” calcáreo

Al igual que el cemento portland normal, este material es utilizado en la construcción cuando el hormigón no presenta requerimientos especiales. La característica más valorada de este material es la buena trabajabilidad que le confiere a los morteros y hormigones cuando se trabajan en estado fresco.

Como contrapartida, al estar fabricado con adiciones no activas, la resistencia final de los hormigones elaborados con este material suele ser menor a la que se obtendría con otros tipos de cemento.

CPE - Cemento portland con escoria

Es un cemento con contenido de escoria "moderado" ya que presenta mayor contenido que el cemento portland normal y menor que el cemento de escoria de alto horno. Puede utilizarse para cualquier tipo de construcción y es especialmente recomendado cuando se tiene ataque moderado de sulfatos, posibilidad de utilización de agregados reactivos (previo ensayo) o se requieren buenas condiciones de impermeabilidad del hormigón.

CPC - Cemento Portland Compuesto

Es un cemento que combina los efectos benéficos del "filler" calcáreo de excelente trabajabilidad en estado fresco, con la mayor resistencia final y durabilidad de los cementos con adiciones activas. Esta combinación hace que se obtengan cementos de muy buenas características técnicas a costos razonables para el fabricante y el usuario del cemento.

CPP - Cemento Portland Puzolánico

Estos cementos suelen ser más "lentos" en el desarrollo de resistencia que otros debido fundamentalmente que la puzolana necesita la formación del $(OH)_2$ Ca (hidróxido de calcio) que se forma como subproducto de la hidratación del clinker para combinarse y formar compuestos similares a los del clinker hidratado. Cuando mayor sea el contenido de adición activa de este cemento, es de esperar que su hidratación sea más "lenta" y consecuentemente también lo sea el desarrollo de resistencia. Generalmente los hormigones elaborados con este tipo de cementos obtienen altas resistencias finales y puede apreciarse cuando se ensayan probetas luego de 56 o 90 días de edad. Si bien este cemento es apto para casi cualquier tipo de obra, cuando el material resulta de comprobada eficacia, es especialmente recomendado cuando se requieran propiedades especiales de durabilidad como ataque de sulfatos, bajo calor de hidratación, inhibición de la reacción álcali – agregado, impermeabilidad, etc.

CAH - Cemento de alto horno

Este cemento, que en la norma pierde la denominación "portland", posee un alto contenido de una adición activa como lo es la escoria granulada de alto horno. Es muy utilizado en obras de ingeniería donde interesa fundamentalmente el bajo calor de hidratación y una buena resistencia a sulfatos en caso de una exposición a aguas o suelos sulfatados y/o a la reacción álcali – agregado en caso de utilizarse agregados potencialmente reactivos. Es de esperar un desarrollo de resistencia un tanto más "lento" que el cemento normal debido a que la escoria granulada se hidrata a partir del ambiente alcalino que le confiere la hidratación del clinker. No obstante la resistencia final de los hormigones elaborados a partir de este tipo de cemento suele ser mayor a la obtenida con CPN utilizado en dosis similares.

ARI - de Alta Resistencia Inicial

En general su utilización se limita a aquellos usos donde se necesita habilitar rápidamente la estructura o se utiliza tecnología de encofrado deslizante o se requiere una rápida reutilización de los encofrados. Es de esperar que los hormigones elaborados con este cemento obtengan resistencias a 7 días similares o mayores a las que se obtendrían utilizando la misma dosificación con cualquier cemento portland de categoría CP40 a los 28 días de edad. Debido a que este cemento desarrolla alto calor de hidratación no

se recomienda en elementos estructurales cuya menor dimensión lineal sea mayor a los 40 cm. En el mercado este tipo de cemento se conoce con la denominación Super, Extra o ARI.

MRS - moderadamente Resistente a los Sulfatos

Es un cemento al cual se le limita el contenido de AC_3 (aluminato tricálcico) a valores menores o iguales al 8 % en masa, lo cual hace a este material apto para utilizarlo cuando existe un ataque moderado de sulfatos o será utilizado en hormigones de estructuras en contacto directo con agua de mar.

ARS - altamente Resistente a los Sulfatos

Es el cemento conocido como ARS. La norma IRAM limita el contenido de AC_3 (aluminato tricálcico) a un máximo de 4 % en masa y la suma de AC_3 + FAC_4 (ferroaluminato tetracácico) debe ser menor o igual a 22 %, calculados teóricamente de acuerdo a la composición química. Su utilización se limita para estructuras sometidas al ataque fuerte de sulfatos presentes en ciertas aguas y/o suelos de contacto.

En el caso del CPN (cemento portland normal) la norma limita los contenidos de AC_3 y FAC_4 del cemento, mientras que en el caso de los cementos adicionados (resto de los especificados en la norma IRAM 50.000), dichas limitaciones se realizan sobre el clinker portland utilizado en la fabricación ya que las fórmulas antes mencionadas solamente son aplicables en cementos “puros”.

BCH - de Bajo Calor de Hidratación

Generalmente este tipo de cementos se comercializa en combinación con cementos portland con adiciones activas como son la escoria granulada de alto horno y la puzolana. Se utiliza cuando interesa que el hormigón desarrolle poco calor a partir de la hidratación del cemento, como es el caso de las presas de hormigón o bases de grandes dimensiones. La norma especifica valores máximos de desarrollo de calor de hidratación de 270 kJ/kg (65 Cal/g) para 7 días y 310 kJ/kg (75 Cal/g) para 28 días de acuerdo al ensayo especificado en IRAM 1617 o 270 kJ/kg (65 Cal/g) a 5 días utilizando el ensayo especificado en la norma IRAM 1852 de acuerdo al tipo de cemento y/o el método de ensayo disponible.

RRAA - Resistente a la Reacción Álcali – Agregado

Existen en nuestro país algunas pocas fuentes de agregados que presentan potencialidad de reaccionar desfavorablemente con los álcalis del cemento en estructuras sometidas a condiciones de humedad en forma más o menos permanente. Si bien es recomendable utilizar agregados que no sean potencialmente reactivos para la elaboración del hormigón, existen casos que esto resulta económicamente inviable y se recurre a cementos con bajos contenidos de álcalis o que posean alguna adición activa que demuestre su capacidad de inhibición o, al menos, “amortiguar” los efectos de la expansión de manera que la reacción no resulte deletérea.

B - Blanco

Es un cemento que cumple los requerimientos de los cementos CPN o CPF o CPC y tiene como requisitos adicionales la limitación de los contenidos de óxido férrico y magnesio que actúan sobre el color del material. También, se incorporó un requisito de blancura que resulta de fundamental importancia para el usuario de este tipo de cemento. Es un material que en nuestro país no esta muy difundido debido a su alto costo y su utilización se restringe a hormigones ornamentales o “a la vista” y cierto tipo de mosaicos o baldosas. No hay que confundir con otros cementos blancos utilizados en la fabricación de ciertas pastinas o algunas baldosas que utilizan cementos con altos contenidos de

adiciones activas y no activas que no cumplen los requisitos de resistencia establecidos por IRAM para el cemento portland blanco.

HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

El clinker portland es el principal componente del cemento portland y presenta los siguientes compuestos básicos:

- Silicato tricálcico (C_3S)
- Silicato dicálcico (C_2S)
- Aluminato tricálcico (C_3A)
- Ferroaluminato tetracálcico (FAC_4)

Donde los silicatos (C_3S y C_2S) son los componentes principales ya que suman alrededor del 80 % de los compuestos y son los responsables del desarrollo de resistencia del cemento portland. Mientras que el C_3S actúa sobre el desarrollo de resistencia temprana hasta los 28 días, el C_2S presenta una hidratación algo diferida y actúa sobre la resistencia final. El C_3A que se encuentra en pequeñas cantidades actúa sobre el tiempo de fragüe, la resistencia a primeras horas del hormigón y su presencia hace vulnerable al hormigón a la acción de los sulfatos. El FAC_4 se considera casi un subproducto de la fabricación de clinker y actúa principalmente sobre la coloración del cemento y aporta cierta vulnerabilidad a los sulfatos.

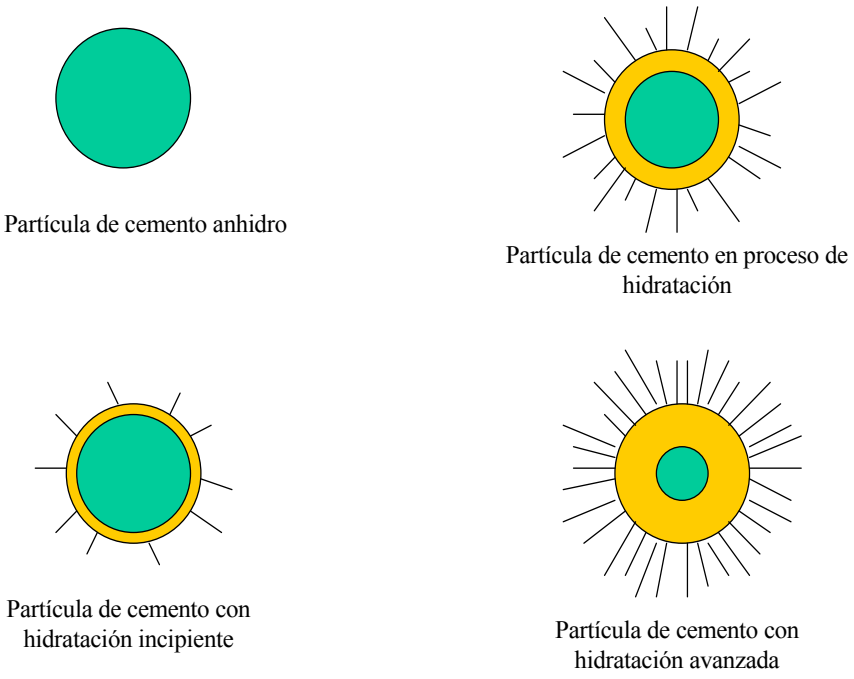

Figura N° 2: Progreso de la hidratación de una partícula de cemento

Si esquematizamos la hidratación de los silicatos:

$$\mathbf{C_nS + H_2O \rightarrow gel\ SCH + (OH)_2Ca} \quad (1)$$

C_nS : silicatos de calcio
H_2O : agua
Gel SCH : silicatos de calcio hidratados o gel de tobermorita (o gel de cemento)
$(OH)_2Ca$: hidróxido de calcio

Mientras el gel SCH es el principal responsable del desarrollo de resistencia y de la durabilidad del hormigón, el $(OH)_2Ca$ (hidróxido de calcio) es muy poco resistente desde el punto de vista mecánico, es vulnerable a la presencia de aguas puras, sulfatos y otros agentes; pero resulta fundamental en la protección de las armaduras frente a la corrosión debido al alto nivel alcalino que aporta al hormigón (aproximadamente un pH = 12,5).

Como puede observarse en la figura N° 2, existe un crecimiento de los cristales SCH (compuestos silico-calcáreos hidratados). Como se mencionó anteriormente, estos compuestos SCH son los responsables de la evolución de resistencia de la pasta de cemento y, consecuentemente, del hormigón. En la figura N° 3 puede observarse la resistencia de la pasta depende del grado de interrelación entre los productos de hidratación de las distintas partículas de cemento. Esto explica bastante claramente que cuando se utiliza una baja relación a/c, la interrelación es mucho más estrecha y, consecuentemente, es de esperar que la resistencia sea superior a cuando se utiliza una alta relación a/c donde las partículas se encuentran más alejadas. Otra forma de ver este fenómeno, es el esquema de la figura N° 4 donde se puede observarse que cuando más baja es la relación a/c, más bajo será el volumen de poros de la pasta, por lo tanto si pensamos a que la resistencia del cemento u hormigón sigue las reglas de la resistencia de cualquier material sólido, es de esperar que la misma dependa de la relación entre "vacíos" y "llenos" estableciéndose que cuando mayor sea el contenido de "llenos" mayor será la resistencia del elemento. Adicionalmente, en la figura se observa que los hormigones de alta relación a/c, no solamente presentan una baja resistencia sino que tienen alta porosidad y, consecuentemente, alta permeabilidad y espacio para la formación de grandes cristales de $(OH)_2Ca$ (cal) y etringita por lo cual se verá afectada la durabilidad debido a que sustancias agresivas pueden ingresar al hormigón con cierta facilidad disueltas en agua o el aire.

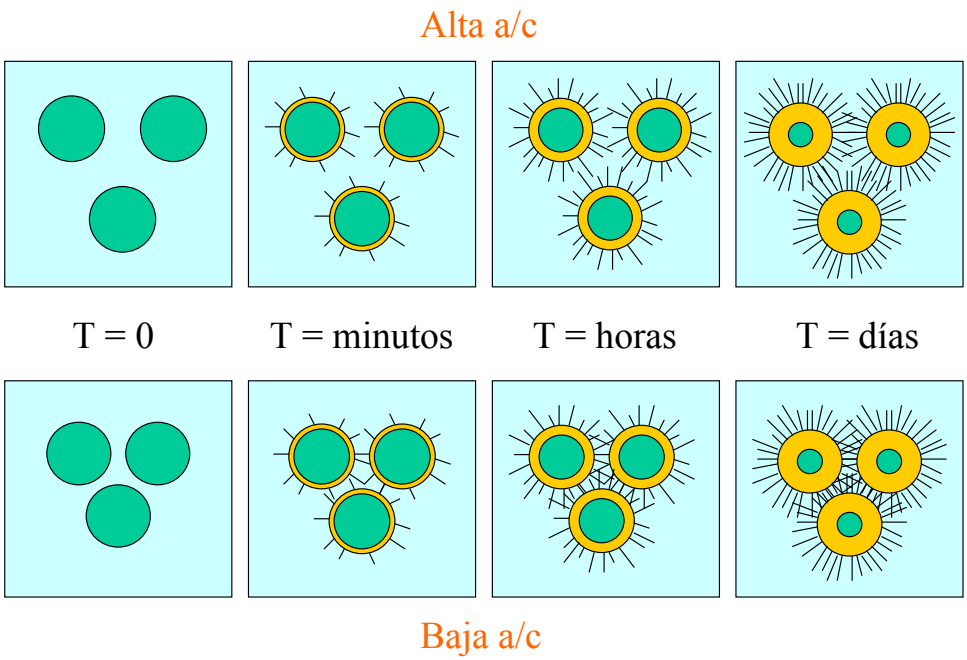

Figura N° 3: Influencia de la relación a/c sobre la resistencia de la pasta (cemento + agua).

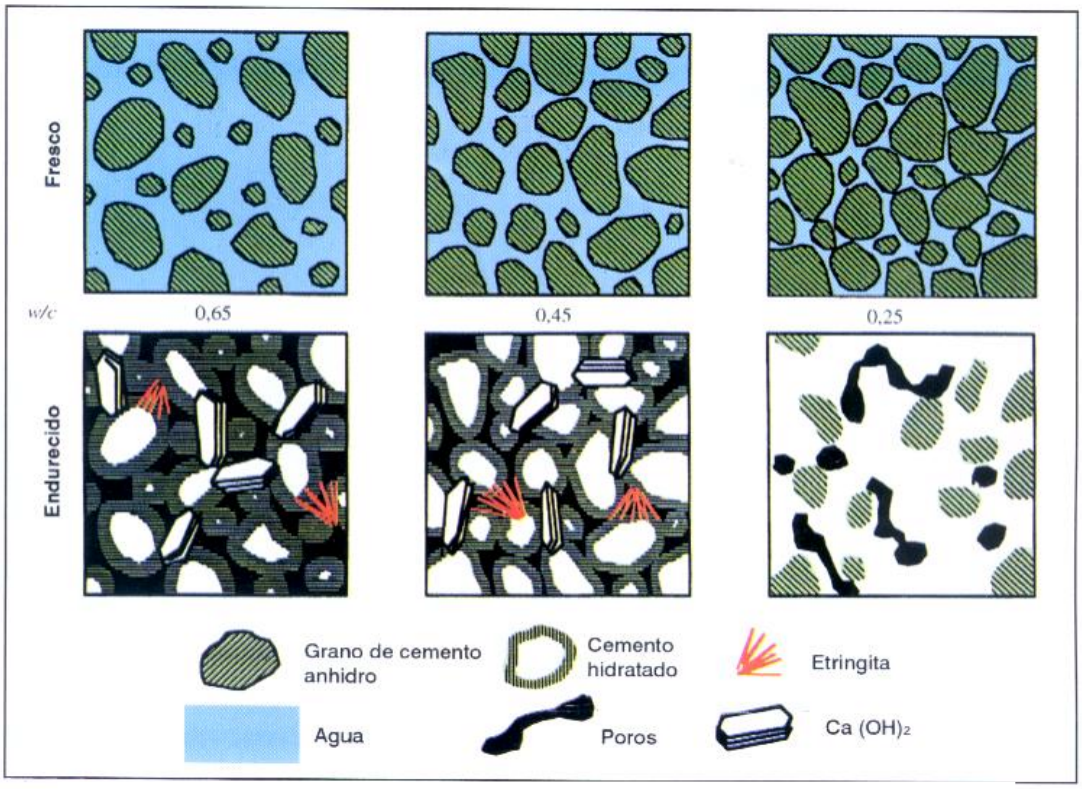

Figura N° 4: Composición de la pasta de cemento, en estado fresco y endurecido para diferentes relaciones a/c.

ADICIONES MINERALES

Las adiciones minerales (diferentes a los aditivos) son compuestos naturales o artificiales que se incorporan al cemento o directamente al hormigón con el objeto de mejorar el comportamiento del cemento u hormigón en estado fresco y/o endurecido.

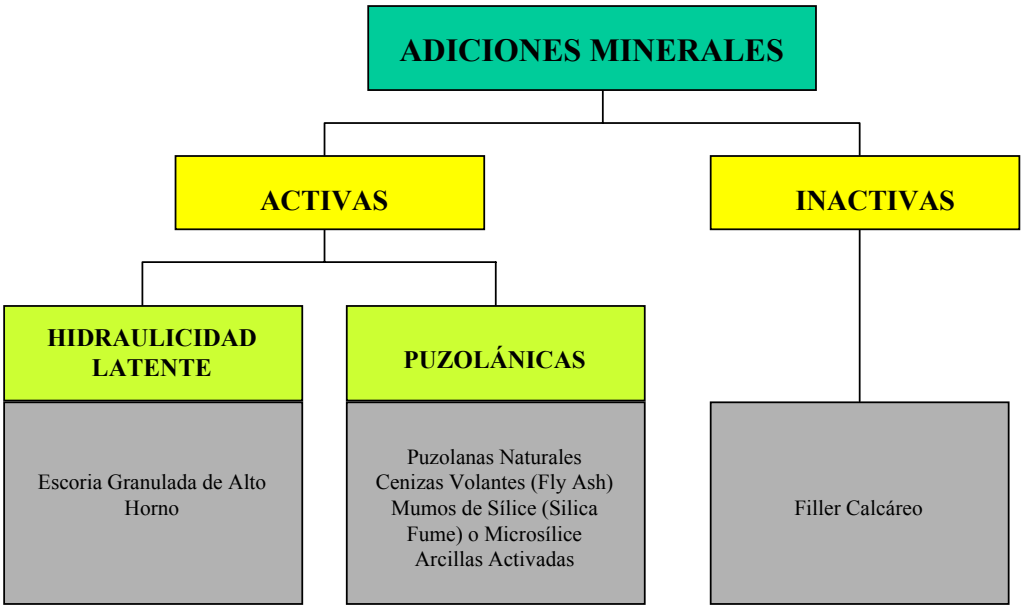

Figura N° 5: Clasificación de las adiciones minerales.

En la figura N° 5 se intenta realizar una clasificación de las adiciones minerales utilizadas mundialmente en la industria del cemento y hormigón. Una primera clasificación divide las mismas en activas e inactivas.

Las adiciones activas son aquellas que tienen la capacidad de hidratarse y formar compuestos SCH de manera similar a los formados en la hidratación del clinker portland. A su vez, estas pueden separarse en las que poseen hidraulicidad latente y las puzolánicas. Mientras que las primeras tienen la capacidad de hidratarse por sí mismas en presencia de agua y un agente catalizador, las segundas se hidratan a través de una reacción secundaria donde se combinan con el $(OH)_2Ca$ formado durante la hidratación primaria (1), resultando compuestos SCH:

Hidratación primaria: $C_nS + H_2O \rightarrow$ gel SCH + $(OH)_2Ca$ *(1)*

Hidratación secundaria: $SiO_2 + (OH)_2Ca + H_2O \rightarrow$ gel SCH *(2)*

Donde el SiO_2 lo aporta la puzolana y el $(OH)_2Ca$ es el subproducto generado durante la hidratación primaria. Podrá observarse que durante la hidratación de las puzolanas no hay generación de $(OH)_2Ca$ por lo cual es de esperar que los cementos u hormigones que poseen estas adiciones presenten mayor resistencia final y durabilidad que los elaborados con cementos "puros" ya que el $(OH)_2Ca$ tiene muy baja resistencia estructural.

En el caso de la hidratación de la escoria granulada de alto horno, el agente catalizador es el ambiente alcalino generado durante la hidratación primaria. En forma similar a las puzolanas, durante la hidratación de esta adición mineral solamente se genera gel SCH por lo cual se espera mayor resistencia final y durabilidad:

Hidratación de la escoria: $C_3S_2 + H_2O \rightarrow$ gel SCH *(3)*

Las adiciones inactivas, no generan gel SCH aunque suelen tener una influencia positiva sobre la hidratación de las partículas de clinker y las propiedades del hormigón en estado fresco.

Escoria granulada de alto horno

Es un subproducto de la fabricación del hierro y posee una composición química parecida al clinker portland. Cuando se la granula, mediante el enfriamiento violento con ayuda de agua inyectada a presión o combinando aire + agua, sus minerales componentes permanecen en un estado vítreo (no cristalino) que le confiere una hidraulicidad latente.

No hay que confundir con la escoria enfriada al aire que, al ser enfriada en forma lenta, presenta un ordenamiento de cristales propio del estado sólido por lo cual no tiene propiedades hidráulicas y suele utilizarse como agregado o balasto.

Puzolanas

Son minerales naturales o artificiales en los que predominan la sílice amorfa y la alúmina. Para que pueda producirse la reacción puzolánica indicada anteriormente, es necesario que la sílice esté en estado amorfo.

Las puzolanas naturales son rocas de origen volcánico (tobas y cenizas volcánicas) o de naturaleza orgánica de origen sedimentario (dolomitas). En nuestro país se utilizan mayoritariamente puzolanas

naturales. En otros países, en función a las disponibilidades generadas por otras industrias se dispone de puzolanas artificiales entre las que se encuentran las arcillas activadas térmicamente, las cenizas volantes (fly ash) y humos de sílice (silica fume) también conocida como microsílice debido al tamaño de partículas (entre 10 y 100 veces más pequeñas que las partículas de cemento).

Filler Calcáreo

Es un mineral compuesto básicamente por carbonato de calcio que, dada su facilidad de molienda, se adiciona al cemento o se muele en forma conjunta con el clinker portland en molino de cemento y ejerce efectos beneficiosos sobre los morteros u hormigones en estado fresco. Adicionalmente, debido a su pequeño tamaño las partículas de filler calcáreo suelen mejorar la distribución granulométrica del cemento mejorando la resistencia temprana del hormigón.

En la figura N° 6 se muestra el comportamiento aproximado que presentaría un hormigón elaborado con cemento portland "puro" y utilizando una dosificación similar reemplazando parte del cemento portland "puro" por adiciones minerales.

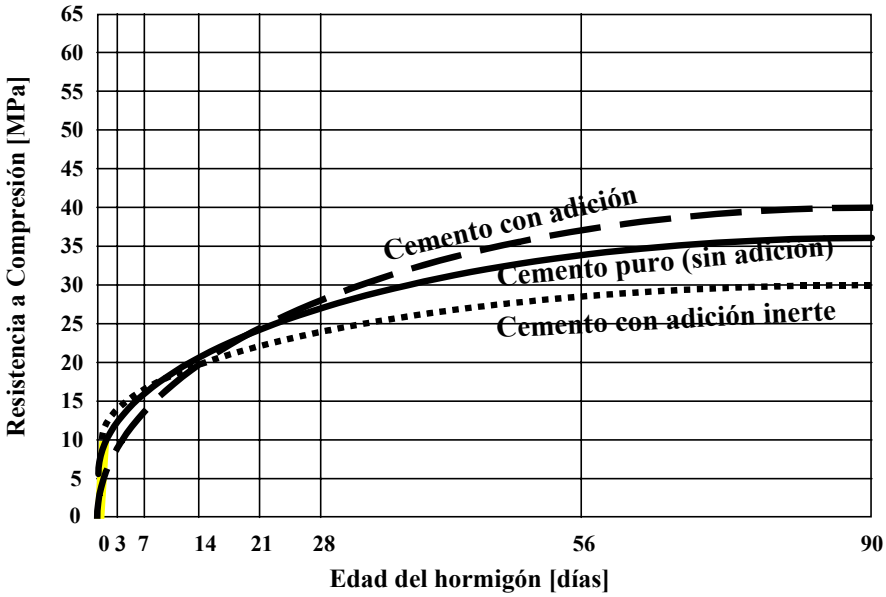

Figura N° 6: Influencia de las adiciones sobre el desarrollo de resistencia del hormigón.

Puede observarse que mientras las adiciones activas se hidratan a partir de las reacciones de hidratación del clinker portland, se obtienen desarrollos un tanto más lentos de resistencia aunque las resistencias finales son mayores debido a una hidratación más completa del material cementicio, en cambio, el uso de adiciones inactivas mejora la resistencia inicial de los hormigones aunque la resistencia final es menor debido a que se dispone de menor cantidad de partículas "hidratables".

No obstante, este esquema es indicativo y muestra tendencias, ya que los fabricantes de cemento portland conocen el comportamiento de las adiciones que utilizan para elaborar sus cementos, por lo cual puede encontrarse en el mercado cementos con distintos tipos de adiciones se puedan obtener curvas de evolución de resistencia similares a las que se obtendrían utilizando algunos cementos "puros". Esto solamente puede lograrse mediante tecnología de molienda y/o utilizando un clinker de características especiales para la elaboración de cementos adicionados.

DURABILIDAD

Cuando el profesional proyecta y construye una estructura no solamente debe preocuparse de definir un nivel de resistencia del hormigón, sino que debe establecer las características que ese hormigón debe tener a fin de lograr que esa estructura cumpla con las condiciones de uso para las que fue proyectada durante toda su vida útil. Para ello, resulta fundamental conocer el grado de agresividad a los que serán sometidos los diferentes elementos componentes de las estructuras. A continuación nos referiremos a algunos hormigones de características especiales que pueden elaborarse con el fin de lograr adecuadas condiciones de durabilidad de las estructuras.

Hormigones de Baja Permeabilidad

Es bastante conocido que la durabilidad de las estructuras depende fundamentalmente de la calidad del hormigón de recubrimiento ya que los agentes externos disueltos en agua y/o aire ingresarán al hormigón a través de éste. Por lo tanto resulta fundamental la ejecución de hormigones de baja permeabilidad. Entre otros ejemplos se pueden nombrar la corrosión de armaduras por ingreso de cloruros, humedad y/o carbonatación del hormigón, ciclos de congelación y deshielo en hormigones saturados.

Para ejecutar hormigones de baja permeabilidad, resulta fundamental diseñar una mezcla de baja relación a/c. Adicionalmente, cuando el grado de agresividad del medio lo requiera (ambiente marino, atmósferas con alta concentración de CO_2, presión de agua, etc.), se puede especificar la utilización de un cemento portland con adición/es mineral/es activa/s de manera de lograr una hidratación más completa del cemento y un menor volumen de poros.

Para hormigones sometidos a ciclos de congelación y deshielo, no solamente resulta fundamental lograr una baja permeabilidad sino que se recomienda la utilización de aditivos capaces de incorporar entre un 4 % y un 6 % de aire en forma intencional de manera que las burbujas de aire incorporadas a la masa del hormigón actúen como “vasos de expansión”, reduciendo la presión que genera el agua congelada presente en los capilares.

Hormigones Sometidos a Agresión por Sulfatos

Cuando se construyen elementos estructurales que serán sometidos a altas concentraciones de sulfatos (ejemplo: bases sometidos a suelos y/o aguas sulfatadas) resulta fundamental la construcción de un hormigón suficientemente impermeable, como requisito adicional y dependiendo de las condiciones de agresividad se debe especificar la utilización de cemento portland MRS para ataque moderado, cemento portland ARS para ataque fuerte y cemento portland ARS con adiciones minerales activas (escoria granulada de alto horno o puzolanas) para ataque muy fuerte. En este último caso se permite la utilización de un cemento portland ARS “puro” más una adición mineral que haya probado ser efectiva para “soportar” el grado de ataque al que será sometida la estructura.

Hormigones con Riesgo de Reacción Álcali - Agregado

Cuando se prevé que el hormigón estará en contacto más o menos permanente con agua o humedad (fundaciones, pavimentos, pilotes, postes, puentes, alcantarillas, obras hidráulicas, etc.), se recomienda analizar los agregados a utilizar en la elaboración del hormigón a fin de establecer si es capaz de reaccionar con los álcalis (iones Na^+ y K^+) disueltos en el hormigón.

Si los estudios establecen que los agregados son "potencialmente reactivos" se recomienda seguir los siguientes pasos:

a) Estudiar los antecedentes del desempeño de los agregados en obras de características similares que utilizaron el mismo conjunto cemento – agregados.

b) En caso de no disponer de antecedentes o si las estructuras analizadas presentan signos de reacción, se analizarán las siguientes alternativas:

b.1) Utilizar otros agregados que demuestren mediante ensayos no ser potencialmente reactivos.

b.2) Si no resulta factible el cambio de agregados por razones económicas o de disponibilidad, se deberá optar por alguna de las siguientes alternativas:

b.2.1) Utilizar un cemento portland resistente a la reacción álcali-agregado.

b.2.2) Utilizar un conjunto cemento – agregados que hayan demostrado, mediante ensayos, que las expansiones se mantienen dentro de límites no deletéreos.

b.2.3) Utilizar una adición mineral que demuestre ser efectiva para reducir o inhibir la reacción utilizando el mismo conjunto cemento – adición – agregados que será utilizado en la obra.

En general, los álcalis son aportados por el cemento portland. Es por eso que el Reglamento CIRSOC 201, recomienda el uso de cementos de bajo álcali ($Na_{eq} \leq 0{,}60$ %). No obstante, existen varios antecedentes que demostraron que esta limitación no resulta suficiente para asegurar que no se producirá reacción ya que existen otras posibles fuentes de álcalis debido a que estos pueden ser aportados por los otros materiales componentes o desde el exterior disueltos en el agua o suelo de contacto. Por esta razón, es recomendable la utilización de una adición mineral activa (puzolanas o escoria granulada de alto horno) que, no solamente actúan como un agente de dilución de álcalis debido a que se coloca una menor cantidad de cemento portland "puro" dentro del material cementante, sino que puede atenuar e incluso inhibir las consecuencias nocivas de la reacción.

Hormigones con Riesgo de Fisuración por Efectos Térmicos

Cuando se construyen hormigones cuya mínima sección es mayor de 75 cm, existe riesgo que la temperatura que se genera por efecto de la hidratación del cemento se eleve hasta valores que generen una expansión tal que el hormigón no soporte las tensiones de tracción que se generan durante la retracción producida durante la etapa de enfriamiento.

La manera de mantener esta elevación dentro de los límites "razonables" es la utilización de un mínimo contenido de cemento compatible con los requerimientos de resistencia y durabilidad del hormigón, restringir la temperatura de colocación del hormigón ($\leq$ 20°C) y utilizar un cemento portland que genere bajo calor de hidratación o reemplazar parte del cemento por adiciones minerales activas. En algunos casos, estos requerimientos pueden ser reemplazados o complementados con algunas metodologías constructivas que permiten una mejor disipación de la temperatura.

La fabricación de un cemento portland de bajo calor de hidratación (BCH) resulta poco económica si se lo hace con cemento "puro" ya que requiere una composición especial del clinker portland (bajos contenidos de C_3S y C_3A, y altos contenidos de C_2S). Otra forma de obtener un cemento portland BCH es la utilización de altos contenidos de adiciones minerales activas como puzolanas o escoria granulada de alto horno.

BIBLIOGRAFÍA

- Normas IRAM de cementos y adiciones.
- Reglamento CIRSOC 201 y Anexos, edición diciembre de 1984.
- Curso de Tecnología del Hormigón, Ing. A. N. Castiarena.. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 3° edición.
- Guía para la Selección y Empleo de Cementos Portland, borrador de Octubre de 1999 del Instituto del Cemento Portland Argentino.
- ACI Manual of Concrete Practice, edición 2000.
- Revista CEMENTO, N° 25, publicación del Instituto del Cemento Portland Argentino.