



CEMENTO



CEMENTO

INTRODUCCIÓN

Probablemente, los antiguos romanos fueron los primeros que utilizaron el hormigón -palabra de origen latín- basados en cemento hidráulico, un material que se endurece con el agua. Esta propiedad y otra relacionada con el hecho de no sufrir cambio químico por la acción del agua en su vida posterior, son las más importantes y las que contribuyeron a la difusión del empleo del hormigón como material de construcción. El cemento romano cayó en desuso y no fue sino hasta 1824 cuando el cemento moderno, conocido como cemento Portland, fue patentado por Joseph Aspdin, un constructor de Leeds.

Se da el nombre de cemento, al conglomerado hidráulico obtenido como producto en una fábrica de cemento, que contiene al clinker Pórtland como constituyente necesario. Es un material inorgánico finamente dividido que, mezclado con agua, forma una pasta que fragua y endurece en virtud de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo agua.

ELABORACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

El cemento Portland está hecho básicamente por la combinación de un material calcáreo (como piedra caliza y yeso) y una base de sílice y alúmina (como arcilla o esquisto). Para la elaboración se emplean materias primas capaces de aportar principalmente cal y sílice, y accesoriamente óxido de hierro y alumina, para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. Estos materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan íntimamente hasta su completa homogenización, ya sea por vía seca o en húmeda. La materia prima así procesada, ya sea en forma de polvo o de lodo, se introduce en hornos rotatorios donde se produce la cocción hasta fusión parcial (Clinquerización). Se calcina a temperatura del orden de 1500°C, hasta que alcanza un estado de fusión incipiente. En este estado se producen las reacciones químicas requeridas y el material se subdivide y aglutina en fragmentos no mayor a 6 cm. A el material resultante de la calcinación se lo denomina clinker. Una vez frió, el clinker se muele conjuntamente con una reducida proporción de yeso que normalmente es yeso dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, escrito en forma simplificada es CSH_2), que tiene la función de regular el tiempo de fraguado, y con ello se obtiene el polvo fino de color gris que se conoce como cemento Portland. Además durante la molienda, el clinker puede combinarse con escorias, puzolanas o filler calcáreo o algún otro material para obtener cementos espaciales. En las figuras 1 y 2 se esquematiza este proceso.

Como se mencionó el mezclado y el molido de las materias primas puede hacerse con agua o en seco, de ahí provienen los nombres de proceso húmedo y proceso seco. La mezcla se coloca en un horno rotatorio, que puede ser (en el proceso húmedo) hasta de 7 m de diámetro y 230 m de largo. El horno, ligeramente inclinado, recibe la mezcla por el extremo superior, mientras se introduce carbón pulverizado (u otra fuente de calor) mediante una inyección de aire, por el extremo inferior del horno, donde la temperatura puede alcanzar 1500 °C. Mientras la mezcla de materiales se mueve dentro del horno, ésta encontrará temperaturas progresivamente más altas, por lo que se dan varios cambios químicos. En primer lugar, se elimina toda el agua y se libera CO_2 del carbonato de calcio. Después, el material seco sufre



una serie de reacciones químicas hasta que, finalmente, en la parte más caliente del horno, entre el 20 y el 30 % del material se licua y se combina cal, sílice y alúmina. La masa se funde en bolas de 3 a 25 mm de diámetro. El clinker se deposita en enfriadores, que proveen el medio para un intercambio de calor con el aire que más adelante se usará. Las bolas del clinker frío que son muy duras se muelen con yeso.

Un homo sencillo de diseño moderno (empleando el proceso seco) puede producir hasta 6200 toneladas de clinker al día. Para exemplificar esta cantidad, podemos decir que la producción anual de cemento en 1984 fue de 70 millones de toneladas en Estados Unidos de América y de 13.5 en el Reino Unido. El consumo de cemento (que no es igual a la producción, debido a las importaciones y exportaciones) se lo puede expresar como la cantidad de cemento per cápita, en Estados Unidos de America fue de 325 Kg. y 244 Kg. en el Reino Unido; el consumo más elevado en un país industrializado fue de 678 Kg. en Italia. En Argentina en el año 2009 el consumo de cemento por habitante fue de 231 Kg/habitante¹.

En las referencias² y ³ se pueden visualizar simulaciones muy interesantes del proceso de fabricación del cemento.

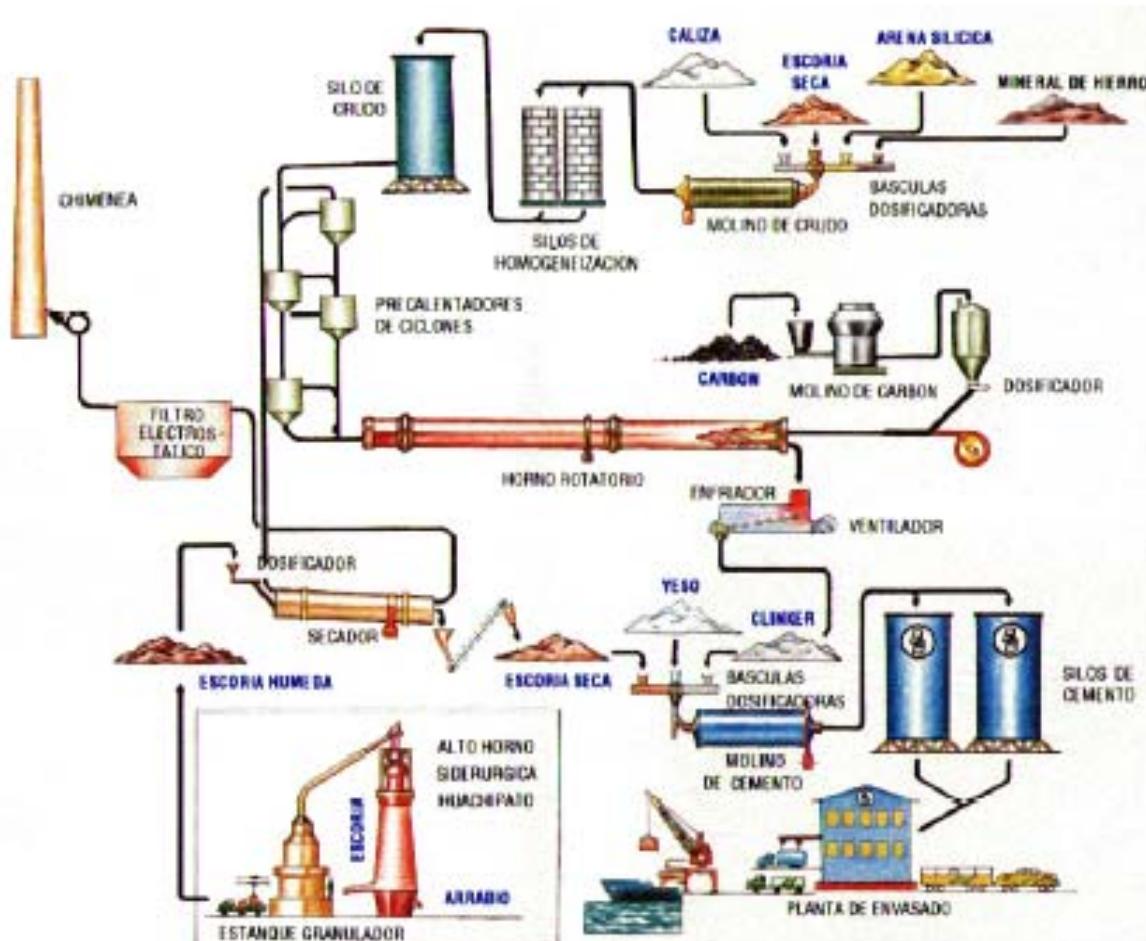


Figura 1: Esquema del proceso de fabricación del cemento Portland . Fuente C. Videla⁴

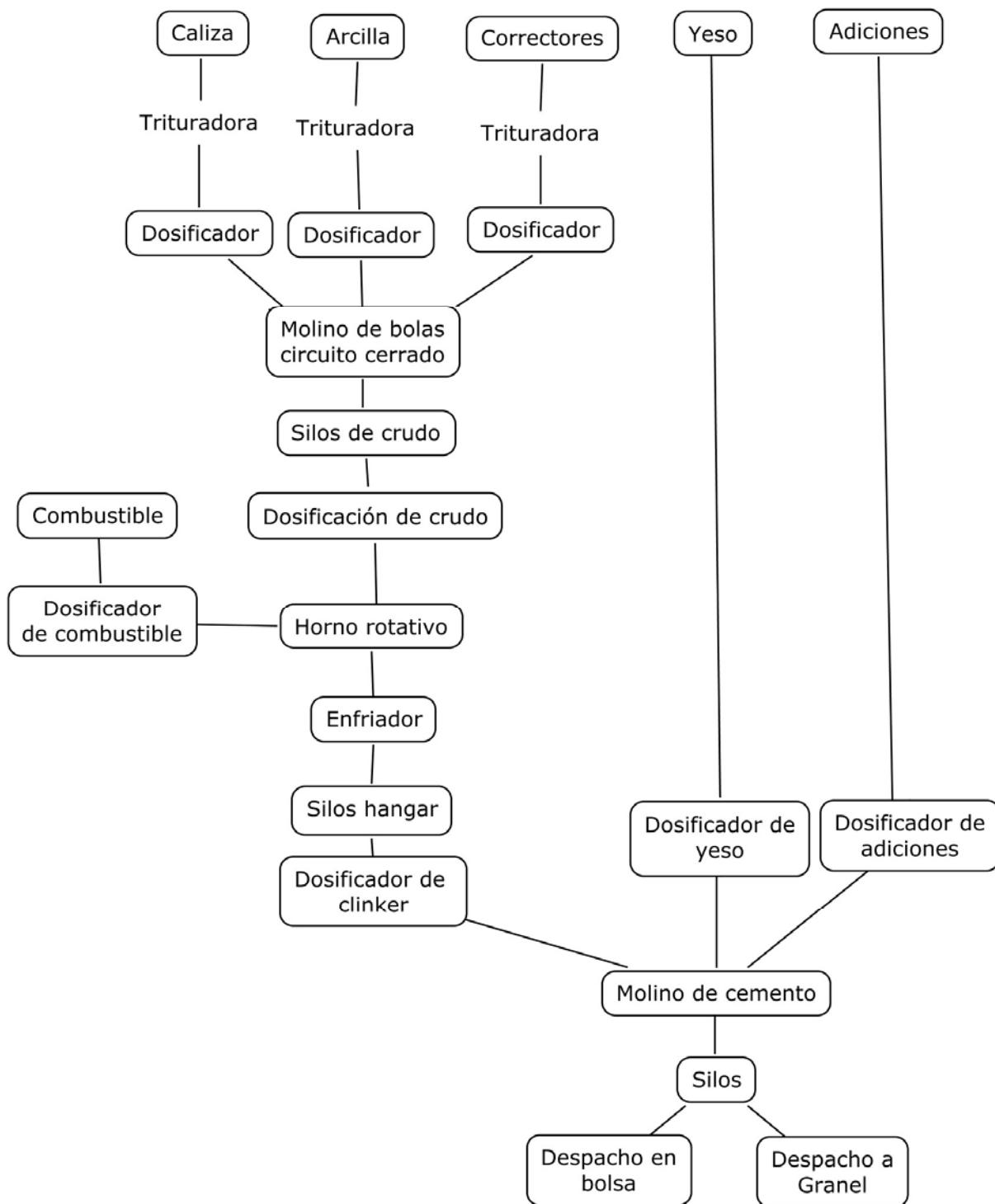


Figura 2: Esquema del proceso de fabricación del cemento Portland



QUÍMICA BÁSICA DEL CEMENTO

Ya hemos visto que las materias primas empleadas en la elaboración del cemento Portland son principalmente cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Esos componentes actúan entre sí en el horno para formar una serie de productos más complejos y un pequeño residuo de cal no combinado, que no tuvo suficiente tiempo para reaccionar. Se logra entonces un estado de equilibrio químico. Sin embargo, el equilibrio no se mantiene durante el enfriamiento, y el índice de enfriamiento afecta la cristalización y la cantidad de material amorfo presente en el clinker. Las propiedades de este material amorfo, difieren considerablemente de los de otros componentes cristalinos de una composición química nominalmente similar.

Para el cálculo de la composición de cementos comerciales: la composición "potencial" se calcula a partir de las cantidades medidas de óxidos presentes en el clinker, suponiendo que hubiera tenido lugar una cristalización total de los productos en equilibrio.

Los principales componentes del cemento son cuatro y se presentan en la tabla 1, junto con sus fórmulas abreviadas. Estas abreviaturas, empleadas por los químicos del cemento, describen cada óxido con una letra; por ejemplo: CaO = C, SiO₂ = S, Al₂O₃ = A y Fe₂O₃ = F. De igual forma, H₂O en el cemento hidratado se denomina como H.

Tabla 1. Principales componentes del cemento Portland.

Nombre del componente	Composición óxido	Abreviatura
Silicato tricalcio	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato bicalcio	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricalcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrito tetracalcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

El cálculo de la composición potencial del cemento Portland está basado en el trabajo de R. H. Bogue (1926) y otros, y se la conoce como "composición de Bogue". Autores posteriores han tratado de corregir el cálculo de Bogue para adaptarlo más a la realidad, sin embargo, se puede decir que en la actualidad, las fórmulas de Bogue siguen prestando servicio. Las ecuaciones para los porcentajes de los principales componentes son:

$$C_3S = 4.07 (CaO) - 7.60 (SiO_2) - 6.72 (Al_2O_3) - 1.43 (Fe_2O_3) - 2.85 (SO_3)$$

$$C_2S = 2.87 (SiO_3) - 0.754 (3CaO.SiO_2)$$

$$C_3A = 2.65 (Al_2O_3) - 1.69 (Fe_2O_3)$$

$$C_4AF = 3.04 (Fe_2O_3)$$

Los silicatos, **C₃S** y **C₂S**, son los componentes más importantes y los causantes de la resistencia de la pasta hidratada de cemento. En realidad, los silicatos en el cemento no son componentes puros, sino que contienen óxidos menores en soluciones sólidas. Estos óxidos tienen efectos significativos en los ordenamientos atómicos, en la forma de los cristales y en las propiedades hidráulicas de los silicatos.

C₃S: Reacciona rápido con el agua, liberando calor y formando silicato de calcio hidratado (**CSH**). Tiene gran resistencia y es el principal componente de resistencia a temprana edad. Cementos de bajo calor de hidratación deben tener bajo contenido de este compuesto.



C₂S: Reacciona lento con el agua para formar el mismo tipo de compuestos que el C₃S (**CSH**). Tiene gran resistencia, la reacción es más lenta por lo tanto el calor tiene tiempo para disiparse, por lo que la temperatura del hormigón es menos elevada. Contribuye a resistencias a mayor edad.

La presencia de **C₃A** en el cemento contribuye poco o nada a la resistencia del mismo, excepto en las primeras etapas; y cuando la pasta de cemento endurecida es atacada por sulfatos, la formación de sulfoaluminato de calcio (estringita) puede causar resquebrajamientos. Sin embargo, el C₃A es benéfico durante la elaboración del cemento, porque favorece la combinación de cal y sílice. Por su reacción inmediata con el agua, debe ser retardado con la adición de yeso al Clíker, que forma un sulfo-aluminato. Reacciona muy rápido y libera mucho calor al hidratarse.

El **C₄AF** también está presente, en pequeñas cantidades, en el cemento y, en comparación con los otros tres componentes, no influye significativamente en su comportamiento; sin embargo, reacciona con el yeso para formar sulfoferrita de calcio y su presencia puede acelerar la hidratación de los silicatos. Reacciona rápido con el agua, pero no produce mucho calor ni resistencia. Es de color gris oscuro, por lo que no debe existir en cemento blanco.

La cantidad de yeso añadida a la clinker es esencial y dependerá del contenido de C₃A y del álcali del cemento. El incremento en la finura del cemento aumenta la cantidad de C₃A disponible en las primeras etapas, así como los requerimientos de yeso; no obstante, el exceso de yeso lleva a la expansión y a la consecuente ruptura de la pasta de cemento. El contenido óptimo de yeso se determina en base a la generación de calor de hidratación para que se dé una tasa conveniente de reacción temprana adecuada, que asegure pocas cantidades de C₃A disponible para reaccionar después de que todo el yeso se haya combinado. Las normas ASTM C 150-84 y BS 12: 1978 especifican la cantidad de yeso como la masa presente de trióxido de sulfuro (S₀3).

Además de los componentes principales enumerados en la tabla 1, hay componentes menores como MgO (óxido de magnesio), K₂O (óxido de potasio) y Na₂O (Oxido de sodio); que por lo general no representan más que un pequeño porcentaje de la masa de cemento. De estos componentes menores, dos son de interés: los óxidos de sodio y potasio, **Na₂O** y **K₂O**, conocidos como los álcalis (aunque también hay otros álcalis en el cemento). Se sabe que reaccionan con algunos agregados, conocida esta reacción como álcali-agregado, lo cual pueden causar desintegración del hormigón. También se ha observado que afectan el índice de incremento de la resistencia del cemento. Por tanto cabe destacar que el término "componentes menores" se refiere a su cantidad y no necesariamente a su importancia.

De la tabla 2 puede obtenerse una idea general de la composición del cemento, y los límites de composición de los óxido de los cementos Portland. En la tabla 3 se presenta la composición de óxido de un cemento típico y la composición calculada de los compuesto, obtenida por medio de la ecuación de Bogue mencionada anteriormente.

Dos términos empleados en la tabla 3 requieren explicación. **El residuo insoluble**, (Método de ensayo IRAM 1651-2), es una medida de adulteración del cemento que se eleva considerablemente por las impurezas del yeso. La norma BS 12: 1978 limita el residuo insoluble a 1.5 % de la masa de cemento. El límite correspondiente en la norma ASTM C 150-84 es de 0.75 %. En la Norma IRAM 50000 limita para el cemento portland normal



(CPN) el límite es de 2% ***La pérdida por calcinación*** (Método de ensayo IRAM 1651-2) muestra la amplitud de la hidratación y carbonatación de la cal y el magnesio libres debido a la exposición del cemento a la atmósfera. El límite especificado en las normas ASTM C 150-84 y BS 12: 1978 es de 3 %; la norma inglesa permite una pérdida de 4 % para cementos en clima tropical %. La Norma IRAM 5000 para CPN 4% máximo.

Tabla 2. Límites aproximados de la composición del cemento Portland

Óxido	Contenido, porcentaje
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0
MgO	0.1-4.0
Na ₂ O + K ₂ O	0.2-1.3
SO ₃ ,	1-3

Tabla 3. Composiciones de óxidos y compuestos de un cemento Portland típica.

Porcentaje de composición de óxidos típicos	Composición de los compuestos usando las fórmulas de Bogue		
CaO	63	C ₃ S	54,1
SiO ₂	20	C ₂ S	16,6
Al ₂ O ₃	6	C ₃ A	10,8
Fe ₂ O ₃	3	C ₄ AF	9,1
MgO	1,5		
Na ₂ O + K ₂ O	1		
SO ₃ ,	2		
otros	1		
Perdida por calcinación	2		
Residuo Insoluble	0,5		



HIDRATACIÓN DEL CEMENTO

Hasta ahora hemos hablado sobre el cemento en polvo, pero en la práctica, el material de mayor interés es la pasta de cemento endurecida, la cual es el producto de la reacción de cemento con agua, que se esquematiza en las figuras 3 y 4. En presencia de agua (H_2O que en la nomenclatura de la química del cemento es H), los silicatos y aluminatos (tabla 1) del cemento Portland forman productos de hidratación o hidratos, que resultan una masa firme y dura: la pasta endurecida de cemento.

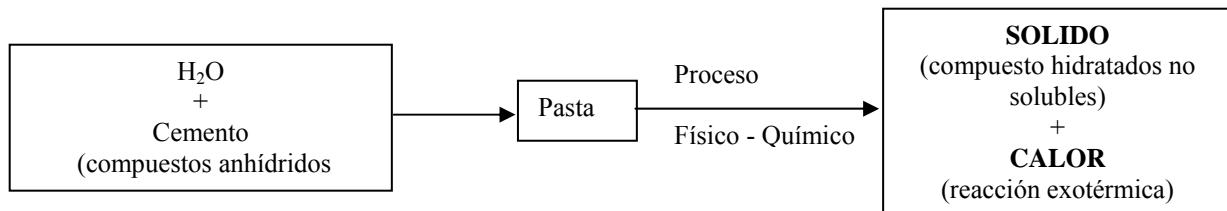
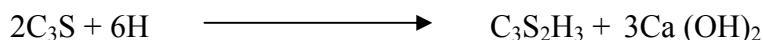


Figura 3: Esquema del proceso de hidratación del cemento

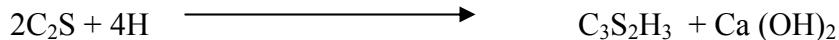
Como ya se estableció anteriormente los dos silicatos de calcio (C_3S y C_2S) son los principales compuestos aglutinantes en el cemento, de los cuales el primero se hidrata más rápidamente que el segundo. En cementos comerciales, los silicatos de calcio contienen pequeñas impurezas de algunos de los óxidos presentes en las clinkers. Estas impurezas tienen un poderoso efecto en las propiedades de los silicatos hidratados. El C_3S "impuro" se conoce como alita, y el C_2S "impuro", como belita.

El producto de la hidratación del C_3S es el hidrato microcristalino $C_3S_2H_3$, con un poco de cal separada como $Ca(OH)_2$ cristalino (Portlandita, CH). El C_2S se comporta de manera similar, pero contiene menos cal. Actualmente, los hidratos de silicato de calcio se describen como C-S-H, Silicatos de calcio hidratado (ó gel de tobermorita). Las reacciones de hidratación aproximadas se escriben como sigue:

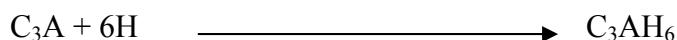
Para C_3S



Para C_2S



La cantidad de C_3A en la mayoría de los cementos es comparativamente pequeña; su estructura hidratada tiene una forma cristalina cúbica rodeada por silicatos de calcio hidratados. La reacción de C_3A puro con agua es muy rápida y podría conducir a un fraguado instantáneo que se evita al añadir yeso al clinker de cemento. Aún así, el promedio de la reacción de C_3A es más rápido que el de los silicatos de calcio, siendo la reacción aproximada:





Para evitar el fraguado relámpago y hacer la mezcla trabajable se añade al clinker un retardador de fragüe que normalmente es yeso dihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ escrito en forma simplificada CSH_2 . El yeso y el aluminato reaccionan para formar sulfoaluminato de calcio hidratado.

La reacción del C₃A involucrando iones Sulfatos provistos por el yeso es:

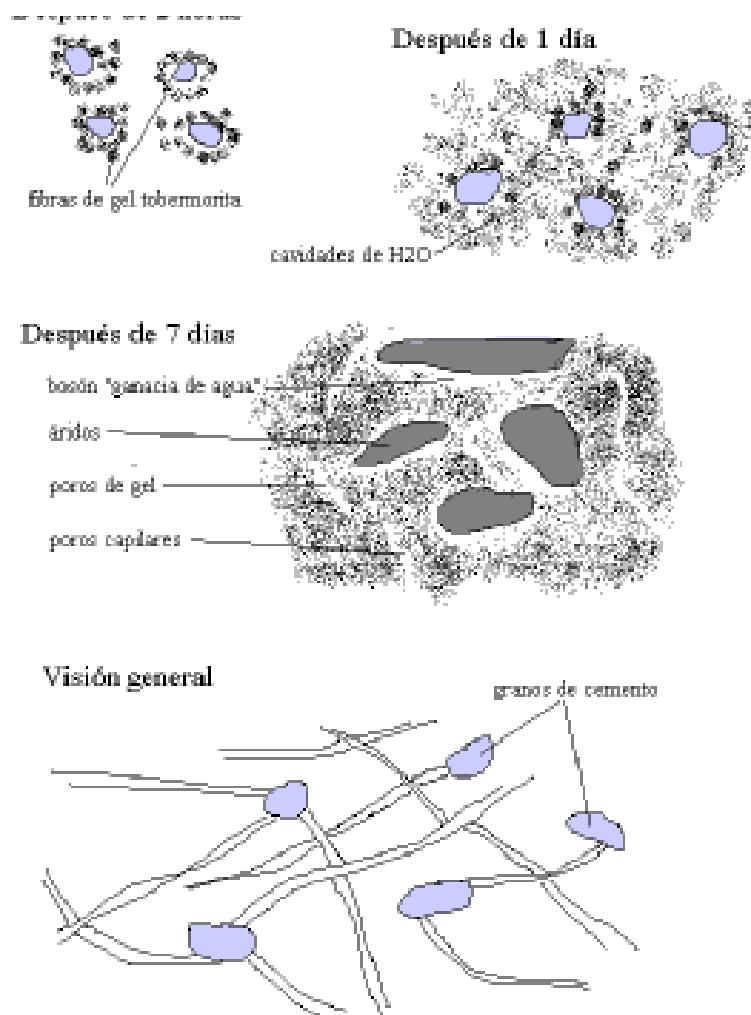
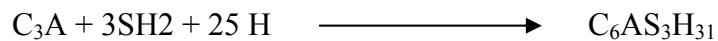


Figura 4: Esquema del proceso de hidratación del cemento. Fuente C. Videla⁵



CALOR DE HIDRATACIÓN y RESISTENCIA

Como muchas reacciones químicas, la hidratación de los compuestos del cemento es exotérmica, y la cantidad de calor (en joules) por gramo de cemento no hidratado, desarrollada desde el contacto del cemento con el agua, hasta una hidratación total a una temperatura dada, se define como **calor de hidratación**.

La temperatura a la cual se desarrolla la hidratación afecta enormemente el índice de desarrollo de calor, lo cual, para propósitos prácticos es más importante que el calor total de hidratación; el mismo calor total producido a lo largo de un periodo más prolongado puede disiparse en grado mayor, con el consiguiente aumento menor en la temperatura.

Para el promedio usual de cementos Portland, aproximadamente la mitad del calor total se libera entre uno y tres días, alrededor de tres cuartas partes en siete días y casi el 90 % en seis meses. El calor de hidratación depende de la composición química del cemento, y es aproximadamente igual a la suma de los calores de hidratación de los componentes individuales puros, cuando sus proporciones respectivas en la masa se hidratan por separado.

Los valores típicos aparecen en la tabla 4.

Así, al disminuir las proporciones de C₃A y C₃S, el calor de hidratación del cemento (y su índice de incremento) se reducirá. La finura del cemento afecta el índice de incremento de calor, pero no la cantidad total de calor liberada, que puede ser controlada por la cantidad de cemento (riqueza) en la mezcla del hormigón.

Puede observarse que no hay relación entre el calor de hidratación y las propiedades aglutinadoras de los componentes individuales. Como hemos visto, los dos principales encargados de la resistencia del cemento hidratado son el C₃S y el C₂S, y hay una regla que establece que el C₃S contribuye más al desarrollo de la resistencia durante las primeras cuatro semanas, mientras que el C₂S influye en el incremento posterior de la resistencia. Al cabo de aproximadamente un año, los dos componentes, contribuyen en forma aproximadamente igual a la resistencia del cemento hidratado. En la figura 5 se muestra el desarrollo de la resistencia de los cuatro componentes puros del cemento. Sin embargo, en contraste con la posibilidad de predecir el calor de hidratación del cemento a partir de sus componentes constitutivos, no ha sido posible predecir la resistencia del cemento hidratado con base en su composición.

Tabla 4. Calor de hidratación de los compuestos puros.

Calor de hidratación		
Compuestos	J/g	Cal/g
C ₃ S	502	120
C ₂ S	260	62
C ₃ A	867	207
C ₄ AF	419	100

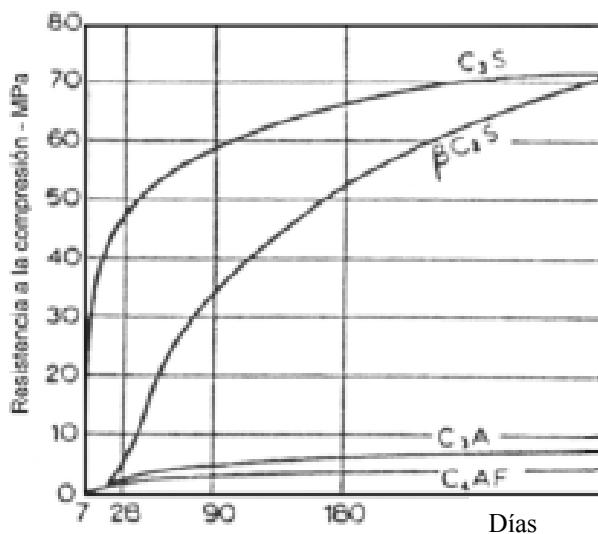


Figura 5: Desarrollo de la resistencia de los componentes puros del cemento. Referencia Neville⁶.

ENSAYOS DEL CEMENTO

Puesto que la calidad del cemento es esencial para la elaboración de un buen hormigón, la fabricación del cemento requiere un estricto control.

Se han establecido un conjunto de pruebas para laboratorios de plantas de cemento, con el propósito de asegurar que éste tenga la calidad deseada y que se ajuste a las especificaciones de las normas nacionales pertinentes. También es deseable que el comprador, o un laboratorio independiente, efectúe pruebas de aprobación periódicas, o bien que se examinen las propiedades de un cemento que se va a emplear para un propósito específico. Las pruebas relacionadas con la composición química van más allá del alcance de este apunte. Remitimos al lector a la bibliografía o a las normas pertinentes: ASTM C 114-8313 y BS 4550: Parte 2: 1970. IRAM 1504. En seguida describiremos brevemente las pruebas relativas a finura, tiempo de fraguado, estabilidad dimensional y resistencia, de acuerdo con los procedimientos estipulados en las normas IRAM, ASTM y BS 4550: Parte 3: 1978 .

1. FINURA DEL CEMENTO

Puesto que la hidratación se inicia en la superficie las partículas del cemento, el área de la superficie total del cemento representará el material disponible para la hidratación. Así, el índice de hidratación dependerá de la finura de las partículas del cemento y para el desarrollo rápido de la resistencia será necesaria una gran finura. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el costo del molido y el efecto de la finura en otras propiedades como, por ejemplo, los requerimientos del yeso, la manejabilidad del hormigón fresco y su desempeño en el largo plazo.

La finura es una propiedad esencial del cemento y tanto la BS, ASTM y la Norma IRAM requieren la determinación de la superficie específica (en m^2/kg). Se puede lograr una aproximación directa al medir la distribución del tamaño de las partículas por sedimentación o levigación. Estos métodos se basan en la ley de Stoke, y proporcionan la velocidad final de



caída por los efectos de la gravedad de una partícula esférica en un medio fluido. Un gran adelanto es el turbidímetro Wagner, como se especifica en la ASTM C 115-79b, con el cual la concentración de partículas en suspensión en un nivel dado, en keroseno, se determina usando un rayo de luz; el porcentaje de luz transmitido (y, por tanto, el área de partículas) se mide mediante una fotocelda.

La superficie específica del cemento puede determinarse por permeametría método de Blaine IRAM 1623 (ASTM C 204-84), en la que un volumen determinado de aire pasa a una presión promedio prescrita, lo cual disminuye el flujo de modo estable y constante. Se mide el tiempo empleado para que el flujo tenga lugar y pueda calcularse la superficie específica, por un equipo dado y una porosidad normal.

2. PASTA DE CONSISTENCIA NORMAL

Para establecer los tiempos inicial y final de fraguado y para las pruebas estabilidad dimensional de Le Chatelier, debe usarse una pasta simple de cemento común de consistencia normal. Por tanto, para cualquier cemento es necesario determinar el contenido de agua que producirá una pasta de consistencia normal. La consistencia se determina con el aparato de Vicat, que mide la profundidad de penetración de un pistón de 10 mm de diámetro, con la fuerza de su propio peso. Cuando la cantidad de agua agregada al cemento forma una pasta en donde la profundidad de penetración de la sonda de Tetmajer en el aparto de Vicat llega 10 mm +/- 1 se logra la pasta de consistencia normal. El % de agua necesario para lograr la pasta de consistencia normal generalmente está entre 26 y 33 (expresada como porcentaje por masa de cemento seco) para un cemento Pórtland normal. En la

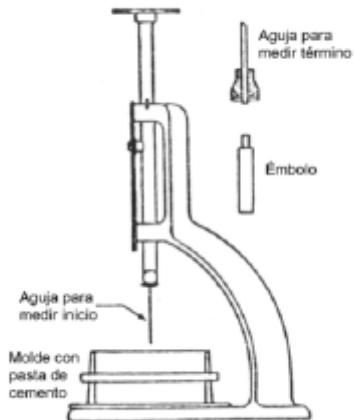


Figura 6: Esquema del aparato de Vicat.

3. TIEMPO DE FRAGUADO

Este término se emplea para describir el endurecimiento de la pasta de cemento. En sentido amplio, se refiere al cambio del estado fluido al estado sólido. El fraguado se debe principalmente a la hidratación selectiva del C₃A y del C₃S, acompañada de una elevación de la temperatura de la pasta de cemento. El fraguado inicial corresponde a un incremento rápido, y el fraguado final a la temperatura pico. Los fraguados inicial y final deben diferenciarse del falso fragüe, que ocurre a veces a los pocos minutos de mezclarse con agua.



Durante un falso fragüe no se desprende calor alguno y el hormigón puede remezclarse sin añadir agua y volver al estado fluido. El fraguado instantáneo en cambio se caracteriza por la liberación de calor y es un proceso irreversible.

Para determinar el tiempo de fraguado inicial es necesario emplear nuevamente el aparato de Vicat, esta vez con una aguja de 1 mm de diámetro, penetrando en una pasta de consistencia normal. Cuando la aguja queda retenida a 5 mm del fondo o sea de la placa de vidrio en donde se apoya el molde, se considera que ocurre el fraguado inicial (el tiempo se mide a partir de agregar al cemento, el agua para la mezcla). Se prescribe en la norma IRAM; un tiempo mínimo de 45 min para cementos de uso general (IRAM 50000).

El tiempo de fraguado final se considera que se produce cuando la aguja no deja huella en la superficie de la pasta. Las normas británicas y las Argentinas prescriben un tiempo máximo de 10 horas para el fraguado final de cementos Portland, igual al que prescriben las normas estadounidenses.

La relación aproximada entre los períodos inicial y final de fraguado (excepto para cemento con alto contenido de alúmina) es la siguiente:

$$\text{Tiempo final (min)} = 90 + 1.2 \text{ [tiempo inicial (min)]}$$

Puesto que la temperatura afecta los tiempos de fraguado, las normas indican la temperatura y la humedad en la que el ensayo debe realizarse.

4. ESTABILIDAD DIMENSIONAL

Es esencial que la pasta de cemento fraguado no sufra cambios notables de volumen, que en condiciones especiales puede ocasionar ruptura de la pasta endurecida. Esta expansión puede ocurrir debido a reacciones de cal activa, magnesio y sulfato de calcio. Los cementos que presentan este tipo de expansión son clasificados como cementos no sólidos.

La cal libre está presente en las clinkers y se intercristaliza con otros componentes; por tanto, se hidrata con gran lentitud, ocupando un volumen mayor que el óxido de calcio libre original. La cal libre o activa no puede determinarse mediante análisis químicos del cemento, porque no es posible distinguir entre el CaO que no ha reaccionado y el Ca(OH)₂ producido por la hidratación parcial de los silicatos cuando el cemento es expuesto a la atmósfera.

El magnesio reacciona con el agua de modo similar al CaO, pero sólo la forma cristalina reacciona perjudicialmente y provoca expansiones. El sulfato de calcio es el tercer componente capaz de causar expansión por la formación de sulfoaluminato de calcio (estringita) a partir del exceso de yeso (no consumido por el C₃A).

La norma IRAM 1620 (y la ASTM C 151-84) especifica la prueba de autoclave, que es sensible tanto al magnesio como a la cal libres. Así, una muestra, de tamaño conocido, de pasta simple de cemento se cura en aire húmedo durante 24 horas y después se calienta con vapor a alta presión [2 MPa] durante una hora aproximadamente, hasta alcanzar una temperatura de 214 °C. Después de conservar esa temperatura y presión durante tres horas más, el autoclave se enfriá hasta que la presión baje a 1.5 y la autoclave se enfriá en agua hasta llegar a 23 °C en 15 min. Cuando transcurren otros 15 min se mide el tamaño de la muestra; la expansión resultante no debe exceder 1 % del tamaño original. Esta prueba acel-



rada sólo proporciona, en la práctica, una indicación general del riesgo de la expansión en el largo plazo.

No hay pruebas disponibles para detectar la expansión debido a un exceso de sulfato de calcio, pero su contenido puede determinarse fácilmente mediante un análisis químico.

5. RESISTENCIA

El ensayo de resistencia del cemento, no se hace con en la pasta de consistencia normal debido a las dificultades para obtener buenas muestras. Para determinar la resistencia del cemento se emplea un mortero de cemento y con una arena normalizada.

Hay varias formas de pruebas de resistencia: a la tracción, a la compresión y a la flexión. En los últimos años, la prueba de compresión ha remplazado gradualmente a la prueba de tracción, por lo que no hablaremos de ella. Sin embargo, la norma ASTM C 190-82 aún describe el método de prueba de briquetas a tracción. Hay dos métodos ingleses para probar la resistencia de compresión del cemento: uno emplea mortero, el otro, hormigón (BS 4550: Parte 3: Sección 3.4: 1978). La prueba de mortero se encuentra en la Norma IRAM 1622, se requiere una mezcla de 1: 3: 0,5 de cemento–arena-agua,. La arena utilizada es normalizada al igual que los procedimientos de mezclado, curado y las etapas del ensayo para la determinación de la resistencia. Las normas Argentinas para cementos de uso general (IRAM 50000) y para cementos con propiedades especiales (IRAM 50001) establecen tres categorías de cementos en función de la resistencia a la compresión como se ilustra en la tabla N° 5

Tabla 5

Categoría	Resistencia a la compresión (Mpa)				Método de ensayo
	2 días	7 días	28 días		
CP30	-	Min. 16	Min. 30	Max. 50	IRAM 1622
CP40	Min. 10	-	Min.40	Max.60	
CP50	Min. 20	-	Min.50	-	

TIPOS DE CEMENTO PORTLAND

Hasta ahora hemos considerado al cemento Portland como material genérico. Sin embargo, cuando los cementos con diferentes composiciones químicas se hidratan, pueden tener propiedades distintas. Es posible, por tanto, seleccionar mezclas de materias primas para la producción de varios tipos de cementos, según las propiedades requeridas. De hecho, diversos tipos de cementos Portland están disponibles comercialmente y pueden producirse cementos con propiedades especiales para usos específicos. En la tabla 6 se enumeran los principales tipos de cementos para uso general propuesta en la norma IRAM 50000, y en la tabla N° 8 se muestran las propiedades especiales los cementos (IRAM 50001)



Tabla 6 Cementos para uso general (IRAM 50000)

Tipo de Cemento	Nomenclatura	composición (g/100g)			
		Clinker + sulfato de calcio	Puzolan a (P)	Escoria (E)	filler calcáreo (F)
Cemento pórtland normal	CPN	100-90		0 -10	
Cemento pórtland con Filler calcáreo	CPF	99-80			1-20
Cemento pórtland con escoria	CPE	89-65		11-35	
Cemento pórtland compuesto	CPC	98-65	Dos o más, con P+E+F ≤35		
Cemento pórtland puzolánico	CPP	85-50	15-50		
Cemento de alto hormo	CAH	65-25		35-70	

Tabla 7 Cementos con propiedades especiales

Denominación	Nomenclatura
De alta Resistencia Inicial	ARI
Altamente Resistente a los Sulfatos	ARS
Moderadamente Resistente a los Sulfatos	MRS
De Bajo Calor de Hidratación	BCH
Resistente a la Reacción Álcalis Agregado	RRAA
Blanco	B

Para asegurar la durabilidad del hormigón en diversas condiciones se han desarrollado muchos cementos. Sin embargo, no ha sido posible encontrar en la composición del cemento una respuesta completa a los problemas de durabilidad del hormigón. Las propiedades físicas y mecánicas más importantes del hormigón endurecido como resistencia, contracción, permeabilidad, resistencia al intemperie y flujo plástico, también son afectadas por factores distintos a la composición del cemento, aunque ésta determine, en alto grado, el índice de incremento de la resistencia. En la figura 7 se muestra el índice general de desarrollo de resistencia de hormigones hechos con cementos de diferentes tipos: mientras los porcentajes varían considerablemente, hay poca diferencia en la resistencia a 90 días en todos los casos.

La tendencia general para cementos con una tasa lenta de endurecimiento es alcanzar una mayor resistencia final . Por ejemplo, el cemento Portland de bajo calor de hidratación tiene la resistencia más baja a los 28 días; pero desarrolla una resistencia mayor al cabo de cinco años. Sin embargo, cabe destacar que estas tendencias son, hasta cierto punto, influidas por cambios en las proporciones de la mezcla. Sólo en las primeras etapas de hidratación se encuentran diferencias significativas en las propiedades físicas importantes de los cementos de diversos tipos; en las pastas bien hidratadas las diferencias son mínimas.



La división de cementos en tipos diferentes no es más que una clasificación burda y pueden existir notorias diferencias entre cementos nominalmente del mismo tipo. Por otro lado, a menudo no existen diferencias radicales entre las propiedades de diversos tipos de cementos mientras que algunos pueden ser clasificados en más de un tipo.

Obtener alguna propiedad deseada en el hormigón puede tener consecuencias no deseadas en otros aspectos. Por ello, es necesario hacer un balance de requerimientos, así como tener en cuenta el aspecto económico de la elaboración.

Los métodos de fabricación han mejorado con los años y se ha dado un desarrollo continuo de cementos para diferentes propósitos, con el correspondiente cambio en las especificaciones.

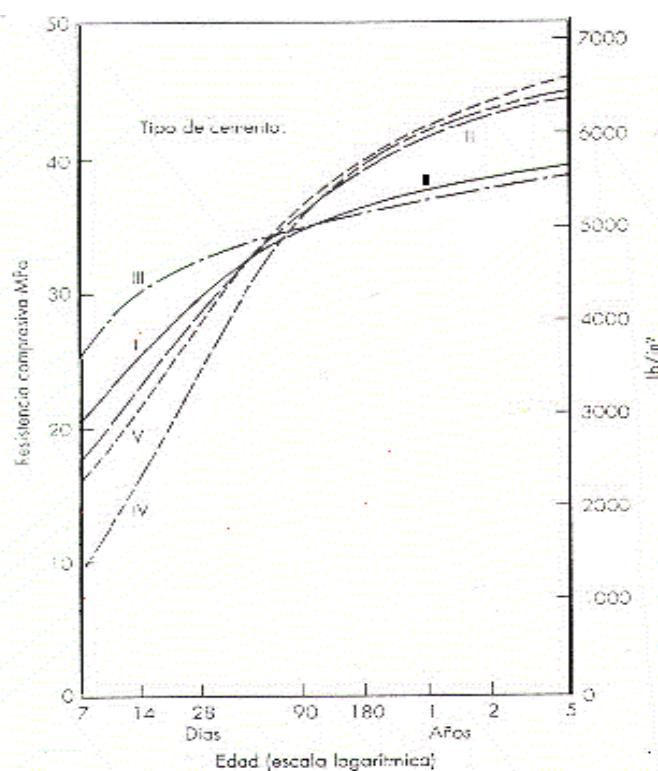


Figura 7: Desarrollo de la resistencia de un hormigón con contenido de 335 Kg de cemento por metro cúbico hechos con cementos de distintos tipos: Normal (I), Modificado (II), de endurecimiento rápido (III), de bajo calor de hidratación (IV). Fuente: “Concrete Manual”⁷

TIPOS DE CEMENTOS PARA USO GENERAL

1. CEMENTO PORTLAND NORMAL (CPN) (o COMÚN (TIPO I))

Este es el cemento más empleado en construcciones de hormigón en donde no hay exposición a sulfatos presentes en suelo o agua puras en contacto con la estructura, es decir en donde no hay requerimientos especiales ni para la colocación, ni de durabilidad y/o resistencia.



A través de los años ha habido cambios en las características del cemento Portland normal, los cementos modernos tienen mayor contenido de C₃S y mayor finura que los de hace 40 años; en consecuencia, los cementos modernos tienen mayor resistencia a los 28 días, aunque la última ganancia de resistencia es menor. Una consecuencia práctica de esto es que no podemos esperar una "mejoría con el tiempo". Éste es un aspecto importante que no se debe olvidar, puesto que las especificaciones de construcción se relacionan por lo general con la resistencia del hormigón a los 28 días. Más aún, empleando un cemento de alta resistencia temprana para un hormigón con especificación de resistencia a 28 días, es posible emplear una mezcla más pobre en cemento y con mayor relación de agua/cemento. Algunas de estas mezclas no tienen una adecuada durabilidad.

El cemento Portland normal es un excelente cemento de aplicación general y el más ampliamente usado.

2. CEMENTO PORTLAND CON ESCORIAS (CPE)

Este cemento se elabora moliendo o mezclando juntos clinker de cemento Portland con escoria. La cantidad de clinker y yeso de acuerdo con la Norma IRAM 50000, debe estar entre 89 y 65 % de la masa de la mezcla. La escoria granulada de alto horno es un material granular vítreo formado cuando la escoria de alto horno en estado líquido es enfriada bruscamente. En la elaboración de los cementos definidos en la norma IRAM 5000, se utilizan escorias que cumplen los requisitos establecidos en la norma IRAM 1667. Las características de este tipo de cemento son similares al del cemento de Alto horno. Se lo puede utilizar en construcciones de cualquier tipo es decir en donde no hay requerimientos especiales ni para la colocación, ni de durabilidad y/o resistencia. En general este cemento le puede conferir al hormigón baja permeabilidad y mayor resistencia a larga edad.

3. CEMENTO PÓRTLAND CON FILLER CALCÁREO (CPF)

También se lo denomina comúnmente cemento fillerizado. Se obtiene de la molienda de clinker Pórtland y material calcáreo, con la adición de pequeñas cantidades de yeso como regulador del fraguado. El contenido de material calcáreo, de calidad especificada puede variar desde 1 hasta 20%. El Filler calcáreo es un material de naturaleza inorgánica y origen mineral carbonatado, compuesto principalmente por carbonato de calcio. En la elaboración de los cementos se debe utilizar material calcáreo que cumpla con los requisitos establecidos en la Norma IRAM 1593.

Este cemento permiten lograr mezclas más trabajables pero generalmente demanda más cantidad de agua. Cuando se lo utiliza se debe de tener en cuenta proveer un buen curado al hormigón.

Su uso no esta recomendado para medios agresivos (como suelos y aguas con sulfatos, ataque ácido, sales y ambientes marinos).

4. CEMENTO PÓRTLAND COMPUESTO (CPC)

Es un conglomerante hidráulico obtenido por molienda de clinker Portland y dos o más de estos constituyentes: escoria de alto horno, puzolana y material calcáreo, con la adición de pequeñas cantidades de sulfato de calcio. El total de los distintos componentes minerales no deben supera el 35 %, según lo establecido por Norma 50000



Las principales características de este cemento son:

- Resistencia mecánica a largo plazo superiores a la de un cemento Pórtland normal de la misma categoría de resistencia.
- Mayor trabajabilidad garantizada por la alta tecnología de producción.
- Mejor comportamiento frente a la reacción álcali-agregado.
- Menor calor de hidratación.

Se recomienda extremar recaudos en lo referente a la protección y el curado durante la etapa de hormigonado a bajas temperaturas y en presencia de aditivos con efectos retardadores del fraguado.

5. CEMENTO PÓRTLAND PUZOLÁNICO (CPP)

Se obtiene de la molienda de clinker de Cemento Pórtland, puzolana y yeso como regulador de fraguado. La norma IRAM 50000 establece un % de puzolanas entre el 15 y el 20. Los materiales puzolánicos son sustancias naturales o industriales silíceas o silicoaluminosas o una combinación de ambas, que en sí mismo no posee valor cementante, pero que lo tendrá si se lo muele finamente y esta en presencia de humedad. Reacciona a temperaturas normales y tiene reacciones químicas con la cal (liberada por la hidratación del cemento Portland), por lo cual se forman compuestos con propiedades aglutinantes. Por regla general, los cementos Portland puzolánicos generan una resistencia lenta y, por tanto, requieren curado durante un periodo comparativamente largo.

Algunas características que se pueden lograr con el uso de CPP son:

- Resistencia mecánica a largo plazo superiores a la de un cemento Pórtland normal de la misma categoría de resistencia .
- Más resistente a los medios químicamente agresivos.
- Menor calor de hidratación.
- Mejor comportamiento frente a la reacción álcali agregado.
- Permite producir hormigones más compactos y resistentes al ingreso de fluidos agresivos.

Para su aplicación se recomienda extremar recaudos en lo referente a curado particularmente en condiciones de tiempo frío y en presencia de aditivos con efectos retardadores de fraguado. Es especialmente recomendado para obras hidráulicas, hormigones masivos, fundaciones y estructuras en medios agresivos.

Los cementos puzolanas suelen ser más baratos que el cemento Portland normal, al cual sustituyen, pero su ventaja principal radica en su hidratación lenta y, por tanto, en su bajo índice de desarrollo de calor. De aquí que el cemento Portland puzolánico se use en construcciones de hormigón masivos.



6. CEMENTO PORTLAND DE ALTO HORNO (CAH)

Este cemento se elabora moliendo o mezclando juntos clinker de cemento Portland con escoria de alto homo granulados en proporciones de 35 al 75 %. La escoria es un producto de desperdicio en la fabricación de hierro lo que implica un menor consumo de energía en la elaboración del cemento. La escoria contiene cal, sílice y álumina, pero no en la misma proporción que en el cemento Portland y su composición puede variar considerablemente.

La hidratación de la escoria se inicia cuando la cal liberada por la hidratación del cemento Portland produce la alcalinidad correcta; la hidratación subsecuente ya no depende de la cal. El cemento de alto horno es semejante al cemento Portland normal, si consideramos finura, tiempos de fraguado y expansión en autoclave. Sin embargo, su resistencia temprana generalmente es menor que la del cemento normal las resistencias posteriores son semejantes. Su uso típicos es en hormigones masivos, debido al bajo calor de hidratación, y en construcciones marinas, por su mayor resistencia al sulfato (debida al menor contenido de C₃A), con respecto al cemento Portland normal. Las escorias con bajo contenido de álcali pueden usarse también para la elaboración de hormigones con agregados de los que se sospecha que reaccionan al álcalis.

CEMENTOS CON PROPIEDADES ESPECIALES

1. CEMENTO DE ALTA RESISTENCIA INICIAL

Los cementos de alta resistencia inicial tienen una superficie específica mayor que la de los cementos Pórtland normal, el valor debe ser mayor a 400 m²/g, lo que permite acelerar los procesos químicos. Los requisitos de resistencia especificados en la norma IRAM 50001 se ilustran en la tabla N°8

Tabla 8

Edad (días)	Resistencia a la compresión (Mpa) Mayor o igual que:
1	10
2	20
3	27
7	40
28	50

Son utilizados cuando se desea desencofrar rápidamente, como en el caso de fabricas d elementos prefabricados o pretensados o se necesita habilitar una obra en poco tiempo, "Fast Track", no debe emplearse en construcciones de hormigón masivos, ni en grandes secciones estructurales, debido a su alto índice de desarrollo de calor. Por otra parte, para construcción a bajas temperaturas, el uso de este cemento puede dar un margen de seguridad satisfactorio contra daños por congelamiento a temprana edad.



2. CEMENTO RESISTENTE A LOS SULFATO (MRS) (ARS)

Este cemento tiene un bajo contenido de C_3A para evitar el ataque sulfato desde el exterior del hormigón; de otra manera, la formación de sulfoaluminato de calcio pueden ocasionar rotura del hormigón debida al incremento de volumen de los componentes resultantes. Las sales más activas son el sulfato de magnesio y de sodio. El sulfato ataca con mayor rapidez si la estructura se moja y se seca en forma alternativa, como en el caso de estructuras marinas expuestas a la marea o a chapoteo.

Para obtener la resistencia al sulfato, el contenido de C_3A en estos cemento esta limitado por la norma IRAM 50001 y se los puede clasificar como cementos altamente resistente a los sulfatos (ARS) o cementos moderadamente resistente a los sulfatos (MRS), según se indica en la tabla 9.

El calor desarrollado por el cemento resistente al sulfato no es mucho mayor que el del cemento de bajo calor, lo cual es una ventaja; pero el costo del primero es más alto, debido a la composición especial de las materias primas. Por ello, en la práctica, el cemento resistente al sulfato sólo debe requerirse cuando sea necesario; no es un cemento de uso general, su uso se recomienda para estructuras que estarán en contacto con aguas con sulfato, como las de mar o suelos con sulfatos.

Tabla 9

Tipo de Cemento	Propiedad	Cementos Altamente Resistente a los Sulfatos - ARS -	Cementos Moderadamente Resistente a los Sulfatos - MRS -
CPN	Contenido de Aluminato tricalcico C_3A en el <u>cemento</u>	$\leq 4,0$	≤ 8
	Contenido de Aluminato tricalcico más Aluminoferrito tetracalcico en el <u>cemento</u> ó Aluminoferrito tetracalcico más ferrito dicálcico ($C_4AF + FC_2$) en el <u>cemento</u>	$\leq 22,0$	-----
CPC, CPF,CPE, CAH o CPP	Contenido de Aluminato tricalcico C_3A en el <u>clinker</u>	$\leq 4,0$	-----
	Contenido de Aluminato tricalcico más Aluminoferrito tetracalcico en el <u>clinker</u> ó Aluminoferrito tetracalcico más ferrito dicálcico ($C_4AF + FC_2$) en el <u>clinker</u>	$\leq 22,0$	-----

Nota: método de ensayo IRAM 1504

3. CEMENTO DE BAJO CALOR DE HIDRATACIÓN (BCH)

Desarrollado en Estados Unidos de América para usarse en grandes e importantes presas de gravedad, tiene un bajo calor de hidratación. Tanto la ASTM C 150-84 como la BS 1370: 1979 limitan el calor de hidratación a 250 J/g en un periodo de siete días y de 290 J/g a los 28 días, la IRAM a 270 J/g a 7 días y 310 J/g a los 28 días.



Debido al contenido más bajo de C₃S y C₃A, hay un desarrollo de resistencia más lento que en el cemento Portland normal, aunque la resistencia final no es afectada.

Se utiliza especialmente en presas, grandes fundaciones, no es recomendable utilizarlos en tiempo frío ni cuando se requiere una elevada resistencia a edad temprana.

4. CEMENTO RESISTENTE A LA REACCIÓN ÁLCALIS – AGREGADO

Los cementos resistentes a la reacción álcalis agregados son cementos con bajo contenido de álcalis. Para evaluar la propiedad del cemento se realiza un ensayo basado en la expansión desarrollada en barras de mortero preparadas con mezclas de cementos y aditivos, estacionadas en condiciones especiales (IRAM 1648) se determina en % la expansión a las edades de 14 y 56 días. El hecho de que un aditivo mineral (para el cemento) sea efectivo para prevenir una excesiva expansión causada por la reacción alcali- arido no es condición suficiente para medir su aptitud de uso como aditivo para hormigón. Si no que debe además satisfacer los requisitos establecidos por clase de aditivo, por ejemplo las puzolanas deben cumplir con la norma IRAM 1668

La norma IRAM 50001 Establece los siguientes requisitos específicos para los cementos resistentes a la reacción álcali- agregado:

Tabla 10

Tipo de Cemento	Propiedad Expansión	Unidad	Requisito	Método De Ensayo
CPN, CPF o CPC	Edad: 14 días	%	≤ 0,020	IRAM 1648
	Edad: 56 días		≤ 0,060	

5. CEMENTOS BLANCO

Para fines arquitectónicos, en algunas ocasiones se requiere hormigón blanco o, en países tropicales, un acabado de color pastel. Para estos propósitos se usa cemento blanco. Se emplea además por su bajo contenido de álcalis solubles, que permite evitar la oxidación. El cemento blanco contiene pocos óxidos de hierro y manganeso. Se muele con bolas de cuarzo además se requieren precauciones especiales para evitar que se contamine. Por eso, el costo del cemento blanco es alto. Debido a esto el hormigón blanco se usa con más frecuencia para fachadas bien adheridas, sobre el hormigón común como base.

La norma IRAM 50001 establece los siguientes requisitos específicos para los cementos blancos

Tabla 11

Tipo de Cemento	Propiedades	Unidad	Requisito	Método de ensayo
CPN, CPF o CPC	Contenido dde Fe ₂ O ₃	%	≤ 0,50	1504
	Contenido de Mn ₂ O ₃		≤ 0,10	
	Blancura		> 70	1618



OTROS CEMENTOS

Se han desarrollado muchos cementos para usos especiales, en particular cemento hidrofóbico, cemento antibacteriano, etc. Éstos rebasan el propósito de este apunte y remitimos a la bibliografía, para mayor información al respecto. Abordaremos los siguientes cementos:

- **CEMENTOS EXPANSIVOS:** Por muchas razones puede ser ventajoso usar un cemento que no cambie de volumen por contracción al secarse (y que no se fracture) o, en casos especiales, incluso se expanda durante el fraguado. El hormigón que contiene este tipo de cemento se expande en los primeros días de vida, y al restringirse esa expansión se logra esfuerzos en el acero y se obtiene uno pretensado: el acero es puesto en tensión y el hormigón, en compresión. La restricción también puede lograrse con medios externos. Debe mencionarse que el uso de cemento expansivo no puede producir hormigón sin contracción, puesto que la contracción ocurre después de concluido el curado; pero la magnitud de la expansión puede ajustarse para que ésta y la contracción subsecuente sean iguales y opuestas.
- **PUZOLANAS:** El empleo de puzolanas en cementos Portland-puzolana se mencionó anteriormente junto con la definición del término. Los materiales típicos de este tipo son ceniza volcánica (la puzolana original), pumicita, esquistos de opalina, tierra diatomacea calcinada, arcilla quemada y ceniza de combustible pulverizada (CCP). Para evaluar la actividad de la puzolana con cemento, se debe medir el índice de actividad de la puzolana; de acuerdo con la ASTM C 618-84, esta es la relación de resistencia a la compresión de la mezcla con una sustitución específica de cemento por puzolana con la resistencia de mezcla sin sustitución. La puzolana artificial más común es la ceniza volante o ceniza de combustible pulverizada, que se obtiene por medios electrostáticos o mecánicos a partir de gases de calderas de los hornos de estaciones que emplean carbón como fuente de energía. Las partículas de cenizas de combustible pulverizadas son esféricas y, por lo menos, de la misma finura que el cemento, de manera que el sílice está listo para reaccionar. La uniformidad de las propiedades es importante. .
- **CEMENTO CON ALTO CONTENIDO DE ALÚMINA:** Se produce a partir de cal o tiza y bauxita, esta última formada por alúmina hidratada; óxidos de hierro y titanio; y pequeñas cantidades de sílice. Las materias primas, una vez molidas, se calientan hasta el punto de fusión, de aproximadamente 1600 °C el producto del proceso se enfriá y fragmenta antes de molerse, hasta lograr una finura de 250 a 320 m²/ kg. La gran dureza de las escorias, junto con el alto costo inicial de la bauxita y la alta temperatura de fusión, hacen resulte caro.
- **CEMENTO IRAM 50.005:** Cemento para hormigón de uso vial, aplicable con maquinarias especiales en las cuales se coloca un importante volumen de hormigón en poco tiempo, además la maquina compacta, le da la textura superficial al hormigón



- CEMENTO DE ALBAÑILERIA: Este tipo de cemento esta regulado por la norma IRAM 1685, se realiza mediante la mezcla de clinker, caliza finamente molida y yeso, puede tener aditivo incorporador de aire. Estos cementos tienen buena trabajabilidad y cohesión, haciéndolos aptos para los trabajos de albañilería.

DESIGNACIÓN DE LOS CEMENTOS

Es importante destacar que las normas IRAM actuales (IRAM 50000 y 50001) clasifican los cementos como se menciono anteriormente en función de categoría de resistencia, (30,40, ó 50), tipos de uso general y con las propiedades especiales, o sea podemos encontrar Cementos Portland Normal 50 ó Cemento Portland Normal 30 ó Cemento Portland Normal altamente resistente a los sulfatos 30. Es decir existen posibles combinaciones entre categoría de resistencia, tipos de cemento de uso general y propiedades especiales. De esta forma la designación se realizan con las dos primeras letras correspondientes al tipo de cemento (ejemplo CPN cemento Pórtland Normal), los dos dígitos siguientes indican la categoría de resistencia y entre paréntesis la ó las propiedades especiales que pudiera poseer. (ejemplo ARI, alta resistencia a los sulfatos).

Ejemplos:

- **CPP40(ARS,BCH,RRAA)** . Cemento Pórtland puzolánico, categoría 40, altamente resistente a los sulfatos, de bajo calor de hidratación y resistente a la reacción alcali-agregado.
- **CPN40(MRS)** Cemento Pórtland normal categoría 40 moderadamente resistente a los sulfatos
- **CPN50(ARI)** Cemento Pórtland normal categoría 50 de alta resistencia inicial

BIBLIOGRAFÍA

¹ <http://afcp.org.ar>

² http://www.cbb.cl/cementos/proceso_productivo.aspx?Id=1

³ <http://www.cement.org/basics/images/flashtour.html>

⁴ Videla. C. “Tecnología del Hormigón”. Depto. De Ingeniería y gestión de la Construcción. Universidad Católica de Chile. Año 2007

⁵ Videla. C. “Tecnología del Hormigón”. Depto. De Ingeniería y gestión de la Construcción. Universidad Católica de Chile. Año 2007

⁶ A.M. Neville Y J.J. Brooks, “Tecnología del Concreto”. Editorial Trilla. Año 1998

⁷ “Concrete Manual”- Denver Colorado, EEUU. Año 1975



⁸ Manuel Fernández Canova. “Hormigones”. Editorial Rgerte, Madrid. 1991.

⁹ Annual Book of ASTM Standards. 2000

¹⁰ Normas IRAM.

¹¹ F. P. Moroto, *et al.* “Microestructura del hormigón”. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 1989.

¹² Lic. M- Ponce de Di Maio. “Análisis de las etapas de fabricación del clinker de cemento portland a través de la microscopía”- Revista HORMIGÓN 1983.

¹³ Comisión Federal de Electricidad. “Manual de tecnología del concreto”. Editorial Limusa. 1994