

Capítulo 2

Cementos Portland, Cementos Adicionados y Otros Cementos Hidráulicos



Fig. 2-1. El cemento portland es un polvo fino que cuando se mezcla con el agua se convierte en un pegamento que mantiene los agregados unidos en el concreto. (IMG12628)

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio (Fig. 2-1). Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada, piedra machacada, pedrejón u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo.

La hidratación empieza cuando el cemento entra en contacto con el agua. En la superficie de cada partícula de cemento se forma una capa fibrosa que gradualmente se propaga hasta que se enlace con la capa fibrosa de otra partícula de cemento o se adhiera a las sustancias adyacentes. El crecimiento de las fibras resulta en rigidización, endurecimiento y desarrollo progresivo de resistencia. La rigidización del concreto puede reconocerse por la pérdida de trabajabilidad, la cual normalmente ocurre después de 3 horas de mezclado, pero es dependiente de la composición y finura del cemento, de cualquier aditivo usado, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura. Consecuentemente, el concreto fragua y se endurece.

La hidratación continúa desde que existan condiciones favorables de temperatura y humedad (curado) y espacio disponible para la formación de los productos de hidratación. A medida que la hidratación continúa, el concreto se vuelve más duro y resistente. Gran parte de la hidratación y del desarrollo de la resistencia ocurre a lo largo del primer mes, pero si hay humedad y temperatura adecuadas, continúa de manera más lenta, por un largo periodo. Se ha reportado el aumento continuo de resistencia, excediendo 30 años (Washa y Wendt 1975 y Word 1992).

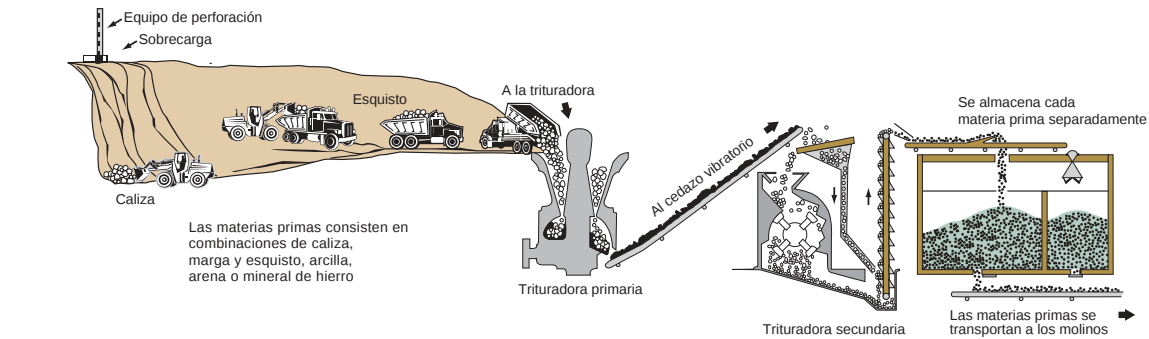
EL INICIO DE UNA INDUSTRIA

Los constructores antiguos usaban la arcilla para unir piedras para formar una estructura sólida de protección. El concreto más antiguo descubierto data de cerca de 7000 AC y fue encontrado en 1985, cuando se destapó un piso de concreto durante la construcción de una carretera en Yiftah El en Galilea, Israel. Éste consiste en un concreto de cal, preparado con caliza calcinada para producir cal rápida (cal viva, cal virgen), la cual al mezclarse con el agua y a la piedra, se endureció formando el concreto (Brown 1996 y Auburn 2000).

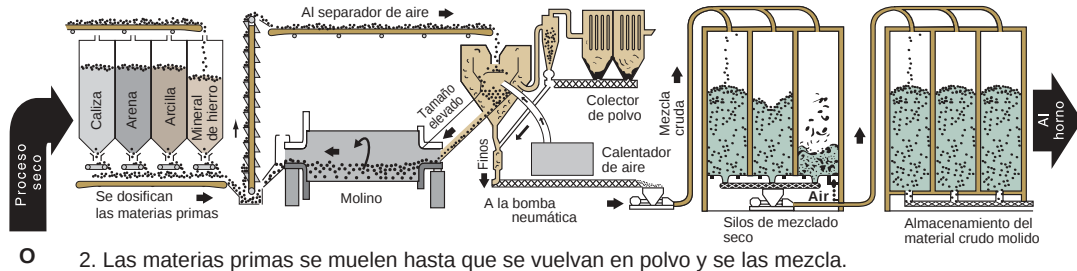
En aproximadamente 2500 AC, se empleó un material cementante entre los bloques de piedras en la construcción de la gran pirámide en Giza, en el Egipto antiguo. Algunos informes dicen que era un mortero de cal, mientras que otros dicen que el material cementante se produjo por la



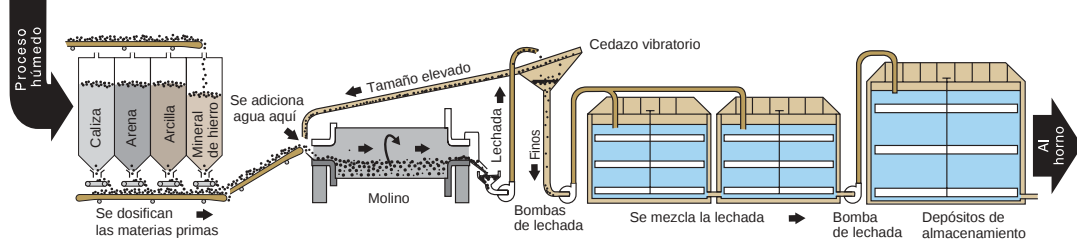
Fig. 2-2. Piedra de cantera de la isla de Portland (que inspiró el nombre de cemento portland) cerca de un cilindro del concreto moderno. (IMG12472)



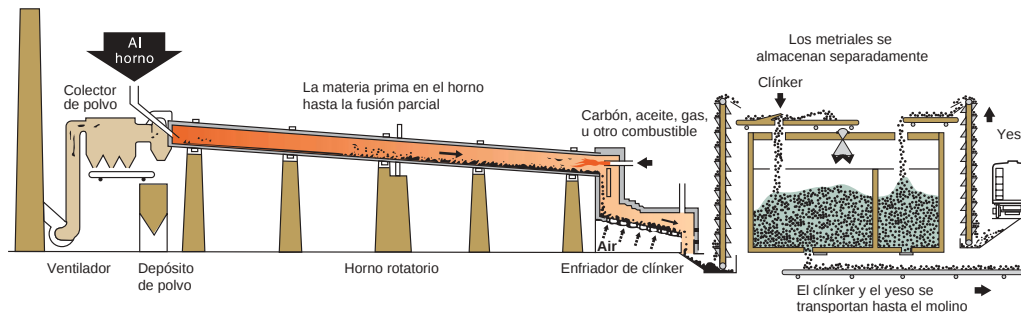
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm ($\frac{3}{4}$ pulg.) para entonces almacenarla.



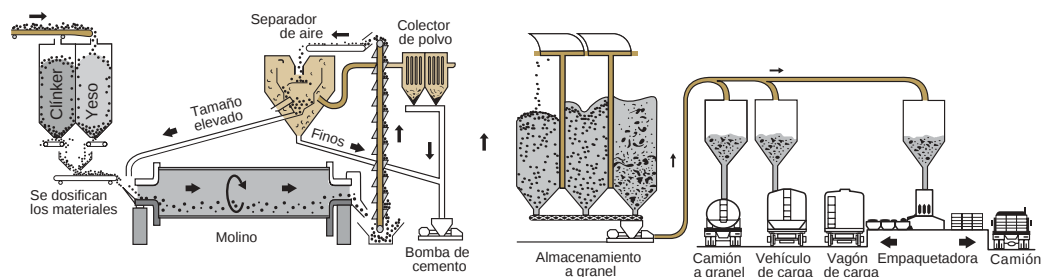
2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



2. Las materias primas se muelen, se mezclan con el agua para formar una lechada (pasta) y se mezclan.

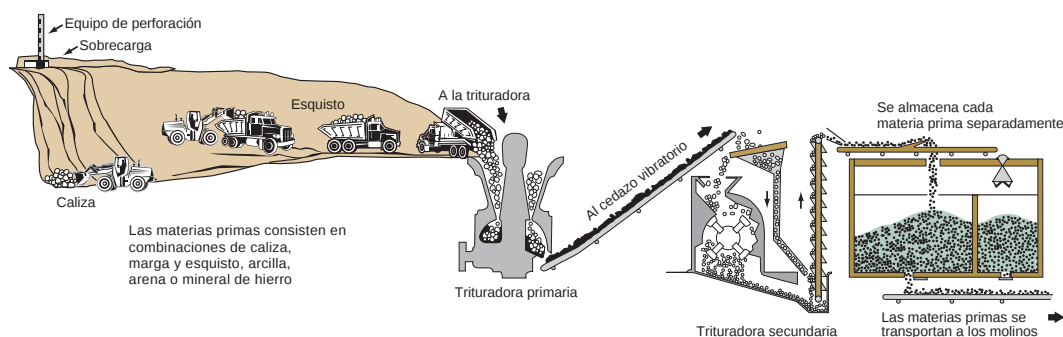


3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clinker de cemento.

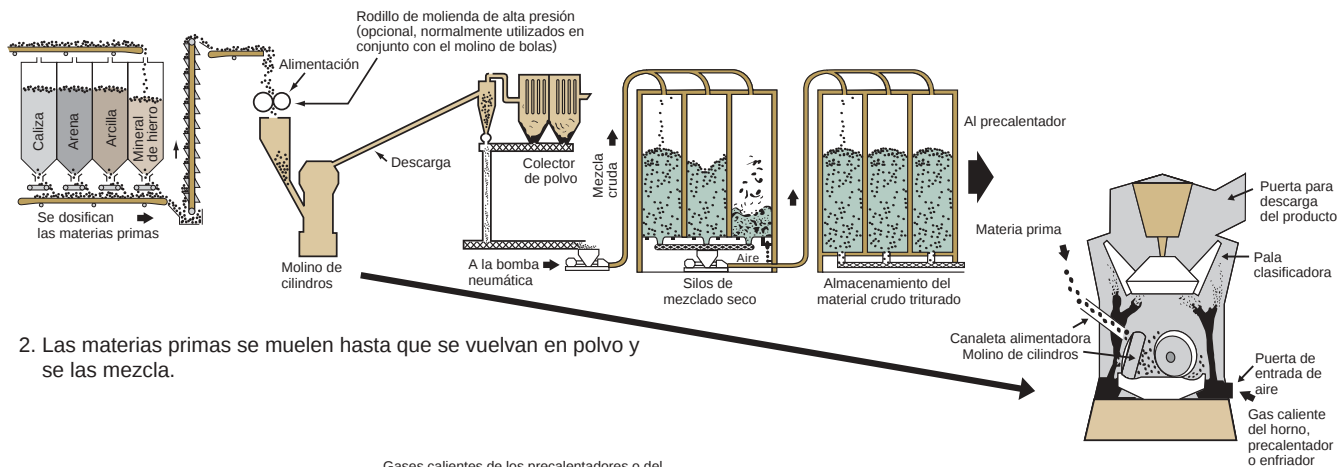


4. Se muele el clinker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

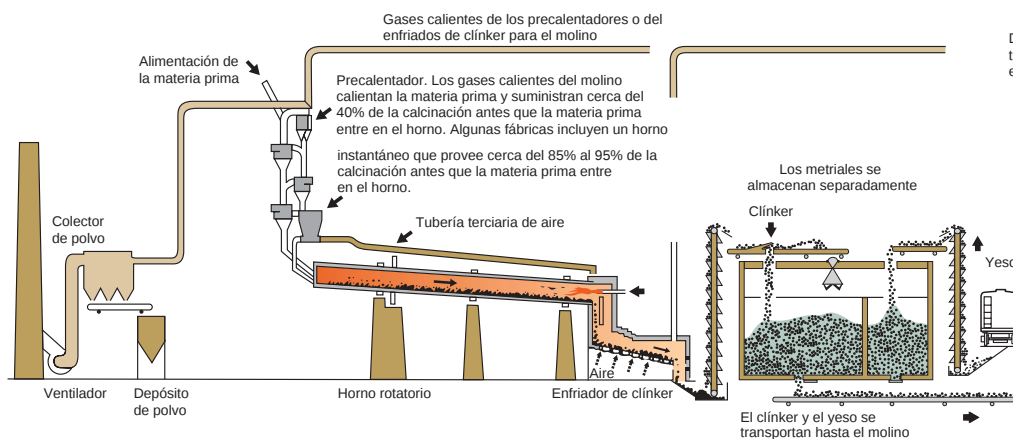
Fig 2-3. Etapas en la producción tradicional del cemento portland.



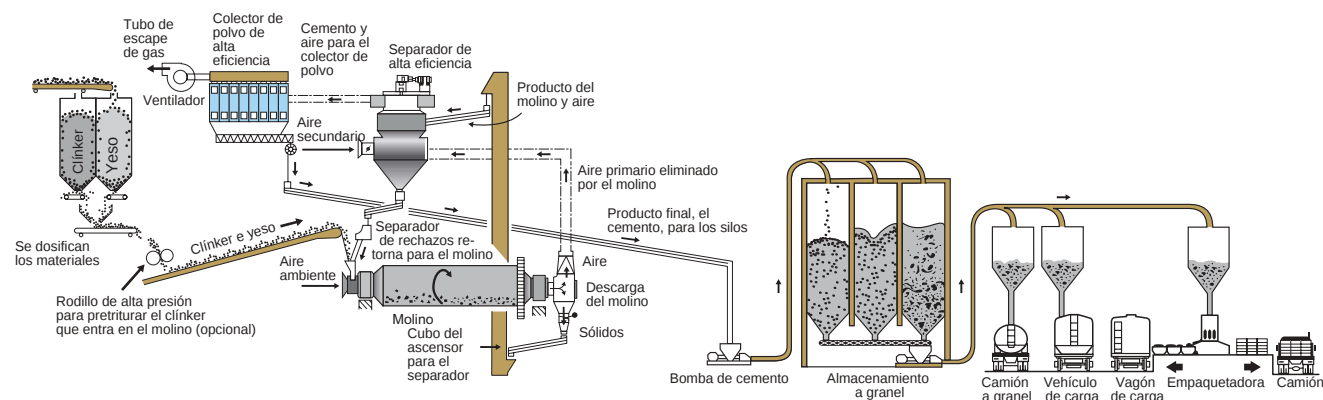
1. La roca se reduce primero hasta un tamaño de 125 mm (5 pulg.) y después a un tamaño de 20 mm ($\frac{3}{4}$ pulg.) para entonces almacenarla.



2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan en polvo y se las mezcla.



3. La calcinación transforma químicamente las materias primas en el clínker de cemento. Observe el precalentador de cuatro etapas, el horno instantáneo y el horno con menor longitud.



4. Se muele el clínker junto con el yeso para convertirlos en cemento portland y se lo despacha.

Fig. 2-4. Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco.

quema de sulfato de calcio. En 500 AC, el arte de la producción de morteros a base de cal llegó a Grecia antigua. Los griegos usaban materiales a base de cal como aglomerantes (conglomerantes) entre piedras y ladrillos y como material para una capa de revestimiento de calizas porosas normalmente usadas en la construcción de sus templos y palacios.

Fueron encontrados ejemplos del concreto del antiguo imperio romano, que datan de 300 AC. La palabra concreto es derivada del latín “concretus”, que significa crecido junto o compuesto. Los romanos perfeccionaron el uso de puzolanas como material cementante. En un momento del siglo II AC, los romanos extrajeron cenizas volcánicas cerca de Pozzuoli; pensando que era arena, la mezclaron con cal y descubrieron que la mezcla era mucho más resistente que las que se produjeron anteriormente. El descubrimiento tuvo un efecto importante en la industria de la construcción. El material no era arena, sino una ceniza volcánica fina, conteniendo sílice y alúmina, las cuales combinadas químicamente con la cal, producen lo que se llama cemento puzolánico.

Los constructores de los famosos muros de Roma, acueductos y otras estructuras históricas, incluyendo el teatro en Pompeya (con capacidad para 20,000 espectadores), el Coliseo y el Panteón en Roma usaron este material. Parece que la puzolana fue ignorada durante la edad media, cuando las prácticas de construcción eran mucho menos refinadas que las antiguas y la calidad de los materiales cementantes deteriorada. La práctica de calcinación de la cal y el uso de puzolanas no se usó nuevamente hasta el siglo XIV.

No se hicieron esfuerzos hasta el siglo XVIII para determinarse porque algunas cal poseían propiedades hidráulicas mientras que otras (aquellas producidas de calizas fundamentalmente puras) no las poseían. John Smeaton, frecuentemente llamado el “padre de la ingeniería civil en Inglaterra”, concentró su trabajo en este campo. Descubrió que las calizas impuras y blandas, conteniendo materiales arcillosos, producían los mejores cementos hidráulicos. Él ha empleado este cemento combinado con la puzolana, importada de Italia, en su proyecto para la reconstrucción del faro de Eddystone en el Canal de la Mancha, sudoeste de Plymouth, Inglaterra. El proyecto llevó tres años para que se terminara y la operación comenzó en 1759. Se ha reconocido esta obra como una importante realización en el desarrollo de la industria del cemento. Un gran número de descubrimientos se siguieron en la industria del cemento natural, provenientes de los esfuerzos direccionados para la producción de un material de calidad consistente.

La diferencia entre la cal hidráulica y el cemento natural es función de la temperatura alcanzada durante la calcinación. Además, una cal hidráulica puede hidratarse en una forma de “terrón”, mientras que los cementos naturales deben ser finamente molidos antes de la hidratación. El cemento natural es más resistente que la cal hidráulica, pero menos resistente que el cemento portland. El cemento

natural se fabricó en Rosendale, Nueva York en el inicio del siglo XIX (White 1820) y se empleó en la construcción del canal Erie en 1818 (Snell y Snell 2000).

El desarrollo del cemento portland es el resultado de la investigación persistente de la ciencia y la industria para producir un cemento natural de calidad superior. La invención del cemento portland se atribuye normalmente a Joseph Aspdin, un albañil inglés. En 1824, obtuvo la patente para este producto, al cual lo denominó cemento portland pues producía un concreto con color semejante a la caliza natural que se explotaba en la isla de Portland en el Canal de la Mancha (Fig. 2-2) (Aspdin 1824). Este nombre permanece hasta hoy y se usa en todo el mundo, con la adición de las marcas y nombres comerciales de sus productores.

Aspdin fue el primero en prescribir una fórmula para el cemento portland y el primero en patentarlo. Sin embargo, en 1845, I. C. Johnson de White and Sons, Swanscombe, Inglaterra, afirmó que había “quemado el cemento crudo con una temperatura extraordinariamente alta hasta que la masa casi se vitrificó”, produciendo un cemento portland como ahora lo conocemos. Este cemento se volvió la elección popular en la mitad del siglo XIX y se exportó de Inglaterra para varias partes del mundo. La producción también empezó en Bélgica, Francia y Alemania aproximadamente en el mismo periodo y la exportación de estos productos de Europa para los Estados Unidos comenzó en 1865. El primer embarque de cemento portland para los EE.UU. fue en 1868. El primer cemento portland producido en EE.UU. se fabricó en una planta en Coplay, Pensilvania, en 1871. La producción de cemento en Latinoamérica empezó al final del siglo XIX y principio del siglo XX: 1888 en Brasil, 1897 en Guatemala, 1898 en Cuba, 1903 en México, 1907 en Venezuela, 1908 en Chile, 1909 en Colombia, 1912 en Uruguay, 1916 en Perú, 1919 en Argentina, 1923 en Ecuador, 1926 en Paraguay, 1928 en Bolivia y más recientemente en 1936 en Puerto Rico, 1941 en Nicaragua y 1949 en El Salvador (Bowles, Taeves 1946).

PRODUCCIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

El cemento portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final.

Los materiales usados para la producción del cemento portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina e hierro. Durante la fabricación, se hace análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento.

Los diagramas en las Figuras 2-3 y 2-4 muestran las etapas de la fabricación del cemento. Como las operaciones



Fig. 2-5. Vista aérea de una planta de cemento. (IMG12442)

de las plantas de cemento no son básicamente iguales, no se pueden ilustrar adecuadamente por un mismo gráfico todas las plantas. No hay instalaciones típicas para la producción del cemento; cada planta tiene diferencias significativas en disposición, equipos o apariencia general (Fig. 2-5).



Fig. 2-6. Caliza, una de las principales materias primas, provee el calcio para la producción de cemento y se extrae cerca de la planta de cemento. (IMG12437)

Las materias primas seleccionadas (Tabla 2-1) se transportan de la cantera (Fig. 2-6), se trituran (Fig. 2-7), se muelen y se dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada. La harina cruda es generalmente una mezcla de material calcáreo (carbonato de

calcio), tal como la caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), tal como arcilla, pizarra (esquisto) o escoria de alto horno. El cemento se fabrica tanto por vía seca como por vía húmeda. En el proceso de vía seca, las operaciones de



Fig. 2-7. Las rocas extraídas son llevadas por los camiones hasta los triturados primarios. (IMG12436)

molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso vía húmeda los materiales se mezclan con agua en la forma de lechada. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares. La Figura 2-4 ilustra desarrollos tecnológicos importantes, los cuales pueden mejorar considerablemente la productividad y la eficiencia energética de las plantas con proceso seco.

Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno (Fig. 2-8). La harina cruda pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible (carbón, aceite nuevo o reciclado, fuel-oil, gas natural, llantas de goma y subproductos) se fuerza hacia la parte inferior del horno donde las temperaturas de 1400°C a 1550°C cambian químicamente el material crudo en clínker, pelotitas grises con tamaño predominante de canicas (Fig. 2-9). La Figura 2-10 muestra el proceso de producción del clínker desde la alimentación de la materia prima hasta el producto final.

Después de esto, el clínker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación, se adiciona una pequeña cantidad de yeso (Fig. 2-11) para controlar el tiempo de fraguado

Tabla 2-1. Fuentes de las Materias Primas Usadas y la Fabricación del Cemento Portland

Cal, CaO	Hierro Fe ₂ O ₃	Sílice SiO ₂	Alúmina Al ₂ O ₃	Yeso o Sulfato, CaSO ₄ ·2H ₂ O
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio*	Anhidrita
Aragonita*	Arcilla*	Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita*	Mineral de hierro*	Arcilla*	Roca calcárea	Yeso*
Polvo del horno de cemento	Costras de laminado*	Ceniza volante	Arcilla*	
Roca calcárea	Lavaduras de mineral	Greda	Escoria de cobre	
Creta	Cenizas de pirita	Caliza	Ceniza volante*	
Arcilla	Esquisto	Loes	Greda	
Greda		Marga*	Granodiorita	
Caliza*		Lavaduras de mineral	Caliza	
Mármol		Cuarcita	Loes	
Marga*		Ceniza de arroz	Lavaduras de mineral	
Coquilla		Arena*	Esquisto*	
Esquisto*		Arenisca	Escoria	
Escoria		Esquisto*	Estaurolita	
		Escoria		
		Basalto		

Nota: Muchos subproductos industriales tienen potencial como materia prima para la producción del cemento portland.

* Las fuentes más comunes



Fig. 2-8. Horno rotatorio para la manufactura del clinker de cemento. La foto menor, abajo y a la derecha trae una vista del interior del horno. (IMG12307, IMG12435)



Fig. 2-9. El clinker de cemento portland se forma por la calcinación en el horno del material crudo calcáreo y sílice. Este clinker específico tiene un diámetro de 20 mm ($\frac{3}{4}$ pulg.) (IMG12434)



Fig. 2-11. El yeso, la fuente de sulfato, se muele juntamente con el clinker para formar el cemento portland. El yeso ayuda a controlar el tiempo de fraguado, las propiedades de contracción (retracción) por secado y el desarrollo de resistencia. (IMG12489)

(fragüe) del cemento y para que se mejoren las propiedades de contracción (retracción) y el desarrollo de resistencia (Lerch 1946 y Tang 1992). En el molino, el clinker se muele tan fino que puede pasar, casi completamente, a través de un tamiz (cedazo) de 45 micrómetros (malla No. 325). Este polvo gris extremadamente fino es el cemento portland (Fig. 2-1).

TIPOS DE CEMENTO PORTLAND EN LOS EE.UU.

Se fabrican diferentes tipos de cemento portland para satisfacer a varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas. Los cementos portland se producen de acuerdo con las especificaciones ASTM C 150, AASHTO M 85 o ASTM C 1157.

La ASTM C 150, Especificaciones de Norma para el Cemento Portland (*Standard Specification for Portland Cement*), designa ocho tipos de cementos, usando los números romanos, como sigue:

Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo III	Alta resistencia inicial (alta resistencia temprana)
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
Tipo IV	Bajo calor de hidratación
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos

La AASHTO M 85, Especificaciones para el Cemento Portland (*Specification for Portland Cement*), también usa cinco designaciones para el cemento portland del I al V. Los requisitos de la M 85 son casi idénticos a los de la ASTM C 150. Las especificaciones de la AASHTO se usan por algunos departamentos de transporte estatales en lugar de las normas ASTM.

La ASTM C 1157, Especificaciones de Desempeño para los Cementos Hidráulicos (*Performance Specification for Hydraulic Cements*), trae seis tipos de cementos, conforme se discutirá más adelante en “Cementos Hidráulicos”.

Sigue una revisión detallada de los cementos de la ASTM C 150 y de la AASHTO M 85.

Tipo I

El cemento tipo I es un cemento para uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Sus empleos en concreto incluyen pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado (Fig. 2-12).

Tipo II

El cemento tipo II se usa donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos. Se lo puede utilizar en estructuras normales o en miembros expuestos a suelos o

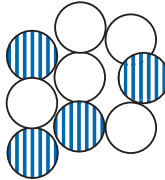
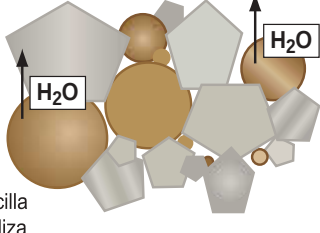
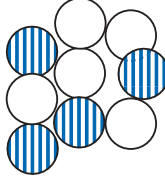
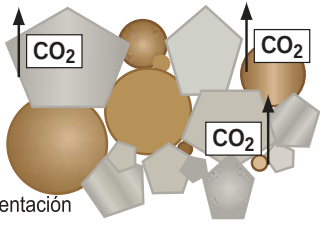
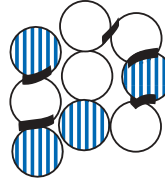
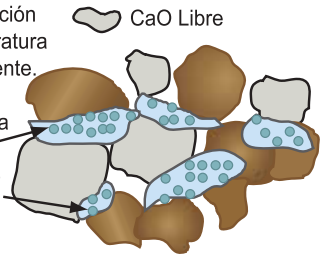
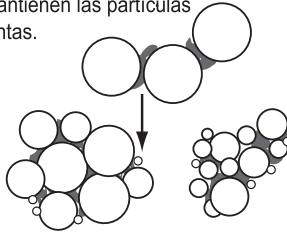
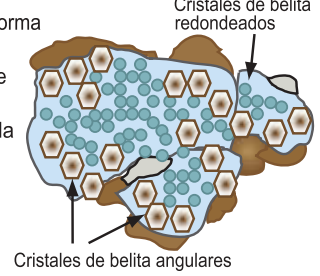
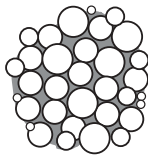
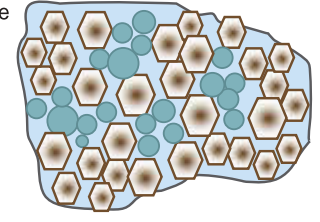
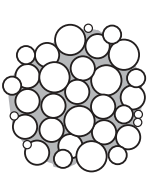
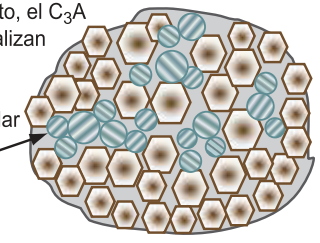
Sección	Vista del horno	Proceso de nodulización	Reacción de clinkerización
A 700°C Las materias primas son un polvo de flujo libre		Las partículas son sólidas. No hay reacción entre las partículas. 	Hay pérdida de agua. La arcilla deshidratada se recrystaliza.  ● Partícula de arcilla ■ Partícula de caliza
700-900°C El polvo aun fluye libremente		Las partículas aun son sólidas. 	A medida que la calcinación continua, la cal libre aumenta. La sílice reactiva combina con el CaO para empezar a formar C ₂ S. La calcinación mantiene la temperatura de alimentación en 850°C. 
1150-1200°C Las partículas empiezan a ser "pegajosas"		Las reacciones empiezan entre las partículas sólidas. 	Cuando la calcinación termina, la temperatura se eleva rápidamente. Los cristales pequeños de belita se forman por la combinación de silicatos con CaO. 
1200-1350°C Las partículas comienzan a aglomerarse, ellas se mantienen juntas por el líquido. La rotación del horno empiezan la cocción de los aglomerantes		Las fuerzas capilares del líquido mantienen las partículas juntas. 	La fase líquida se forma cuando la temperatura excede 1250°C. El líquido permite la reacción entre la belita y el CaO libre, formando alita.  Cristales de belita redondeados Cristales de belita angulares
1350-1450°C La aglomeración de las partículas continua a medida que el material cae encima uno del otro		Si hay líquido suficiente, se forman nódulos  La insuficiencia de líquido producirá un clinker polvoriento. 	La cantidad de cristales de belita disminuye y su tamaño aumenta. El tamaño y la cantidad de alita aumentan. 
Enfriamiento		Los nódulos de clinker no cambian durante el enfriamiento 	Bajo el enfriamiento, el C ₃ A y el C ₄ AF se cristalizan en la fase líquida. La estructura lamilar aparece en los cristales de belita. 

Fig. 2-10. Proceso de producción del clinker de la materia prima al producto final.



Fig. 2-12. El uso típico del cemento normal o el uso general incluye (de la izquierda a la derecha) pavimentos de autopistas, pisos, puentes y edificios. (IMG12488, IMG12487, IMG12486, IMG12485)

agua subterránea, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal pero no severa (consulte la Tabla 2-2 y las Fig. 2-13 a 2-15). El cemento tipo II tiene propiedades de moderada resistencia a los sulfatos porque contiene no más del 8% de aluminato tricálcico (C_3A).

Los sulfatos en suelos húmedos o en agua penetran en el concreto y reaccionan con el C_3A hidratado, ocasionando

expansión, descascaramiento y agrietamiento del concreto. Algunos compuestos de sulfato, tales como los sulfatos de magnesio, atacan directamente el silicato de calcio hidratado.

Para controlar el ataque del concreto por los sulfatos, se debe emplear el cemento tipo II acompañado del uso de baja relación agua-material cementante y baja permeabi-

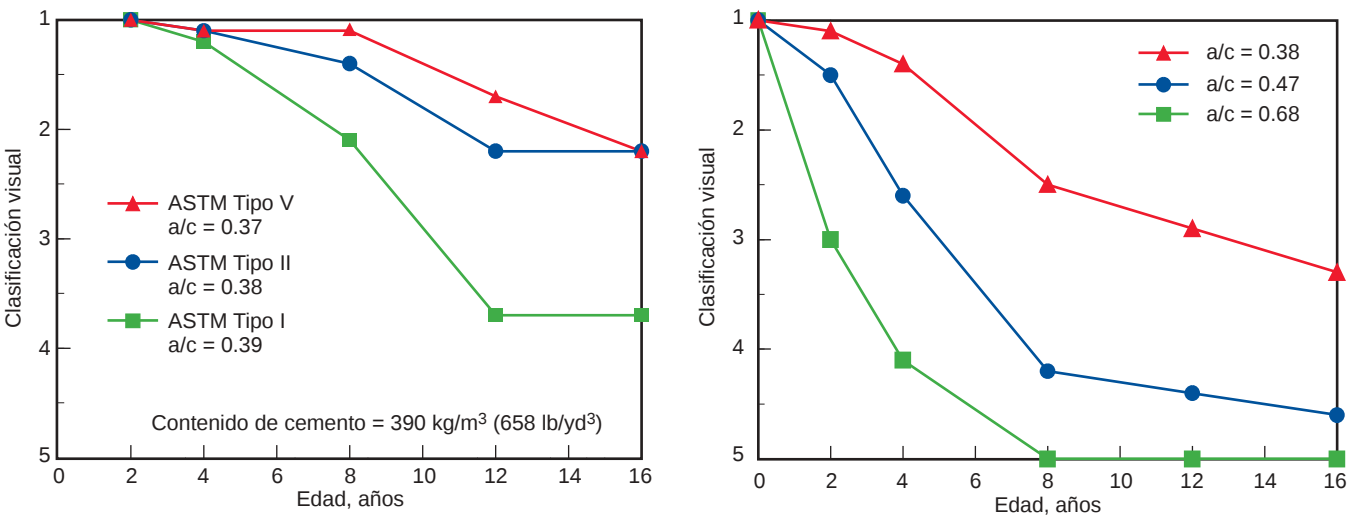


Fig. 2-13. (Izquierda) Desempeño en suelos con sulfatos de concretos preparados con diferentes tipos de cemento. Los cementos tipos II y V tienen menor contenido de C_3A , lo que mejora la resistencia a los sulfatos. (Derecha) La mejora de la resistencia a los sulfatos resultante de la baja relación agua-materiales cementantes, como lo demuestran las vigas de concreto expuestas a suelos con sulfatos en un ambiente de mojado y seco. Se presentan los promedios para concretos conteniendo una gran variedad de materiales cementantes, incluso los cementos tipos I, II, V, cementos adicionados, puzolanas y escorias. Véase la Fig. 2-15 para la ilustración de las tasas y la descripción de las vigas de concreto. (Stark 2002)

Tabla 2-2. Tipos de Cemento Requeridos para la Exposición del Concreto a los Sulfatos en Suelo o en Agua

Exposición a los sulfatos	Sulfato soluble en agua (SO_4) en suelo, porcentaje de la masa	Sulfato (SO_4) en agua, ppm	Tipo del cemento**	Relación agua-material cementante máxima, en masa	Mínima resistencia a compresión de diseño, f'_c , kg/cm ² (MPa) [lb/pulg ²]
Insignificante	Menos que 0.10	Menos de 150	Ningún tipo especial requerido	—	—
Moderado*	0.10 hasta 0.20	150 hasta 1500	II, MS, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0.50	280 (28) [4000]
Severa	0.20 hasta 2.00	1500 hasta 10,000	V, HS	0.45	320 (31) [4500]
Muy severa	Más de 2.00	Más de 10,000	V, HS	0.40	350 (35) [5000]

* Agua de mar.
** También se pueden utilizar puzolanas o escorias que, a través de ensayos o registro de servicio, mostraron ser capaces de mejorar la resistencia a los sulfatos. Método de ensayo: Método para la determinación de la Cantidad de Sulfatos Solubles en el Suelo (Suelo o Rocas) y Muestras de Agua, Departamento de Recursos Hídricos Norteamericano (U.S. Bureau of Reclamation, 1977).
Fuente: Adaptada del Departamento de Recursos Hídricos Norteamericano (U.S. Bureau of Reclamation).



Fig. 2-14. Los cementos de moderada resistencia a los sulfatos y alta resistencia a los sulfatos mejoran la resistencia a los sulfatos de los miembros de concreto, tales como (de la izquierda a la derecha) losas sobre el suelo, tubería y postes de concreto expuestos a suelos con alto contenido de sulfatos. (IMG12484, IMG12483, IMG12482)



Fig. 2-15. Las muestras de pruebas usadas en el ensayo de sulfatos en ambiente externo en Sacramento, California son vigas de 150 x 150 x 760 mm (6 x 6 x 30 pulg.). Se ilustra la comparación de las tasas: (superior) la tasa de concretos de 5 hasta 12 años, preparados con cemento tipo V y relación agua-cemento de 0.65; y (inferior) la tasa de concretos de 2 hasta 16 años, preparados con cemento tipo V y relación agua-cemento de 0.38 (Stark 2002). (IMG12481, IMG12480)

lidad. La Figura 2-13 (izquierda) ilustra la mejoría de la resistencia a los sulfatos del cemento tipo II en comparación al cemento tipo I.

El concreto expuesto al agua del mar normalmente se produce con el cemento tipo II. El agua del mar contiene cantidades considerables de sulfatos y cloruros. A pesar de la capacidad de los sulfatos del agua del mar en atacar el

concreto, la presencia de los cloruros inhibe la reacción expansiva, que es una característica del ataque por sulfatos. Los cloruros y los sulfatos están ambos presentes en el concreto y compiten por las fases aluminato. Los productos de la reacción del ataque por sulfatos son mucho más solubles en la solución de cloruros y se pueden lixiviar del concreto. Las observaciones de muchas fuentes muestran el desempeño en agua del mar de los concretos con cemento portland con un contenido de C_3A tan alto cuanto 10%. Estos concretos han presentado durabilidad satisfactoria, desde que su permeabilidad sea baja y haya un recubrimiento adecuado del acero de refuerzo (armadura) (Zhang, Bremner, y Malhotra 2003).

Los cementos tipo II, especialmente producidos para satisfacer a los requisitos de moderado calor de hidratación, una opción de la ASTM C 150 (AASHTO M 85), van a generar una tasa de liberación de calor más lenta que el cemento tipo I y la mayoría de los cementos tipo II. El comprador tiene la opción de especificar el requisito de moderado calor de hidratación. Un cemento en el cual se especifica el máximo calor de hidratación se lo puede utilizar en estructuras de gran volumen, tales como pilares (pilas, estribos) y cimientos (cimentaciones, fundaciones) grandes y muros (paredes) de contención de gran espesor (Fig. 2-16). Su empleo va a disminuir la subida de temperatura y la temperatura relacionada con la fisuración, la cual es especialmente importante cuando se coloca el concreto en clima caluroso.

Debido a su disponibilidad, el cemento tipo II se utiliza, algunas veces, en todas las partes de la construcción, sin tener en cuenta la necesidad de resistencia a los sulfatos o de moderado calor de hidratación. Algunos cementos se pueden etiquetar con más de una designación, por ejemplo Tipo I/II. Esto simplemente significa que tal cemento atiende a los requisitos de ambos los cementos tipo I y tipo II.

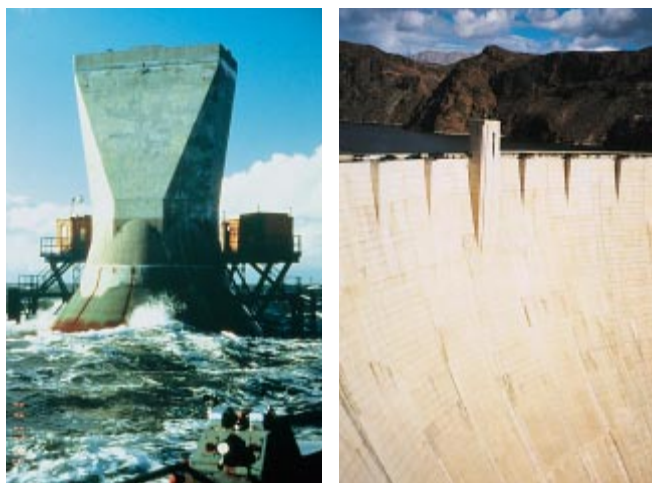


Fig. 2-16. Los cementos de moderado calor y bajo calor de hidratación minimizan el calor generado en miembros de concreto masivo o estructuras, tales como (izquierda) apoyos espesos de puente y (derecha) presa. La presa de Hoover, enseñada aquí, usó el cemento tipo IV para controlar el aumento de temperatura (IMG12479, IMG12478)

Tipo III

El cemento tipo III ofrece resistencia a edades tempranas, normalmente una semana o menos. Este cemento es química y físicamente similar al cemento tipo I, a excepción de que sus partículas se muelen más finamente. Es usado cuando se necesita remover las cimbras (encofrados) lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente. En clima frío, su empleo permite una reducción en el tiempo de curado (Fig. 2-17). A pesar de que se puede usar un alto contenido de cemento tipo I para el desarrollo temprano de la resistencia, el cemento tipo III puede ofrecer esta propiedad más fácilmente y más económicamente.

Tipo IV

El cemento tipo IV se usa donde se deban minimizar la tasa y la cantidad de calor generado por la hidratación. Por lo

tanto, este cemento desarrolla la resistencia en una tasa más lenta que otros tipos de cemento. Se puede usar el cemento tipo IV en estructuras de concreto masivo (hormigón masa), tales como grandes presas por gravedad, donde la subida de temperatura derivada del calor generado durante el endurecimiento deba ser minimizada (Fig. 2-16). El cemento tipo IV raramente está disponible en el mercado.

Tipo V

El cemento tipo V se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos – principalmente donde el suelo y el agua subterránea tienen alta concentración de sulfatos (Fig. 2-13 hasta 2-15). Su desarrollo de resistencia es más lento que en el cemento tipo I. La Tabla 2-2 trae la lista de las concentraciones de sulfatos que requieren el uso del cemento tipo V. La alta resistencia a los sulfatos del cemento tipo V se atribuye al bajo contenido de aluminato tricálcico, no excediendo a 5%. El uso de baja relación agua-materiales cementantes y baja permeabilidad son fundamentales para el buen desempeño de cualquier estructura expuesta a los sulfatos. Incluso el concreto con cemento tipo V no puede soportar una exposición severa a los sulfatos si tiene alta relación agua- materiales cementantes (Fig. 2-15 superior). El cemento tipo V, como otros cementos, no es resistente a ácidos y a otras sustancias altamente corrosivas.

La ASTM C 150 (AASHTO M 85) permite un enfoque físico y químico (ASTM C 452 ensayo de expansión) para la garantía de la resistencia a los sulfatos del cemento tipo V. Se puede especificar cualquiera de los enfoques tanto físico como químico, pero no ambos simultáneamente.

Cementos con Aire Incluido

La ASTM C 150 y la AASHTO M 85 presentan especificaciones para tres cementos con aire incluido (incorporado) (Tipos IA, IIA y IIIA). Ellos corresponden a la composición de los cementos ASTM tipos I, II y III, respectivamente, a excepción de que, durante su producción, se muelen

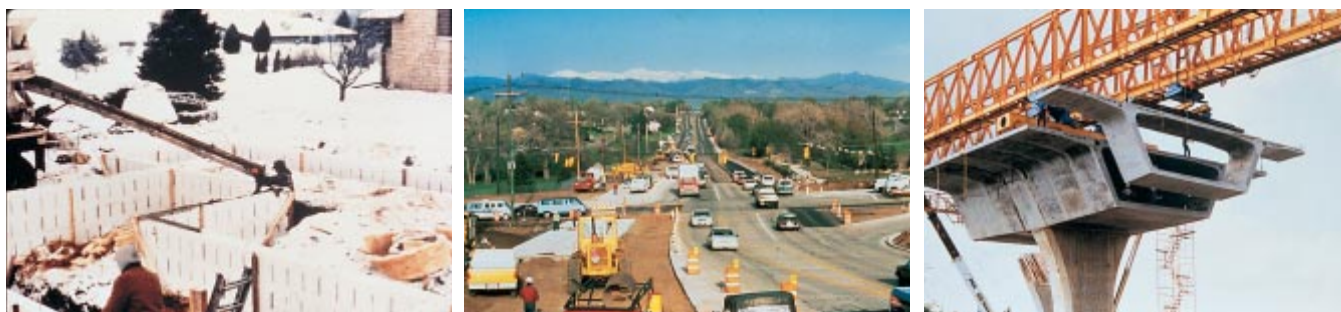


Fig. 2-17. Los cementos de alta resistencia inicial se usan donde la resistencia temprana es necesaria, tales como (de la izquierda para la derecha) colocación en tiempo frío, pavimentos de rápida habilitación al tránsito (fast track) para minimizar los embotellamientos y rápida remoción de las cimbras del concreto premoldeado. (IMG12350, IMG12477, IMG12476)

pequeñas cantidades de material incorporador (inclusor) de aire juntamente con el clínker. Estos cementos producen un concreto con una resistencia a congelamiento y deshielo mayor. Tales concretos contienen burbujas minúsculas de aire, bien distribuidas y completamente separadas. El aire incluido en la mayoría de los concretos se logra a través del uso de aditivos inclusores de aire, y no del uso de cemento con aire incluido. Los cementos con aire incluido están disponibles apenas en algunas regiones.

Cemento Portland Blanco

El cemento portland blanco es un cemento portland distinto del gris básicamente en el color. Este cemento se produce de acuerdo con las especificaciones de la ASTM C 150, normalmente tipo I o tipo III. El proceso de producción se controla de tal manera que el producto final sea blanco. El cemento portland blanco se fabrica con materias primas seleccionadas que contienen cantidades insignificantes de óxidos de hierro y magnesio, pues son estas sustancias las que le dan el color gris al cemento. El cemento portland blanco se usa principalmente con finalidades arquitectónicas en muros estructurales, concreto prefabricado (premoldeado) y concreto reforzado con fibras de vidrio (CRFV), paneles de fachada, superficies de pavimento, estuco, pinturas en cemento, mortero para ladrillos y concreto decorativo (Fig. 2-18). Se recomienda su empleo siempre que sean deseados concretos, lechadas o morteros blancos o coloridos. Se debe especificar el cemento portland blanco como: cemento portland atendiendo a las especificaciones ASTM C 150, tipos (I, II, III o V). El cemento blanco también se usa en la fabricación de cemento de albañilería (mampostería) blanco de acuerdo con la norma ASTM C91 y el cemento plástico blanco de acuerdo con la ASTM C 1328 (PCA 1999). El cemento blanco se produjo por primera vez en EE. UU. en York, Pensilvania en 1907. Consulte Farny (2003 o 2003a) para más informaciones.

CEMENTOS HIDRÁULICOS ADICIONADOS (MEZCLADOS O COMPUESTOS) EN LOS EE.UU.

En la construcción en concreto, se usa el cemento adicionado (mezclado, compuesto o mezcla) de la misma manera que el cemento portland. Se lo puede emplear como el único material cementante en el concreto o se lo puede usar en combinación con otros materiales cementantes suplementarios, adicionados en la planta de concreto o mezcladora (hormigonera). Normalmente, se especifica el uso del cemento mezclado en combinación con puzolanas y escorias locales. Si se emplea un cemento mezclado o un cemento portland sólo o en combinación con puzolanas o escorias, se debe ensayar el concreto para la verificación de la resistencia, durabilidad y otras propiedades requeridas por la especificación del proyecto (PCA 1995 y Detwiler, Bhatt y Bhattacharja 1996).

Los cementos adicionados se producen por la molienda uniforme y conjunta o por la mezcla de dos o más tipos de materiales finos. Los materiales principales son cemento portland, escoria granulada de alto horno, ceniza volante, humo de sílice, arcilla calcinada, otras puzolanas, cal hidratada y combinaciones premezcladas de estos materiales (Fig. 2-19). Los cementos hidráulicos mezclados necesitan estar en conformidad con la ASTM C 595 (AASHTO M 240), Especificación para Cementos Hidráulicos Mezclados (*Specification for Blended Hydraulic Cements*) o ASTM C 1157, especificación de Desempeño de Cementos Hidráulicos (*Performance Specification for Hydraulic Cements*).

La ASTM C 595 establece cinco clases principales de cementos adicionados:

Tipo IS	Cemento portland alto horno
Tipo IP y Tipo P	Cemento portland puzolánico
Tipo I (PM)	Cemento portland modificado con puzolana
Tipo S	Cemento de escoria o siderúrgico
Tipo I (SM)	Cemento portland modificado con escoria



Fig. 2-18. El cemento portland blanco se utiliza en concreto arquitectónico blanco o de colores claros, variando de (de la izquierda para la derecha) terrazas para pisos, enseñado aquí con cemento blanco y agregado de granito verde (IMG12475), para miembros decorativos estructurales premoldeados o moldeados en obra (68981), para el exterior de los edificios. La foto de la derecha muestra el edificio en concreto premoldeado blanco de la sede de la ASTM en West Conshohocken, Pennsylvania. La foto es cortesía de la ASTM.



Fig. 2-19. Los cementos adicionados usan una combinación de cemento portland o clinker y yeso mezclados o molidos conjuntamente con puzolanas, escorias o ceniza volante. La ASTM C 1175 permite el uso y la optimización de todos estos materiales, simultáneamente si necesario, para producirse un cemento con propiedades óptimas. Se enseñan el cemento adicionado (al centro) rodeado por (derecha y en el sentido del reloj) clinker, yeso, cemento portland, ceniza volante, escoria, humo de sílice y arcilla calcinada. (IMG12473)

Los cementos tipos IS, IP, P, I(PM) y I(SM) son de uso general (Fig. 2-12), más adelante, se presentan estos tipos de cemento y las subcategorías.

La AASHTO M 240 también usa estas clases para los cementos mezclados. Los requisitos de la M240 son casi idénticos a los de ASTM C 595.

La ASTM C 1157 presenta seis tipos de cementos mezclados, los cuales van a ser discutidos bajo “Cementos Hidráulicos”. Los cementos mezclados que estén de acuerdo con los requisitos de la C 1157, satisfacen a los requisitos de los ensayos (pruebas) de desempeño físico sin restricciones de ingredientes o composición química del cemento. Esto permite que el productor de cemento, buscando optimizar las propiedades de resistencia y durabilidad, use una gran variedad de materiales cementantes, tales como clinker portland, escoria de alto horno, humo de sílice y arcilla calcinada (Fig. 2-19).

Sigue una revisión detallada de los cementos de la ASTM C 595 y de la AASHTO M 240:

Tipo IS

Se puede usar el cemento portland de alto horno, tipo IS, para la construcción en concreto en general. El uso histórico de cementos mezclados con escorias data del inicio del siglo XX en Europa, Japón y América del Norte (Abrams 1925). En la producción de estos cementos, la escoria granulada de alto horno tanto se muele juntamente con el clinker del cemento portland como se la muele separadamente y se la mezcla con el cemento portland o entonces se lo produce con la combinación de molienda conjunta y mezclado. El contenido de escoria de alto horno en este cemento está entre 25% y 70% de la masa del cemento. Hay otras subcategorías (propiedades especiales opcionales)

tales como aire incluido, moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación que se especifican con la adición de los sufijos A, MS, MH. Por ejemplo, un cemento portland de alto horno con aire incluido que tiene moderada resistencia a los sulfatos sería llamado Tipo IS-A (MS). Consulte Klieger y Isberner (1967) y PCA (1995).

Tipo IP y Tipo P

Los cementos portland puzolánicos se designan como tipo IP o tipo P. El tipo IP se lo puede usar para la construcción en general y el tipo P se usa en construcciones que no requieran altas resistencias iniciales. Se fabrican estos cementos a través de la molienda conjunta del clinker de cemento portland con una puzolana adecuada, o por el mezclado de cemento portland o cemento de alto horno con puzolana, o por la combinación de la molienda y del mezclado. El contenido de puzolana de estos cementos está entre 15% y 40% de la masa del cemento. Los ensayos (pruebas) de laboratorio indican que el desempeño de los concretos preparados con el cemento tipo IP es similar al concreto del cemento tipo I. Se puede especificar el tipo IP con aire incluido, moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación a través de la adición de los sufijos A, MS o MH. Se puede especificar el tipo P con bajo calor de hidratación (LH), moderada resistencia a los sulfatos (MS) o aire incorporado (A).

Tipo I (PM)

Los cementos portland modificados con puzolana, Tipo I(PM), se usan en construcciones de concreto en general. El cemento se fabrica con la combinación del cemento portland o el cemento portland de alto horno y una puzolana fina. Esta combinación se puede lograr por: (1) el mezclado del cemento portland con la puzolana, (2) el mezclado del cemento portland de alto horno con la puzolana, (3) la molienda conjunta del cemento portland y de la puzolana o (4) la combinación de la molienda y el mezclado. El contenido de puzolana es menor que 15% de la masa del cemento final. Se puede especificar aire incorporado, moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación en cualquier combinación por la adición de los sufijos A, MS o MH. Un ejemplo del cemento tipo I (PM) con aire incorporado y moderado calor de hidratación sería designado con el tipo I (PM)-A(MH).

Tipo S

El cemento de escoria de alto horno se usa con el cemento portland para la confección de concreto o con cal para la preparación de mortero, pero no se lo emplea separadamente en concreto estructural. El cemento de escoria se produce por: (1) mezclado de la escoria granulada de alto horno y el cemento portland, (2) mezclado de la escoria granulada de alto horno con la cal hidratada o (3) mezclado

de una combinación de escoria granulada de alto horno, cemento portland y cal hidratada. El contenido mínimo de escoria es del 70% de la masa del cemento. Se puede especificar el aire incluido en el cemento de escoria con la adición del sufijo A, por ejemplo, tipo S-A.

Tipo I (SM)

El cemento portland modificado con escoria, tipo I(SM), se usa para construcciones de concreto en general. Este cemento se produce por: (1) molienda conjunta del clinker de cemento portland con la escoria granulada de alto horno, (2) mezcla del cemento portland con la escoria granulada de alto horno finamente molida o (3) una combinación de molienda conjunta y mezcla. El contenido de escoria es menor que 25% de la masa del cemento final. Se lo puede especificar con aire incorporado, moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación a través de la adición de los sufijos A, MS o MH. Un ejemplo sería el tipo I(SM)-A (MH) para el cemento portland modificado con escoria con aire incorporado y moderada resistencia a los sulfatos.

CEMENTOS HIDRÁULICOS EN LOS EE.UU.

Los cementos hidráulicos se fraguan y se endurecen por su reacción química con el agua. También se mantienen duros y estables bajo el agua. Se usan en todos los aspectos de la construcción con concreto. Todos los cementos portland y los cementos mezclados son cementos hidráulicos. “Cemento Hidráulico” es meramente un término más genérico Consulte también ASTM C 219 para los términos relacionados a los cementos hidráulicos.

En los años 90 se crearon las especificaciones de desempeño para los cementos hidráulicos – ASTM C 1157, Especificación de Desempeño para Cementos Hidráulicos (Performance Specification for Hydraulic Cements). Esta especificación se indica genéricamente para los cementos hidráulicos que incluyen cemento portland, cemento portland modificado y cemento hidráulico mezclado. Los cementos en acuerdo con los requisitos de la C 1157 satisfacen a los requisitos de ensayos (pruebas) de desempeño físico, oponiéndose a restricciones de ingredientes o de composición química del cemento, las cuales se pueden encontrar en otras especificaciones. La ASTM C 1157 presenta seis tipos de cementos hidráulicos:

Tipo GU	Uso general
Tipo HE	Alta resistencia inicial
Tipo MS	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo HS	Alta resistencia a los sulfatos
Tipo MH	Moderado calor de hidratación
Tipo LH	Bajo calor de hidratación

Además, estos cementos pueden también tener la opción R –baja reactividad con agregados álcali-reactivos –

especificados para ayudar en el control de la reactividad álcali-agregado. Por ejemplo, el cemento tipo GU-R sería un cemento hidráulico de uso general con baja reactividad con agregados álcali-reactivos.

Al especificar un cemento C 1157, el especificador usa la nomenclatura de “cemento hidráulico”, “cemento portland”, “cemento portland con aire incluido”, “cemento portland modificado” o “cemento hidráulico mezclado” conjuntamente con la designación del tipo. Por ejemplo, la especificación puede llamar un cemento hidráulico tipo GU, un cemento hidráulico mezclado tipo MS o un cemento portland tipo HS. Si no se especifica el tipo, entonces se asume el tipo GU.

La ASTM C 1157 define un cemento adicionado como aquél que tiene más de 15% de adición mineral y el cemento portland modificado aquél con un contenido de hasta 15% de adiciones minerales. La adición mineral normalmente aparece al final de la nomenclatura del cemento portland modificado, por ejemplo, cemento portland modificado con escoria.

La ASTM C 1157 también permite la especificación de una gama de resistencias a partir de una tabla de la norma. Si no se especifica la gama de resistencias, sólo las resistencias mínimas son aplicables. La gama de resistencias se usa raramente en los EE.UU.

Sigue una revisión detallada de los cementos de la ASTM C 1157:

Tipo GU

El cemento de uso general tipo GU es adecuado para todas las aplicaciones donde las propiedades especiales de los otros tipos no sean necesarias. Su uso en concreto incluye pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tubería, productos de concreto prefabricado y otras aplicaciones donde se usa el cemento tipo I (Fig. 2-12).

Tipo HE

El cemento tipo HE proporciona alta resistencia en edades tempranas, usualmente menos de una semana. Este cemento se usa de la misma manera que el cemento portland tipo III (Fig. 2-17).

Tipo MS

El cemento tipo MS se emplea donde sean importantes las precauciones contra el ataque moderado por los sulfatos, tales como en estructuras de drenaje, donde las concentraciones de sulfatos en el agua subterránea son mayores que lo normal pero no llegan a ser severas (consulte Tabla 2-2). Este cemento se usa de la misma manera que el cemento portland tipo II (Fig. 2-14). Como el tipo II, se debe preparar el concreto de cemento tipo MS con baja relación agua-materiales cementantes para que se garantice la resistencia a los sulfatos.

Tipo HS

El cemento tipo HS se usa en concreto expuesto a la acción severa de los sulfatos – principalmente donde el suelo o el agua subterránea tienen altas concentraciones de sulfato (consulte Tabla 2-2). Este cemento se emplea de la misma manera que el cemento portland tipo V (Fig. 2-14).

Tipo MH

El cemento tipo MH se usa donde el concreto necesite tener un calor de hidratación moderado y se deba controlar el aumento de la temperatura. El cemento tipo MH se usa de la misma manera que el cemento portland de moderado calor tipo II (Fig. 2-16).

Tipo LH

El cemento tipo LH se usa donde la tasa y la cantidad del calor generado por la hidratación deban ser minimizadas. Este cemento desarrolla resistencia en una tasa más lenta que los otros cementos. El cemento tipo LH se aplica en estructuras de concreto masivo donde se deba minimizar el aumento de la temperatura resultante del calor generado durante el endurecimiento. Este cemento se usa de la misma manera que el cemento portland tipo IV (Fig. 2-16).

La Tabla 2-3 presenta una matriz de los cementos comúnmente usados y donde son usados en la construcción de concreto.

CEMENTO HIDRÁULICO DE ESCORIA EN LOS EE.UU.

Los cementos hidráulicos de escoria son como los otros cementos que se fraguan y se endurecen por la reacción química con el agua. Se indica la aplicación del concreto preparado con el cemento hidráulico de escoria para las mismas finalidades que los otros cementos hidráulicos. Los cementos hidráulicos de escoria consisten en escoria granulada de alto horno que contiene los mismos compuestos químicos que el cemento portland. Normalmente, se los mezclan con cal hidratada o cemento portland. La combinación del cemento hidráulico de escoria con el agua produce esencialmente el mismo material aglomerante (silicato de calcio hidratado) que el producido por el cemento portland al combinarse con el agua. El cemento hidráulico de escoria está de acuerdo con la norma ASTM C 595 tipos IS y S, ASTM C 989 y ASTM C 1157.

CEMENTOS PORTLAND MODIFICADOS NORTEAMERICANOS

El término “cemento portland modificado” usualmente se refiere a un cemento adicionado que contiene principalmente cemento portland, mezclado con pequeñas cantidades (menos que 15%) de adiciones minerales. Sin embargo, algunas regiones poseen cementos portland modificados que no contienen una adición mineral. El

Tabla 2-3. Aplicaciones para los Cementos Más Populares en los EE.UU.

Especificación del cemento	Aplicaciones*						
	Uso general	Moderado calor de hidratación	Alta resistencia inicial	Bajo calor de hidratación	Moderada resistencia a los sulfatos	Alta resistencia a los sulfatos	Resistencia a la reacción álcali-sílice (RAS)**
ASTM C 150 (AASHTO M 85) cementos portland	I	II (opción de moderado calor)	III	IV	II	V	Opción de bajo álcalis
ASTM C 595 (AASHTO M 240) Cementos hidráulicos mezclados	IS IP I(PM) I(SM) S, P	IS(MH) IP(MH) I(PM)(MH) I(SM)(MH)		P(LH)	IS(MS) IP(MS) P(MS) I(PM)(MS) I(SM)(MS)		Opción de baja reactividad
ASTM C 1157 Cementos hidráulicos***	GU	MH	HE	LH	MS	HS	Opción R

* Verifique la disponibilidad local de los cementos específicos pues ni todos los cementos están disponibles en todas las regiones.

** La opción de baja reactividad con agregados susceptibles a la RAS se puede aplicar a cualquier tipo de cemento en las columnas a la izquierda.

*** Para los cementos ASTM C 1157, la nomenclatura de cemento hidráulico, cemento portland, cemento portland con aire incluido, cemento portland modificado o cemento portland adicionado se usa con la designación del tipo.

“modificado” se refiere simplemente a una propiedad especial que el cemento posee o se refiere a un cemento que tiene las características de más de un tipo de cemento portland. Para más informaciones, consulte las discusiones anteriores sobre los cementos tipo I(SM), cemento portland modificado con escoria y tipo I(PM), cemento portland modificado con puzolana y las discusiones en “Cementos Hidráulicos”.

CEMENTOS ESPECIALES EN LOS EE.UU.

Los cementos especiales se producen para aplicaciones especiales. La Tabla 2-4 resume los cementos especiales discutidos abajo. Para más informaciones, consulte Odler (2000) y Klemm (1998).

Cementos de Albañilería (Mampostería) y Cementos Mortero

Los cementos de albañilería y los cementos mortero son cementos hidráulicos diseñados para que se empleen en morteros en la construcción de mampostería (Fig. 2-20).

Consisten en una mezcla de cemento portland, cemento hidráulico adicionado y materiales plastificantes (tales como caliza o cal hidratada), junto con otros materiales introducidos para mejorar una o más propiedades, tales como tiempo de fraguado, trabajabilidad, retención de agua y durabilidad. Se proporcionan y se empacan estos



Fig. 2-20. El cemento de albañilería y el cemento de mortero se usan para la preparación de mortero para la unión de unidades de mampostería. (IMG12471)

Tabla 2-4. Aplicaciones de los Cementos Especiales

Cemento especial	Tipo	Aplicación
Cemento Blanco, ASTM C 150	I, II, III, V	Concreto blanco o colorido, mampostería, mortero, lechada, revoque y estuco
Cemento blanco de albañilería, ASTM C 91	M, S, N	Mortero blanco entre las unidades de mampostería
Cementos de Albañilería, ASTM C 91	M, S, N	Mortero entre las unidades de mampostería*, revoque y estuco
Cementos mortero, ASTM C 1329	M, S, N	Mortero entre las unidades de mampostería*
Cementos plásticos, ASTM C 1328	M, S	Revoque y estuco**
Cementos expansivos, ASTM C 845	E-1(K), E-1(M), E-1(S)	Concreto de contracción (retracción) compensada
Cementos para pozos petroleros, API 10	A, B, C, D, E, F, G, H	Cementación o selladura (sello) de pozos
Cementos repelentes al agua		Mortero para baldosas y azulejos, pintura y revestimiento final de estuco
Cementos de fraguado regulado		Resistencia temprana y reparos***
Cemento con adiciones funcionales, ASTM C 595 (AASHTO M 240), ASTM C 1157		Construcción de concreto en general que necesite de características especiales, tales como reductor de agua, inductor de agua, control de fraguado y propiedades aceleradas
Cemento molido finamente (ultra fino)		Selladura (sello) geotécnica
Cemento de aluminato de calcio		Reparaciones, resistencia química, exposición a altas temperaturas
Cemento de fosfato de magnesio		Reparaciones y resistencia química
Cemento de geopolímero		Construcción general, Reparaciones, estabilización de desechos***
Cemento de etringita		Estabilización de desechos***
Cemento hidráulico de endurecimiento rápido	VH, MR, GC	Pavimentación general donde sea requerido desarrollo rápido de resistencia (aproximadamente 4 horas)

* Los cementos portland tipos I, II, III y los cementos adicionados tipos IS, IP y I(PM) también se emplean en la producción de morteros.

** Los cementos portland tipos I, II, III y los cementos adicionados tipos IP, I(SM) y I(PM) también se emplean en la producción de revoques.

*** Los cementos portland y los cementos hidráulicos adicionados se emplean también para estas aplicaciones.

componentes en la planta de cemento bajo condiciones controladas para que se garantice la uniformidad del desempeño.

Los cementos de albañilería satisfacen a los requisitos de la ASTM C 91, la cual clasifica los cementos de albañilería como tipo N, Tipo S y tipo M. El cemento blanco de albañilería y el cemento colorido de albañilería están de acuerdo con la ASTM C 91 y están disponibles en algunas regiones. Los cementos mortero siguen los requisitos de la norma ASTM C 1329, la cual también clasifica los cementos para mortero en tipo N, tipo S y tipo M. Sigue una breve descripción de cada tipo:

El cemento tipo N de albañilería y el cemento tipo N para mortero se usan en morteros tipo N y tipo O de la ASTM C 270. Se los puede emplear con cemento portland o cemento portland adicionado para la producción de los morteros tipo S y tipo M.

El cemento de albañilería tipo S y el cemento mortero tipo M se usan en el mortero tipo S de la ASTM C 270. Se los puede emplear también con cemento portland y cemento portland adicionado para la producción del mortero tipo M.

El cemento de albañilería tipo M y el cemento mortero tipo M se usan en morteros tipo M de la ASTM C 270 sin la adición de otros cementos o de cal hidratada.

Los tipos N, S y M generalmente tienen niveles de cemento portland y resistencias crecientes, siendo que el tipo M tiene la mayor resistencia. El cemento más empleado es el cemento tipo N.

El aumento del uso de mamposterías en aplicaciones con exigencias estructurales, tales como áreas con actividad sísmica, resultó en el desarrollo del cemento para mortero. El cemento para mortero es similar al cemento de albañilería en el sentido de que es un cemento preparado industrialmente y usado principalmente para la producción de morteros para mamposterías. La ASTM C 1329 pone límites máximos de contenido de aire inferiores en el cemento para mortero que los límites permitidos para los cementos de albañilería; además, la ASTM C 1329 es la

única especificación de la ASTM para materiales de mampostería que incluye un criterio de desempeño para la resistencia de adherencia.

La trabajabilidad, resistencia y color de los cementos de albañilería y los cementos para mortero están en el más alto nivel de uniformidad, debido al control de la producción. Los cementos de albañilería y los cementos mortero no sólo se emplean en la construcción de mamposterías pero también en aplanados. Los cementos de albañilería se emplean también en revoque y estuco a base de cemento portland (Fig. 2-21) (consulte ASTM C 926). No se deben usar los cementos de albañilería y los cementos para mortero en la preparación de concreto.

Cementos Plásticos

El cemento plástico es un cemento hidráulico que satisface a los requisitos de la ASTM C 1328. Se lo usa para la preparación de revoques y estucos a base de cemento portland (ASTM C 926), normalmente en las regiones sudoeste y costa oeste de los EE.UU. (Fig. 2-21). El cemento plástico consiste en una mezcla de cemento portland, cemento adicionado y materiales plastificantes (tales como caliza, cal hidratada, cal hidráulica), conjuntamente con materiales introducidos para la mejoría de una o más propiedades, tales como tiempo de fraguado, trabajabilidad, retención de agua y durabilidad.

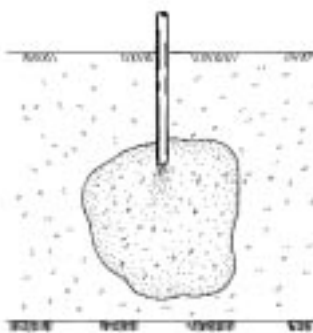
La ASTM C 1328 define requisitos separados para los cementos plásticos tipo M y tipo S, siendo que el tipo M posee más altos requisitos de resistencias. El código de construcciones uniformes (Uniform Building Code – UBC) 25-1 no clasifica el cemento plástico en diferentes tipos, pero define un sólo grupo de requisitos, el cual corresponde a aquéllos de la ASTM C 1328 para el cemento plástico tipo M. Cuando se usa el cemento plástico, ni cal ni plastificantes se pueden adicionar en el revoque en el momento del mezclado.



Fig. 2-21. El cemento de albañilería y el cemento plástico se usan para la producción de revoques o estucos para edificios comerciales, institucionales y residenciales. Las fotos enseñan una Iglesia y una casa con estuco exterior. La foto menor, a la derecha, muestra la textura convencional del estuco. (IMG12470, IMG12469, 68805)



Fig. 2-22. (izquierda) La lechada de cemento finamente molido y agua se puede inyectar en el suelo, como se enseña aquí, para la estabilización de los materiales, para garantizarse la resistencia de cimientos (cimentación, fundación, zapata) o para retener químicamente los contaminantes en el suelo. (IMG12468) **Ilustración (derecha)** de la penetración de la lechada (groute) en el suelo.



El término “plástico” en el cemento plástico no se refiere a ninguna adición de cualquier compuesto orgánico al cemento, pero “plástico” se refiere a la habilidad del cemento de conferir al revoque un alto grado de plasticidad (docilidad) o trabajabilidad. El revoque preparado con este cemento debe mantenerse trabajable por un periodo de tiempo suficientemente largo para que sea retrabajado, obteniéndose así la densificación y la textura deseadas. No se debe usar el cemento plástico en la preparación de concreto. Para más informaciones sobre el uso del cemento plástico y revoques, consulte Melander e Isberner (1996).

Cemento Finamente Molido (Cementos Ultra Finos)

Los cementos finamente molidos, también llamados de cementos ultra finos, son cementos hidráulicos los cuales se muelen muy finamente para usarlos en selladura de suelos finos o en fisuras muy finas de rocas (Fig. 2-22). Las partículas de cemento son más pequeñas que 10 micrómetros de diámetro y 50% de las partículas son menores que 5 micrómetros. Su finura Blaine normalmente excede a 800 m²/kg. Estos cementos muy finos consisten en cemento portland, escoria granulada de alto horno y adiciones minerales.

Cementos Expansivos

El cemento expansivo es un cemento hidráulico que se expande ligeramente durante el inicio del periodo de endurecimiento, después del fraguado. Este cemento debe estar de acuerdo con los requisitos de la ASTM C 845, en la cual está designado como el tipo E-1. Actualmente, se reconocen tres variedades de cemento expansivo, llamadas de K, M y S, las cuales se añaden como sufijo al tipo. El tipo E-1(K) contiene cemento portland, trisulfoaluminato tetracálcico, sulfato de calcio y óxido de calcio no combinado (cal). El tipo E-1(M) contiene cemento portland, cemento de aluminato de calcio y sulfato de calcio. El tipo

E-1(S) contiene cemento portland con alto contenido de aluminato tricálcico y sulfato de calcio. El tipo E-1(K) es el cemento expansivo más disponible comercialmente en los EE.UU.

Los cementos expansivos también se pueden producir con composiciones diferentes de las mencionadas anteriormente. Las propiedades expansivas de cada tipo pueden variar considerablemente dentro de un rango.

Cuando se restringe la expansión, por ejemplo por el acero del refuerzo (armadura), el concreto de cemento expansivo (también

llamado de contracción (retracción) compensada o contracción compensada) se lo puede usar para: (1) compensar la disminución de volumen derivado de la contracción por secado, (2) inducir esfuerzos de tracción (esfuerzos de tensión) en la armadura (concreto postensado) y (3) estabilizar, a largo plazo, las dimensiones de las estructuras de concreto postensado con respecto al diseño original.

Una de las mayores ventajas en el uso de los cementos expansivos en concreto ha sido citada arriba en el (1); cuando se pueden compensar los cambios de volumen ocasionados por la contracción por secado, se controlan y reducen las fisuras de retracción por secado. La Figura 2-23 ilustra el histórico de cambios de longitud (expansión temprana y contracción por secado) de concretos con retracción compensada y de concretos convencionales de cemento portland. Para más informaciones, consulte Pfeifer y Perenchio (1973), Russell (1978) y PCA (1998).

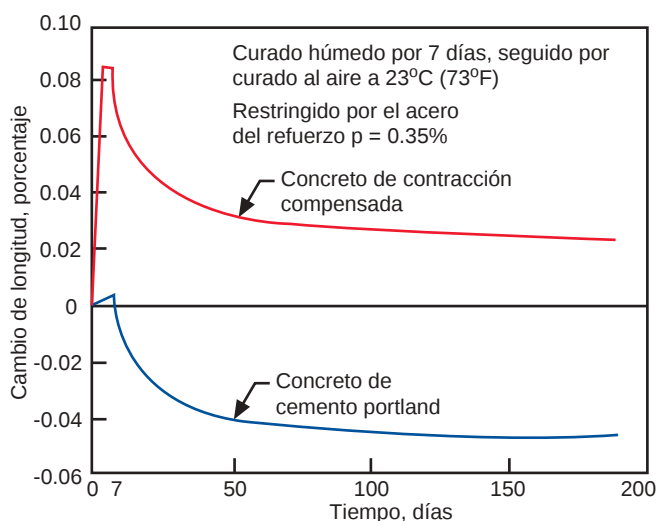


Fig. 2-23. Histórico de los cambios de longitud de un cemento de contracción compensada, de concreto conteniendo cemento tipo E-1 (S) y de concreto conteniendo cemento portland tipo I (Pleifer y Perenchio 1973).

Cementos para Pozos Petroleros (Petróli-feros)

Los cementos para pozos petroleros, usados para sellar pozos de petróleo, también llamados de cementación de pozos petroleros, se fabrican normalmente con clínker de cemento portland o de cementos hidráulicos adicionados. Generalmente, deben tener tiempo de fraguado lento y deben ser resistentes a altas temperaturas y presiones. La especificación para cementos y materiales para selladura (sello) de pozos del Instituto de Petróleo Americano (American Petroleum Institute's *Specification for Cements and Materials for Well Cementing*) incluye requisitos para ocho clases de cementos para pozos (clases A hasta H) y tres grados (Grado O – común, MSR – moderada resistencia a los sulfatos y HSR – alta resistencia a los sulfatos). Cada clase se aplica para el uso hasta una cierta gama de profundidades del pozo, temperaturas, presiones y ambientes sulfatados. La industria de petróleo también usa los tipos de cemento portland convencionales con modificadores de cemento adecuados. Los cementos expansivos han presentado un buen desempeño como cemento para pozos.

Cementos con Adiciones Funcionales

Las adiciones funcionales se pueden moler con el clínker de cemento para modificar las propiedades del cemento hidráulico. Estas adiciones deben cumplir con los requisitos de la ASTM C 226 o C 688. La ASTM C 226 indica la adición de inclusor de aire, mientras que la ASTM C 688 indica las siguientes adiciones: reductores de agua, retardadores (retardantes), aceleradores (acelerantes), reductores de agua y retardadores, reductores de agua y aceleradores y adiciones para control de fragüe. Las especificaciones para el cemento ASTM C 595 (AASHTO M 240) y C 1157 permiten las adiciones funcionales. Estos cementos se pueden utilizar en construcciones de concreto normales o especiales, cementación y otras aplicaciones. Gaida (1996) estudió una adición funcional para el control de la reactividad álcali-sílice.

Cementos Repelentes al Agua

Cementos repelentes al agua, algunas veces llamados cementos impermeables, se producen normalmente con la adición al clínker de pequeñas cantidades de aditivos repelentes al agua, tales como estearato (sodio, aluminio y otros) durante la molienda final (Lea 1971). Fabricados tanto en el color blanco como en el color gris, los cementos repelentes al agua reducen la transmisión de agua por capilaridad cuando hay poca o ninguna presión, pero no paran la transmisión de vapor de agua. Se usan en morteros para baldosas y azulejos, pinturas y revestimiento final en estuco.

Cementos de Fraguado Regulado

Cementos de fraguado regulado son cementos hidráulicos de fluoraluminato de calcio que se pueden formular y controlar para la producción de concreto con tiempo de fraguado que varíen de pocos minutos hasta una hora y con correspondiente desarrollo rápido de la resistencia (Greening y otros 1971). Éste es un cemento a base de cemento portland con adiciones funcionales y que se puede producir en el mismo horno usado en la fabricación convencional del cemento portland. El cemento de fraguado regulado incorpora componentes de control de fraguado y de desarrollo de resistencia a las edades tempranas. Las propiedades físicas finales del concreto resultante son, en su mayoría, similares a las de los concretos de cemento portland comparables.

Cementos de Geopolímeros

Los cementos de geopolímeros son cementos hidráulicos inorgánicos que se basan en la polimerización de minerales (Davidovits, Davidovits y James 1999). El término se refiere más específicamente a cementos alumino-silicato activados por álcalis, también llamados de cementos zeolíticos o polisialato. Se los han usado para la construcción en general, aplicaciones de concreto de alta resistencia inicial y estabilización de desechos. Estos cementos no contienen polímeros orgánicos o plásticos.

Cementos de Etringita

Los cementos de etringita son cementos de sulfoaluminato de calcio que se formulan especialmente para aplicaciones especiales, tales como la estabilización de materiales de desecho (Klemm 1998). Estos cementos se pueden formular con grandes cantidades de etringita para la estabilización de iones metálicos específicos a lo largo de la estructura de la etringita. También se los han empleado en aplicaciones de fraguado rápido, incluyendo su uso en minas de carbón. Consulte "Cementos Expansivo" arriba.

Cementos de Endurecimiento Rápido

El cemento hidráulico de endurecimiento rápido, alta resistencia inicial, se usa en construcciones tales como pavimentos de rápida habilitación al tránsito (fast track), donde el desarrollo rápido de la resistencia se hace necesario (resistencia de diseño [resistencia de cálculo] en aproximadamente cuatro horas). Estos cementos normalmente usan sulfoaluminato de calcio para la obtención de la resistencia temprana. Se clasifican como tipo VH (muy alta resistencia temprana), MR (resistencia temprana de medio rango) y (GC) construcción general.

Cementos de Aluminato de Calcio

El cemento de aluminato de calcio no tiene como base el cemento portland. Se lo utiliza en aplicaciones especiales para desarrollo rápido de resistencia (resistencia de diseño en un día), resistencia a altas temperaturas y resistencia a los sulfatos, ácidos débiles y agua de la mar. La combinación del cemento portland y del cemento de aluminato de calcio se ha empleado para la preparación de concretos y morteros de fraguado rápido. Las aplicaciones típicas de los concretos de aluminato de calcio incluyen: pisos industriales con resistencia química, resistencia a altas temperaturas y resistencia a corrosión; revestimientos refractarios moldeados y reparación. Las normas que tratan de estos cementos incluyen la norma británica BS 915-2 y la norma francesa NF P 15-315.

El concreto de cemento de aluminato de calcio se lo debe preparar con baja relación agua-cemento (menos de 0.40), para minimizar la conversión de los productos hidratados menos estables de aluminato de calcio hexagonal (CAH_{10}) en: aluminato tricálcico hidratado cúbico (C_3AH_6), el cual es más estable, alúmina hidratada (AH_3) y agua. A lo largo del tiempo y en condiciones particulares de humedad y temperatura, esta conversión puede causar una disminución del 53% del volumen del material hidratado. Sin embargo, este cambio interno de volumen ocurre sin una alteración dramática de las dimensiones totales del miembro de concreto, resultando en un aumento de porosidad de la pasta y reducción de la resistencia a compresión. Con relaciones agua-cemento bajas, no hay espacio suficiente para que todo el aluminato de calcio reaccione y forme CAH_{10} . El agua liberada por la conversión reacciona con más aluminato de calcio, compensando parcialmente los efectos de la conversión. La resistencia de diseño del concreto se debe basar en la resistencia convertida. Debido a este fenómeno de conversión, el cemento de aluminato de calcio se emplea normalmente en aplicaciones sin finalidades estructurales y se lo usa con cautela (o sencillamente no se lo usa) en aplicaciones estructurales (Taylor 1997).

Cementos de Fosfato de Magnesio

El cemento de fosfato de magnesio es un cemento de fraguado rápido y alta resistencia inicial. Se lo utiliza normalmente en aplicaciones especiales, tales como reparación de pavimentos y estructuras de concreto o por ejemplo en ciertos productos químicos. Este cemento no contiene cemento portland.

CEMENTOS EN LATINOAMÉRICA

Cementos en Argentina

Los cementos en Argentina se clasifican según las normas IRAM 50000 e IRAM 50001, en cementos para uso general y cementos con propiedades especiales, respectivamente.

Los cementos para uso general son: 1) el cemento portland normal (CPN), el cual es un cemento que puede tener hasta 10%, en masa, de escoria de alto horno; 2) el cemento portland con "filler" calcáreo (CPF), el cual puede tener hasta 20% de "filler" calcáreo, en masa; 3) el cemento portland con escoria (CPE), el cual tiene del 11% al 35% de adición de escoria de alto horno; 4) el cemento portland compuesto, que es un cemento con hasta 35% de dos o más adiciones (puzolana, escoria o filler); 5) el cemento portland puzolánico (CPP), el cual tiene del 15% al 50% de adición de puzolana y 6) el cemento de alto horno (CAH), el cual posee del 35% al 75% de adición de escoria. Todos estos cementos deben tener una finura blaine mayor que 225 m^2/kg , tiempo de fraguado inicial superior a 45 minutos y tiempo de fraguado final inferior a 10 horas. Se los puede clasificar en tres rangos de resistencias: CP30 (resistencia mínima a los 28 días de 30 MPa), CP40 (resistencia mínima a los 28 días de 40 MPa, 400 kg/cm^2 o 5800 lb/pulg^2) y CP50 (resistencia mínima a los 28 días de 50 MPa, 500 kg/cm^2 o 7300 lb/pulg^2).

Los cementos con propiedades especiales son: 1) el cemento de alta resistencia inicial (ARI), el cual debe presentar resistencia a compresión a los 7 días superior a 40 MPa, 400 kg/cm^2 o 5800 lb/pulg^2 y a los 28 días superior a 50 MPa, 500 kg/cm^2 o 7300 lb/pulg^2 ; 2) el cemento altamente resistente a los sulfatos (ARS), el cual tiene un contenido máximo de C_3A de 4%; 3) los cementos moderadamente resistentes a los sulfatos (MRS), con contenido máximo de C_3A de 8%; 4) el cemento de bajo calor de hidratación (BCH); 5) el cemento resistente a la reacción álcali-agregado (RRAA) y 6) el cemento blanco, con blancura superior a 70%. Normalmente todos los cementos con propiedades especiales atienden a los requisitos de uno de los cementos de uso general, pero ni todo cemento de uso general atiende a los requisitos del cemento con propiedades especiales. Los cementos en acuerdo con los requisitos de IRAM 50001 satisfacen a los requisitos de ensayos de desempeño físico, oponiéndose a restricciones de ingredientes.

Los cementos son normalmente designados por letras, las cuales indican el tipo de cemento, seguidas por números que indican la resistencia a compresión en MPa los 28 días. Por ejemplo CPN40 es un cemento portland normal con 40 MPa de resistencia a compresión a los 28 días. Cuando el cemento atiende a los requisitos de más de un tipo de cemento, se lo debe designar con las letras de ambos cementos, como por ejemplo el CPN40 (MRS) (cemento portland normal con moderada resistencia a los sulfatos).

Los cementos comercialmente disponibles en Argentina son: CPN, CPN (MRS), CPN (ARI, MRS), CPN (ARS), ARI, ARI (MRS), CPP (BCH), CPP (ARS), CPP (ARS, BCH, RRAA), ARS, CPF, CPC, CPC (ARS), CAH, CAH (RRAA) y ARS. Además, Argentina produce el cemento de albañilería tipo M (según IRAM 1685) y el cemento para pozos petroleros tipo G (MRS), G (ARS) y H (según las normas IRAM 1518 y API 10A).

Cementos en Bolivia

La Norma Boliviana del Cemento (NB 011): Cemento – Definiciones, Clasificación y especificaciones, presenta los siguientes tipos de cementos:

1) Cementos Portland, los cuales se subdividen en: cemento portland tipo I (con hasta 5% de adiciones minerales), cemento portland con puzolana tipo IP (de 6% a 30% de puzolana y hasta 5% de otras adiciones minerales), cemento portland con filler calizo tipo IF (hasta 15% de filler y hasta 5% de otras adiciones minerales), cemento puzolánico tipo P, con hasta 40% de puzolana y 5% de otras adiciones minerales. 2) Cementos con características especiales, los cuales pueden tener propiedades especiales como resistencia a los sulfatos, bajo calor de hidratación y cemento blanco. Los cementos se pueden, aún, clasificar por su categoría de resistencia como alta, media y corriente, respectivamente para las resistencias a compresión a los 7 días de 40 MPa, 30 MPa y 25 MPa (400 kg/cm^2 [5800 lb/pulg^2], 300 kg/cm^2 [4350 lb/pulg^2] y 250 kg/cm^2 [3600 lb/pulg^2]).

Los cementos comercialmente disponibles en Bolivia son el IF e IP de media resistencia y el IP de alta resistencia.

Cementos en Chile

Los cementos en Chile se clasifican, según la norma NCh148 (Cemento – terminología, clasificación y especificaciones generales), en cinco clases y 2 grados: 1) cemento portland, el cual tiene como máximo 3% de adiciones, 2) cemento siderúrgico. El cemento portland siderúrgico puede tener hasta 30% de adición de escoria de alto horno, mientras que el cemento siderúrgico tiene del 30% al 75% de adición de escoria, en masa, 3) cemento con agregado tipo A. El cemento portland con agregado tipo A puede tener hasta 30% de agregado tipo A, mientras que el cemento con agregado tipo A tiene del 30% al 50% de adición de agregado tipo A. El agregado tipo A es una mezcla de material calcáreo-arcilloso que ha sido calcinado a una temperatura superior a 900°C y materiales a base de óxido de aluminio, silicio e hierro; 4) cemento puzolánico. El cemento portland puzolánico puede recibir hasta 30% de adición de puzolana, mientras que el cemento puzolánico tiene del 30% al 50% de puzolana y 5) cemento con fines especiales. Los cementos de las clases anteriores pueden estar de acuerdo con dos grados de resistencia, cemento corriente (resistencia compresión mínima a los 28 días de 25 MPa [250 kg/cm^2 o 3600 lb/pulg^2]) y cemento de alta resistencia (resistencia compresión mínima a los 28 días de 35 MPa [350 kg/cm^2 o 5100 lb/pulg^2]).

Los cementos comercialmente disponibles en Chile son el cemento portland siderúrgico de alta resistencia el cemento siderúrgico corriente, el cemento portland - puzolánico de alta resistencia, el cemento puzolánico

corriente y los productos especialmente producidos para aplicaciones particulares.

Cementos en Colombia

La NTC 30 (Cemento Portland – clasificación y nomenclatura) clasifica los cementos colombianos en seis tipos básicos: 1) cemento portland tipo 1, para el uso general. Este cemento puede, también, ser tipo 1-M, el cual presenta resistencias más elevadas, tipo 1-M-A y tipo 1-A, ambos con materiales inclusores de aire, 2) cemento portland de moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación, el cual puede recibir material inductor de aire (tipo 2-A), 3) cemento portland tipo 3, el cual presenta alta resistencia inicial y puede recibir inductor de aire (tipo 3-A), 4) cemento portland tipo 4, el cual desarrolla bajo calor de hidratación, 5) cemento portland de alta resistencia a los sulfatos y 6) el cemento portland blanco.

La NTC 31 define el cemento portland como un material que se puede obtener tanto por la pulverización del clinker con el sulfato, como también puede recibir adiciones, que no interfieran en las propiedades de cada tipo de cemento. Esta norma presenta más seis tipos de cemento: 1) cemento portland de escoria de alto horno, la cual permite la adición del 15% al 85% de escoria granulada de alto horno, 2) cemento siderúrgico supersulfatado, producto que contiene escoria granulada de alto horno y pequeñas cantidades de clinker portland, cemento portland y cal hidratada o una combinación de estos materiales y sulfato de calcio. El contenido de escoria de alto horno debe ser superior al 70% de la masa total, 3) cemento portland puzolánico, el cual posee un contenido de puzolana entre el 25% y el 50% de la masa total, 4) cemento portland con adiciones, el cual puede presentar un contenido de adiciones de el 15% a el 30% de la masa total, 5) cemento de albañilería que es un producto obtenido por la pulverización conjunta de clinker y materiales con propiedades hidráulicas o puzolánicas y la adición de sulfato de calcio. El contenido de materiales adicionales debe estar comprendido entre el 15% y el 50% de la masa total, 6) cemento aluminoso, producido a través de la pulverización del clinker aluminoso, el cual debe presentar una cantidad de óxido de aluminio superior al 30% y la de óxido de hierro inferior a 20% de la masa total.

Los cementos comercialmente disponibles en el mercado colombiano son: tipo 1, tipo 1M, tipo 2, tipo 3, cemento siderúrgico, cemento ASTM tipo II y cemento blanco tipos 1 y 2.

Cementos en Costa Rica

Los cementos en Costa Rica se clasifican según la norma NCR 40 (Norma para Cementos Hidráulicos) en ocho tipos diferentes: 1) Cemento hidráulico portland tipo I, el cual puede tener adición de hasta 10% de otros materiales que

no el clinker, tales como fillers (rellenos) calizos, puzolanas, cenizas volantes y sulfato de calcio, siendo que éste último no debe exceder 5% de la masa total del cemento. Este cemento también puede presentar características de bajo contenido de álcalis; 2) Cemento portland 1 modificado con puzolana – Tipo I (MP), el cual tienen hasta 5% de caliza y hasta 15% de puzolana; 3) Cemento portland puzolánico – Tipo P, que tiene hasta 5% de caliza y hasta 40% de puzolana; 4) Cemento portland I modificado con caliza – Tipo I (MC), el cual tiene del 5% al 15% de adición de caliza; 5) Cemento portland Tipo II, que es un cemento de moderada resistencia a sulfatos, compuesto básicamente por clinker y un regulador de fraguado. Este cemento también puede presentar características especiales de moderado calor de hidratación y bajo contenido de álcalis; 6) Cemento portland Tipo III, que es un cemento de elevada resistencia temprana a compresión; 7) Cemento tipo IV, es un cemento de bajo calor de hidratación, compuesto básicamente por clinker y un regulador de fraguado. Este cemento también puede presentar características de moderada y alta resistencia a sulfatos y bajo contenido de álcalis; 8) Cemento portland Tipo V, que es un cemento de alta resistencia a sulfatos, el cual puede presentar características de bajo contenido de álcalis. Además de estos, los cementos tipo I, II y III pueden tener características especiales de moderada resistencia a sulfatos (MS), alto contenido de aire (A) y bajo calor de hidratación (MH).

Los cementos disponibles comercialmente en Costa Rica son Tipo I, Tipo I (MP), Tipo I (MC), Tipo P, ARI (alta resistencia inicial) y el cemento de albañilería.

Cementos en El Salvador

Los cementos fabricados en El Salvador, normalmente cumplen con las normas ASTM C 150, ASTM C 595, ASTM C 91 y ASTM C 1157. Los disponibles en el mercado son: tipo I, tipo IP, albañilería M, tipo HE, tipo GU, blanco tipo I y un cemento que se asemeja al tipo I, pero tiene adición de puzolana y filler y se usa para la producción de prefabricados.

Cementos en México

Los cementos mexicanos se especifican según la norma NMX –C-414- ONNCCE. De acuerdo con esta norma, hay seis tipos básicos de cementos:

CPO – cemento portland ordinario, el cual puede tener hasta 5% de adición de materiales tales como escoria, puzolanas, humo de sílice o caliza;

CPP – cemento portland puzolánico, que posee del 6% al 50% de material puzolánico, con relación a la masa total del cemento;

CPEG – cemento portland con escoria de alto horno, el cual tiene del 6% al 60% de escoria;

CPC – cemento portland compuesto, se compone de clinker, yeso y dos o más adiciones. Las adiciones se

pueden componer del 6% al 35% de escoria, del 6% al 35% de material puzolánico, del 1% al 10% de humo de sílice y del 6% al 35% de caliza. Independientemente del tipo y cantidad de material adicionado, la cantidad de clinker e yeso debe ser del 50% al 94%;

CPS – cemento portland con humo de sílice, que recibe del 1% al 10% de humo de sílice;

CEG – cemento con escoria de alto horno, el cual tiene una cantidad de escoria que varía del 61% al 80%.

Además, estos cementos pueden presentar características especiales, tales como RS – resistente a sulfatos; BRA – baja reactividad álcali-agregado; BCH – bajo calor de hidratación; B – blanco.

Los cementos aún se dividen en clases de resistencia: 20, 30, 40, las cuales designan resistencias a compresión mínima a los 28 días de 20 MPa, 30 MPa y 40 MPa (200 kg/cm², 300 kg/cm² y 400 kg/cm²), respectivamente. Hay dos clases más de resistencia: 30R y 40R, que además de presentar resistencia a compresión mínima a los 28 días de 30 MPa y 40 MPa, respectivamente, también deben presentar resistencia a compresión a los 3 días de 20 MPa (200 kg/cm²) y 30 MPa (300 kg/cm²), respectivamente. La norma también especifica resistencias máximas a los 28 días, para las clases 20, 30 y 30R. El tiempo mínimo de fraguado inicial de todas las clases es 45 minutos.

Los cementos se designan por uno de los 6 tipos de cementos, seguido por la clase de resistencia y por la característica especial. Por ejemplo, un cemento portland puzolánico de clase resistente 30R, de baja reactividad álcali-agregado y bajo calor de hidratación, se designaría como CPP 30R BRA/BCH.

La norma NMX – C – 184 presenta el cemento de escoria, que se compone del 65% al 90% de escoria de alto horno.

Además de estos cementos, aún están disponibles en el mercado mexicano, el cemento para servicios de albañilería y el cemento para cementaciones de pozo de petróleo tipo G (según la norma NMX – C – 315).

Cementos en Perú

Perú tiene una gran variedad de cementos, definidos por las normas NTP 334.009 (Cementos. Cemento portland – requisitos), NTP 334.090 (Cemento. Cemento portland adicionado – requisitos) y NTP 334.082 (Cementos portland especificación de la performance). Los cementos portland definidos en la norma NTP 334.009 son: tipo I (normal) con resistencia a los 7 días de 19 MPa (190 kg/cm² o 2800 lb/pulg²), tipo II (moderada resistencia a los sulfatos), con resistencia a los 7 días de 17 MPa (170 kg/cm² o 2500 lb/pulg²) y C₃A máximo 8%, tipo III (alta resistencia inicial), tipo IV (bajo calor de hidratación), con resistencia a los 28 días de 17 MPa (170 kg/cm² o 2500 lb/pulg²) y tipo V (alta resistencia a los sulfatos) con resistencia a los 28 días de 21 MPa (210 kg/cm² o 3000 lb/pulg²) y C₃A máximo

5%. Esta norma trae tanto requisitos químicos como también físicos para estos cementos.

Los cementos adicionados son: el cemento portland puzolánico (IP y P), el cual puede tener del 15% al 40% de puzolana en masa, cemento portland puzolánico modificado – I(PM), que tiene hasta 15% de puzolana, cemento portland de escoria, el cual tiene del 25% al 70% de adición de escoria de alto horno, cemento portland de escoria modificado – I(SM), que puede tener hasta 25% de escoria, el cemento portland compuesto (I Co) que puede tener una adición de caliza o material inerte de hasta 30%, desde que este material tenga, como mínimo, 75% de CaCO_3 . Estos cementos pueden presentar una combinación de otras propiedades, como la moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación, a través de adición de los sufijos MS y MH, respectivamente. El requisito de resistencia a los 28 días de estos cementos es de 25 MPa (260 kg/cm^2 o 3600 lb/pulg^2), a excepción de los cementos IS(MH) y IP(MH), los cuales deben presentar, por lo menos, 20 MPa (200 kg/cm^2 o 2900 lb/pulg^2) y el cemento P, el cual debe presentar, por lo menos, 21 MPa (210 kg/cm^2 o 3100 lb/pulg^2) a los 28 días.

La norma NTP 334.082 trae los requisitos de desempeño para los cementos portland para aplicaciones generales y especiales, sin restricciones a la composición o a los constituyentes de los cementos. Esta norma tiene como base la ASTM C 1157. La norma diferencia los cementos portland modificados (con hasta 15% de adiciones) de los cementos adicionados (con más del 15% de adiciones) y los clasifica según sus propiedades: tipo GU (construcciones generales), HE (alta resistencia inicial), MS (moderada resistencia a los sulfatos), tipo HS (alta resistencia a los sulfatos), tipo MH (moderado calor de hidratación) y LH (bajo calor de hidratación) y la opción R de baja reactividad a los álcalis con agregados reactivos.

Los cementos comercialmente disponibles en el mercado peruano son: tipo I y tipo I (bajo contenido de álcalis), tipo II y tipo II (bajo contenido de álcalis), tipo V, tipo IP, tipo I(PM), tipo MS, tipo ICo y el cemento de albañilería.

Cementos en Uruguay

La norma UNIT 512 (Cemento. Definiciones y nomenclatura) clasifica los cementos en: 1) cemento portland, 2) cemento portland de escoria, el cual puede tener del 25% al 65% de escoria, 3) cemento portland puzolánico, con un contenido de puzolana entre 15% y 40%, 4) cemento adicionado, que puede contener hasta 30% de adiciones y

cemento de albañilería. La UNIT 1011 trae los requisitos para el cemento con filler calcáreo, la UNIT 1024, los requisitos para el cemento de bajo calor de hidratación y la UNIT 984 presenta los requisitos del cemento de albañilería.

Las Tablas 2-5, 2-6 y 2-7 presentan los cementos portland en Latinoamérica y las normas de especificación de estos cementos.

Cementos en Venezuela

Los cementos en Venezuela se especifican de acuerdo con COVENIN 28 (Cemento Portland – Especificaciones) y COVENIN 3134 (Cemento Portland con Adiciones. Especificaciones).

La COVENIN 28 presenta cinco tipos básicos de cemento: Tipo I, para uso general. Este cemento debe presentar resistencia a compresión a los 28 días de, por lo menos, 27.4 MPa; el cemento Blanco se encuentra en esta categoría; Tipo II, cemento de moderada resistencia, a sulfatos; Tipo III, cemento de alta resistencia inicial. Éste debe presentar una resistencia a compresión mínima a los 3 días de 246 kg/cm^2 o 24.1 MPa; Tipo IV, cemento de bajo calor de hidratación y Tipo V, de alta resistencia a sulfatos. Estos cementos deben tener un tiempo de fraguado inicial que supere los 45 minutos y un promedio de finura Blaine de $280 \text{ m}^2/\text{kg}$, a excepción del cemento Tipo II que no posee límites para finura.

La COVENIN 3134 presenta cuatro tipos más de cemento: Cemento portland con adición de caliza (CPCA), el cual tiene una adición de caliza del 5% al 15% de la masa del cemento; Cemento portland con adición de puzolana (CPPZ1, CPPZ2 y CPPZ3), el CPPZ1 tiene un contenido de puzolana que varía del 5% al 15%, el CPPZ2, tiene un contenido de puzolana que está entre 15% y 30% y el CPPZ3 tiene una cantidad de puzolana que varía del 30% al 40% de la masa del cemento; Cemento portland con adición de ceniza volante (CPCV), cuyo contenido de ceniza es mayor que 5% y menor que 40% y el Cemento portland con adición de escoria. Estos cementos deben tener un promedio de finura Blaine de $280 \text{ m}^2/\text{kg}$, tiempo de fraguado inicial que supere los 45 minutos y una resistencia a compresión mínima a los 28 días de 250 kg/cm^2 o 24.5 MPa, a excepción del CPPZ3, cuya resistencia a compresión mínima es de 210 kg/cm^2 o 20.6 MPa.

También se producen en Venezuela los cementos de albañilería tipo M, S y P y los cementos para pozos de petróleo A, B, G y H (según la API 10A).

Tabla 2-5. Normas y Tipos de Cementos Portland Disponibles en Latinoamérica

País	Tipo de Cemento Portland					
	Normal		Moderada resistencia a los Sulfatos		Alta Resistencia Inicial	
	Tipo	Norma	Tipo	Norma	Tipo	Norma
Argentina	CPN	IRAM 50000		IRAM 50001	ARI	IRAM 50001
Bolivia	IF	NB 011	—	—	—	—
Chile	Cemento portland	Nch 148	—	—	ARI	Nch 148
Colombia	I	NTC 121 NTC 321	II	NTC 121 NTC 321	III	NTC 121 NTC 321
Costa Rica	I ²	NCR 40	II ³	NCR 40	III ⁴ o ARI	NCR 40
Ecuador	I	INEN 151 y 152	II	INEN 151 y 152	III	INEN 151 y 152
El Salvador	I	ASTM C 150	—	—	III	ASTM C150
Guatemala	I	NGO41001	—	—	—	—
México	CPO	NMX – C – 414 – ONNCCE	⁵	NMX – C – 414 – ONNCCE	⁶	NMX – C – 414 – ONNCCE
Panamá	I	COPANIT 5	II	COPANIT 5	III	COPANIT 5
Paraguay	I – P	NP 70	—	—	—	—
Perú	I	NTP 334.009	II y MS	NTP 334.009 y NTP 334.082	—	—
Uruguay	P	UNIT 20	—	—	ARI	UNIT 20
Venezuela	I	COVENIN 28	II	COVENIN 28	III	COVENIN 28

País	Bajo Calor de Hidratación		Alta Resistencia a los Sulfatos		Blanco	
	Tipo	Norma	Tipo	Norma	Tipo	Norma
Argentina	⁷	IRAM 50001	ARS	IRAM 50001	—	—
Chile	—	—	—	—	I Blanco	Nch 148
Colombia	—	—	V	NTC 121 NTC 321	Portland Blanco	NTC 1362
Costa Rica	IV	NCR 40	V	NCR 40	—	—
Ecuador	—	—	—	—	Blanco	INEN 151 y 152
El Salvador	—	—	—	—	I – Blanco	ASTM C150
Guatemala	—	—	V	NGO41001	Blanco	NGO41001
México	⁸	NMX – C – 414 – ONNCCE	—	—	CPO B	NMX – C – 414 – ONNCCE
Panamá	—	—	—	—	I – Blanco	ASTM C150
Perú	—	—	V	NTP 334.009	Blanco	NTP334.050
Uruguay	BCH	UNIT 1024	—	—	Blanco	UNIT 20
Venezuela	IV	COVENIN 28	V	COVENIN 28	Blanco I	COVENIN 28

¹ En Argentina, la propiedad de moderada resistencia a los sulfatos está presente en los cementos CPN y ARI.

² Este cemento puede tener características especiales de moderada resistencia a sulfatos (MS), alto contenido de aire (A) y bajo calor de hidratación (MH).

³ Este cemento puede tener características especiales de moderada resistencia a sulfatos (MS), alto contenido de aire (A) y bajo calor de hidratación (MH).

⁴ Este cemento puede tener características especiales de moderada resistencia a sulfatos (MS), alto contenido de aire (A) y bajo calor de hidratación (MH).

⁵ Esta propiedad está presente como una característica especial que se puede añadir a los tipos básicos de cemento (CPO, CPP, CPEG, CPC, CPS, CEG) y se designa como RS.

⁶ Esta característica se encuentra en los tipos básicos de cemento y se designa por las clases 30R y 40R.

⁷ La característica de bajo calor de hidratación está disponible en Argentina en el cemento portland puzolánico.

⁸ Esta propiedad está presente como una característica especial que se puede añadir a los tipos básicos de cemento (CPO, CPP, CPEG, CPC, CPS, CEG) y se designa como BCH.

Tabla 2-6. Normas y Tipos de Cementos Modificados Disponibles en Latinoamérica

	Tipos de Cementos Portland Modificados					
País	Cemento Portland con filler calcáreo		Cemento Portland modificado con escoria		Cemento Portland modificado con puzolana	
	Tipo	Norma	Tipo	Norma	Tipo	Norma
Argentina	CPF	IRAM 50000	CAH	IRAM 50000	—	—
Bolivia	—	—	—	—	IP	NB 011
Chile	—	—	Cemento portland siderúrgico	Nch 148	Cemento portland puzolánico	Nch 148
Colombia	—	—	—	—	1M	NTC 121 NTC 321
Costa Rica	I (MC)	NCR 40	—	—	I (MP)	NCR 40
Ecuador	—	—	—	—	1 (PM)	INEN 490
Guatemala	—	—	—	—	1 PM	NGO41001
México	—	—	—	—	CPS	NMX – C – 414 – ONNCCE
Perú	1 Co	NTP 334.090	—	—	IPM	NTP334.090
Venezuela	CPCA	COVENIN 28	Cemento con escoria	COVENIN 935	CPPZ1 y CPPZ2	COVENIN 28

Tabla 2-7. Normas y Tipos de Cementos Adicionados Disponibles en Latinoamérica

	Tipos de Cementos Portland Modificados							
País	Cemento Portland de Alto Horno		Cemento Puzolánico		Cemento Portland Compuesto		Cemento con Escoria de alto horno	
	Tipo	Norma	Tipo	Norma	Tipo	Norma	Tipo	Norma
Argentina	CAH	IRAM 50000	CPP	IRAM 50000	CPC	IRAM 50000	CPE	IRAM 50000
Bolivia	—	—	—	—	—	—	—	—
Chile	Cemento siderúrgico	Nch 148	Cemento puzolánico	Nch 148	—	—	—	—
Colombia	Cemento portland de escoria de alto horno	NTC 121 NTC 321	—	—	—	—	—	—
Costa Rica	—	—	P	NCR 40	—	—	—	—
Ecuador	—	—	1P, P	INEN 490	—	—	—	—
El Salvador	—	—	IP	ASTM 595	—	—	—	—
México	CPEG	NMX – C – 414 – ONNCCE	CPP	NMX – C – 414 – ONNCCE	CPC	NMX – C – 414 – ONNCCE	CEG	NMX – C – 414 – ONNCCE
Paraguay	S	NP 70	PZ	NP 70	—	—	—	—
Perú	—	—	IP	NTP 334.090	—	—	—	—
Venezuela	—	—	CPPZ3 y CPCV	COVENIN 28	—	—	—	—

Usos de los Principales Tipos de Cementos en Latinoamérica

Cemento Portland Normal, Común u Ordinario. Éste es un cemento para uso general, empleado cuando no sean necesarias propiedades especiales. Pero a este cemento se pueden añadir características especiales como en Argentina donde puede tener alta resistencia inicial, moderada o alta resistencia a los sulfatos, en Colombia donde puede tener alta resistencia, en México donde puede tener resistencia a sulfatos, baja reactividad álcali-agregado, bajo calor de hidratación o blanco y en Perú donde puede presentar bajo contenido de álcalis. Se lo puede utilizar en concreto armado, pavimentos, prefabricados, mampostería, concreto postensado y concreto pretensado.

Moderada Resistencia a los Sulfatos. Ha sido diseñado para estructuras que necesiten moderada resistencia a los sulfatos o bajo calor de hidratación. Se recomienda en edificios y construcciones industriales, puentes, estructuras expuestas a suelos agresivos, al agua con concentración moderada de sulfatos o al agua del mar o estructuras con gran volumen de concreto. En estos cementos el contenido de C_3A se limita a 8%.

Alta Resistencia Inicial. Normalmente se lo conoce como ARI. La alta resistencia inicial de este cemento normalmente es resultado de la mayor área superficial Blaine y no de los productos de hidratación del C_3A . En la mayoría de los países, este cemento se compone de clínker e yeso, pero en Costa Rica puede recibir también pequeñas cantidades de caliza. Se lo utiliza en estructuras de concreto que necesitan de alta resistencia a edades tempranas, tales como pavimentos “fast-track”, concreto prefabricado, concreto de alto desempeño, concreto colocado en tiempo frío, concreto postensado y concreto pretensado.

Bajo Calor de Hidratación. Esta es una propiedad encontrada en cementos indicados para estructuras de concreto masivo. Como el C_3A y el C_3S producen alto calor de hidratación, el contenido de estos compuestos se limita a 7% y 35%, respectivamente.

Alta Resistencia a los Sulfatos. Este cemento se usa cuando la estructura va a estar en contacto con ambientes con alto contenido de sulfatos solubles, tales como cimentaciones en suelos agresivos, pavimentos, estructuras en contacto con el agua del mar, plantas industriales, plantas de tratamiento de agua potable y de aguas residuales. Normalmente el contenido de C_3A permitido es inferior al 5%, a excepción de Argentina que limita el C_3A a 4%.

Blanco. Este cemento puede seguir los requisitos de otros cementos, por ejemplo del cemento portland común, pero

diferenciándose en su color. Se lo utiliza en elementos prefabricados de concreto, concreto arquitectónico, pisos y acabado de fachadas.

Cementos Portland Modificados. Estos cementos se producen por la molienda conjunta del clínker y pequeñas cantidades de adiciones, tales como calizas, puzolanas y escorias. Son para uso general, cuando el concreto no necesite desarrollar alta resistencia inicial, a excepción del cemento ARI de Costa Rica. El área superficial Blaine de estos cementos es, normalmente, mayor para compensar las modificaciones de algunas propiedades (tasa de desarrollo de la resistencia, tiempo de fraguado).

Los cementos portland con filler calcáreo son cementos que reciben pequeñas cantidades de caliza. En Costa Rica y Venezuela el contenido de caliza es de hasta 15 %, en Bolivia hasta 15%, en Argentina hasta 20% y en Colombia hasta 30%, en masa.

En los cementos portland modificados con escoria se permiten cantidades mayores de adiciones: Argentina 35%, Chile 30% y Perú 25%.

En los cementos portland modificados con puzolana la cantidad de puzolana adicionada es de hasta 15% en Perú y hasta 30% en Chile, Bolivia y Venezuela.

Cementos Portland Adicionados (Mezclados). La diferencia entre un cemento adicionado y uno modificado es la mayor cantidad de adición mineral en los adicionados, la cual influye en las principales propiedades del concreto: menor calor de hidratación, desarrollo más lento de la resistencia, menor permeabilidad y mayor durabilidad.

El cemento portland de escoria se usa en construcciones en general, cuando sea necesaria resistencia a la reacción álcali-agregado o cuando se deseen baja permeabilidad y bajo calor de hidratación. Además, su uso es indicado en estructuras expuestas al agua del mar o a sulfatos. Ejemplos de empleo de este cemento son las presas y las estructuras de concreto masivo. Colombia es el país que permite el mayor contenido de escoria (85%), seguido de México y Paraguay (80%), Argentina y Chile (75%), Perú (70%) y Uruguay (65%).

El cemento portland puzolánico se usa en concretos expuestos a condiciones severas, tales como sulfatos y también cuando se van a emplear agregados potencialmente reactivos. El concreto expuesto al agua del mar y el concreto prefabricado sometido al curado térmico son ejemplos de utilización de este tipo de cemento. En Argentina, Chile, Colombia y México el contenido de puzolana puede llegar al 50% y en Bolivia, Perú, Uruguay y Venezuela al 40%.

La Tabla 2-8 presenta un resumen de las aplicaciones de los principales cementos en Latinoamérica.

Tabla 2-8. Aplicación de los cementos más comúnmente usados

País	Aplicaciones					
	Uso general	Bajo calor de hidratación	Alta resistencia inicial	Moderada resistencia a los sulfatos	Alta resistencia a los sulfatos	Resistencia álcali-agregado
Argentina	CPN, CPF, CPC, CPP	CPP (BCH, ARS, RRAA), CPE, CPP (BCH), CAH	CPN (ARI, MRS), ARI	CPN (ARI, MRS), CPE, CPP, CPN (MRS), ARI (MRS)	CPN (ARS), CPN (ARI, MRS), CPP (BCH, ARS, RRAA), ARS, CPC (ARS)	CPP (BCH, ARS, RRAA), CAH
Bolivia	IF, IP					
Chile	Cemento portland puzolánico, cemento portland de alta resistencia, cemento portland	Cemento puzolánico	Cemento portland puzolánico de alta resistencia inicial, cemento portland de alta resistencia inicial siderúrgico	Cemento puzolánico, cemento siderúrgico		
Colombia	1	Cemento siderúrgico	3	2	Cemento siderúrgico, V	
Costa Rica	I, I(MP)	IV	ARI	P	V	
Ecuador	IP	II, P	III	II		1P, P
El Salvador	I, IP		HE			
México	CPO, CPP	CPO – BCH, CPP, CPEG, CPC, CPS, CEG	Cualquier cemento de las clases 30R y 40R	CPO-RS, CPEG, CPC	CEG	CPO - BRA, CPP, CPC
Perú	I, I(PM), IP, 1Co			II, MS	V	I (bajo contenido de álcalis), II (bajo contenido de álcalis)
Uruguay	Cemento portland, cemento adicionado cemento con filler calcáreo	Cemento portland de escoria, cemento puzolánico		Cemento portland de escoria, cemento puzolánico		
Venezuela	I, CPPZ1, CPCA	IV, CPPZ2, CPPZ3, CPCV, cemento con escoria	III	II, CPPZ1, CPPZ2, CPPZ3	V, CPPZ3, CPCV	CPPZ1, CPPZ2, CPPZ3

ELECCIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE CEMENTOS

Al especificarse el cemento para un proyecto, se debe estar seguro de la disponibilidad de los tipos de cemento, además, la especificación debe permitir flexibilidad en la selección del cemento. La limitación de un proyecto a un sólo tipo de cemento, una marca o una norma de cemento puede resultar en retrasos del proyecto y puede impedir el mejor uso de materiales locales. No se deben requerir los cementos con propiedades especiales, a menos que características especiales sean necesarias. Además, el uso de materiales cementantes suplementarios no debe inhibir el uso de cualquier cemento portland o cemento adicionado

en particular. Las especificaciones de proyecto deben enfocarse en la necesidad de la estructura de concreto y permitir la utilización de una variedad de materiales para que se alcancen estas necesidades.

Si no se requieren propiedades especiales (tales como bajo calor de hidratación o resistencia a los sulfatos), se permite el uso de todos los cementos de uso general. Se debe observar que algunos tipos de cementos siguen también los requisitos de otros tipos de cemento, por ejemplo, todos los cementos ASTM tipo II atienden a los requisitos del cemento tipo I, pero no todo cemento tipo I atiende a los requisitos del cemento tipo II. Consulte las Tablas 2-3 y 2-8 para la orientación sobre el uso de los diferentes tipos de cementos.

Disponibilidad de Cementos

Algunos tipos de cementos pueden no estar disponibles prontamente en todas las regiones de los diferentes países. Por lo tanto, antes de se especificar un determinado tipo de cemento, se debe verificar su disponibilidad en la región donde será utilizado.

El cemento portland común normalmente se encuentra en reserva y se lo suministra cuando no se ha especificado ningún tipo de cemento. En los Estados Unidos, los cementos portland normal y de moderada resistencia a los sulfatos corresponden al 90% de los despachos de las plantas de cemento. Algunos cementos pueden recibir más de una designación, por ejemplo, cemento normal con moderada resistencia a los sulfatos, lo que significa que atiende a los requerimientos de las especificaciones de ambos cementos. El cemento de alta resistencia inicial y el cemento blanco, normalmente están disponibles en grandes áreas metropolitanas o se los puede pedir especialmente. El cemento de bajo calor de hidratación, normalmente se fabrica cuando ha sido especificado en un proyecto específico (estructuras masivas como una presa) y, por lo tanto, corrientemente no está disponible para la entrega inmediata. El cemento de alta resistencia a los sulfatos sólo se encuentra disponible en algunas regiones para las cuales se pueden solicitar. Los cementos con aire incluido son difíciles de obtenerse, pues su popularidad disminuyó con el aumento de la popularidad de los aditivos inclusores de aire. Consulte PCA (2002) para las estadísticas del uso del cemento en los Estados Unidos.

Si un determinado cemento no está disponible, normalmente se pueden obtener resultados similares con el uso de otro cemento que esté disponible. Por ejemplo, el concreto de alta resistencia inicial se puede preparar con el empleo de mayores contenidos de cemento y relaciones agua-cemento menores. También, se disminuyen los efectos del calor de hidratación con el uso de mezclas pobres, menores volúmenes de colado (vaciado), enfriamiento artificial o la adición de puzolana. El cemento de alta resistencia a los sulfatos es más difícil de obtenerse, pero debido a la variedad de compuestos permitida por las especificaciones, el cemento de moderada resistencia a los sulfatos puede atender a los requisitos del cemento de alta resistencia a los sulfatos.

En los Estados Unidos, aproximadamente la mitad de los departamentos de transporte de los estados utiliza las especificaciones del cemento AASHTO, a pesar de que la AASHTO designa cementos que no están disponibles en todos los sitios.

Los cementos adicionados se los puede obtener con cierta facilidad, pero ciertos cementos pueden no estar disponibles en todas las regiones. Cuando los cementos adicionados sean necesarios, pero no estén disponibles, se puede alcanzar propiedades similares con el uso del cemento portland común y la adición al concreto, en la planta de concreto premezclado (elaborado, preparado, industrializado), de puzolana o escoria finamente

granulada de alto horno, según las normas vigentes en el país. Como cualquier otra mezcla de concreto, se las debe ensayar antes de su utilización, para la verificación del tiempo de fraguado, del desarrollo de resistencia, de la durabilidad y de otras propiedades.

Aplicaciones Relacionadas con el Almacenamiento de Agua Potable

Por décadas, se ha usado el concreto de manera segura en aplicaciones relacionadas con el almacenamiento de agua potable. Los materiales en contacto con el agua deben satisfacer a requisitos especiales para el control de la entrada de elementos en el abastecimiento de agua. Algunos sitios pueden solicitar que el cemento y el concreto atiendan a requisitos especiales del Instituto Nacional de Normas Norteamericanas/Norma de la Fundación Sanitaria Nacional (American National Standard Institute/Nacional Sanitation Foundation Standard) ANSI/NSF 61, Componentes del Sistema de Agua Potable – Efectos en la Salud (*Drinking Water System Components – Health Effects*) o normas específicas de cada país. La ANSI/NSF 61 está adaptándose para cada estado de los EE.UU., para garantizar que los productos tales como tubería, recubrimientos y capas y procesos de abastecimiento sean seguros para su uso en sistemas de agua potable para la población.

Los cementos que se usen en componentes de los sistemas de abastecimiento de agua potable, tales como tuberías y depósitos, se deben someter a los ensayos (pruebas) bajo la ANSI/NSF 61. Kanare (1995) resume las especificaciones y los programas de pruebas necesarios para la certificación del cemento para su uso en aplicaciones de agua potable. Consulte el código de construcción local o las autoridades locales para determinar si se requiere el uso de cementos certificados para proyectos de agua, tales como tuberías en concreto y depósitos en concreto (Fig. 2-24).



Fig. 2-24. El concreto ha demostrado décadas de uso seguro en aplicaciones relacionadas con el almacenamiento de agua potable, tales como tanques de concreto. (IMG12467)

Especificaciones Canadienses y Europeas

En algunos casos, los proyectos diseñados por compañías de ingeniería de otros países se refieren a normas de cemento diferentes de las normas nacionales y de las normas ASTM y AASHTO. Por ejemplo, la norma europea de cemento, EN 197, aparece algunas veces en las especificaciones de proyecto. En la norma EN 197, los cementos tipos CEM I, II, III, IV y V no corresponden a los tipos de cementos en las normas Latinoamericanas y en los EE.UU., ni tampoco los cementos de la ASTM o los de las normas Latinoamericanas pueden sustituir los cementos EN especificados sin la aprobación del diseñador. El cemento CEM I es un cemento portland y los cementos CEM de II a V son cementos adicionados. La EN 197 también tiene clases (32.5, 42.5 y 52.5 MPa).

A veces, no hay equivalencia directa entre los cementos de la ASTM y otras normas de cemento de los diferentes países, debido a las diferencias en los ensayos (pruebas) y límites de las propiedades requeridas. Cuando se ha especificado un cemento según una norma que no sea nacional o se ha especificado un cemento que no esté disponible en el mercado nacional, la mejor solución es informar al diseñador cuales son los cementos disponibles en la región y pedirle que modifique las especificaciones del proyecto para que se permita el uso del cemento disponible según las normas locales.

Los cementos canadienses CSA A5 tipos 10, 20, 30, 40 y 50 son esencialmente los mismos de los tipos I a V de la ASTM C 150 (AASHTO m 85), respectivamente, excepto por permitir hasta 5% de caliza en los cementos tipos 10 y 30.

Los cuatro tipos de cementos hidráulicos adicionados indicados en la CSA A362 son:

- Cemento portland de alto horno (S)
- Cemento portland de ceniza volante (F)
- Cemento portland de humo de sílice (SF)
- Cemento adicionado ternario

Sigue la nomenclatura de los cementos adicionados canadienses:

TE-A/B

Siendo:

T = el desempeño equivalente para los cementos portland tipos 10, 20, 30, 40 o 50;

E = una indicación que el cemento tiene un desempeño equivalente de las propiedades físicas especificadas en la CSA A 362, Tabla 2;

A = el material suplementario predominante y

B = el material suplementario secundario, sólo especificado en el caso del cemento ternario.

Ejemplos:

10E-S es un cemento portland de alto horno que tiene un desempeño equivalente al cemento portland tipo 10.

40E-F es un cemento portland de ceniza volante que tiene un desempeño equivalente al cemento portland tipo 40.

50E-S/SF es un cemento adicionado ternario que tiene un desempeño equivalente al cemento portland tipo 50, con escoria como el principal material cementante suplementario y el humo de sílice el material cementante suplementario secundario.

COMPUESTOS QUÍMICOS E HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

En la fabricación del clínker de cemento portland, durante la calcinación, el calcio combina con otros componentes de la mezcla cruda para formar cuatro compuestos principales que corresponden al 90% de la masa del cemento. Durante la molienda, se añaden yeso (4% hasta 6%) u otra fuente de sulfato de calcio y otros auxiliares de molienda. Los químicos del cemento usan las siguientes abreviaturas químicas para describir los compuestos:

A = Al_2O_3 , C = CaO , F = Fe_2O_3 , H = H_2O , M = MgO , S = SiO_2 y $\bar{\text{S}}$ = SO_3 .

Se usa el término “fase” preferiblemente al término “compuesto” para describirse los componentes del clínker. Siguen los cuatro compuestos principales en el cemento portland, sus fórmulas químicas aproximadas y abreviaturas:

Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	= C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	= C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	= C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	= C_4AF

Siguen las formas de sulfato de calcio, sus fórmulas químicas y abreviaturas:

Sulfato de calcio anhidro (anhidrita)



Sulfato de calcio dihidratado (yeso)



Hemidrato de sulfato de calcio



El yeso, sulfato de calcio dihidratado, es la fuente de sulfato más empujada en el cemento.

El C_3S y el C_2S en el clínker se conocen como alita y belita, respectivamente. La alita constituye del 50% al 70% del clínker, mientras que la belita es responsable por sólo 15% al 30%. Los compuestos de aluminato constituyen aproximadamente del 5% al 10% del clínker y los compuestos de ferrita del 5% al 15% (Taylor 1997). Estos y otros compuestos se los pueden observar y analizar a través del uso de técnicas microscópicas (consulte Fig. 2-25,

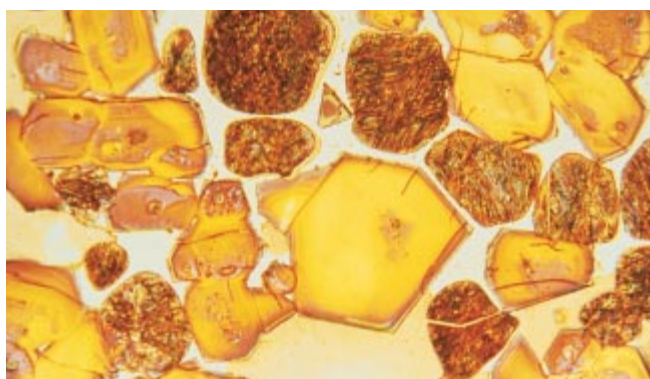


Fig. 2-25. (izquierda) El examen de secciones finas pulidas de clinker portland muestra la alita (C_3S) como cristales angulares y claros. Los cristales más oscuros y redondeados son la belita (C_2S). Aumento 400X. (derecha) Micrografía del microscopio electrónico de barrido (SEM) de los cristales de alita en el clinker portland. Aumento 3000X. (IMG12466, IMG12465)

ASTM C 1356 y Campbell 1999). La Tabla 2-9 trae algunas normas empleadas para el análisis químico.

En presencia de agua, estos compuestos se hidratan (se combinan químicamente con el agua) para formar nuevos compuestos, los cuales son la infraestructura de la pasta de cemento endurecida en el concreto (Fig. 2-26). Los silicatos de calcio, C_3S y C_2S , se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (arcaicamente llamado gel de tobermorita). El cemento portland hidratado contiene del 15% al 25% de hidróxido de calcio y aproximadamente 50% de silicato de calcio hidratado, en masa. La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al silicato de calcio hidratado (Fig. 2-27). El C_3A reacciona con el agua y el hidróxido de calcio para formar aluminato tetraclórico hidratado. El C_4AF reacciona con el agua para formar ferroaluminato de calcio hidratado. El C_3A , sulfato (yeso,

Tabla 2-9. Normas para el Análisis Químico del Clínter y del Cemento

País	Normas
Argentina	IRAM 1504, 1591-1, 1692
Chile	NCh147
Colombia	NTC 184
Ecuador	NTE 160, 192, 193, 194, 203
EE.UU.	ASTM C 1356
México	NMX – C – 131
Perú	NTP 334.086
Uruguay*	UNIT-NM 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 125, UNIT 22, 520, 1013
Venezuela	COVENIN 0109

* Las normas UNIT –NM son normas para el Uruguay y también para el MERCOSUR.

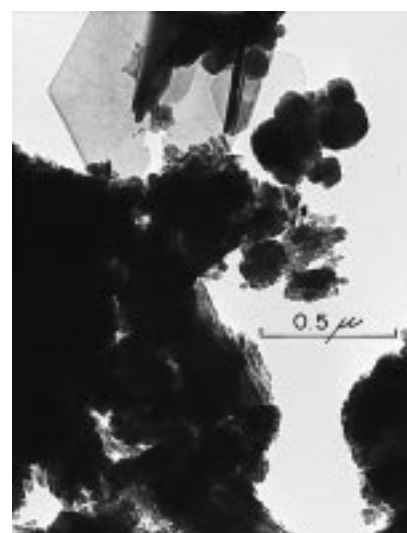


Fig. 2-26. Micrografías electrónicas de (izquierda) silicato dicálcico hidratado, (medio) silicato tricálcico hidratado y (derecha) cemento portland normal hidratado. Observe la naturaleza fibrosa de los productos hidratos de silicato de calcio. Fragmentos rotos de cristalitas de hidróxido de calcio angular también están presentes (derecha). La unión de las fibras y la adhesión de las partículas de hidratación son responsables por el desarrollo de la resistencia de las pasta de cemento portland. Referencias (izquierda y el medio) Brunauer 1962 y (derecha) Copeland y Schulz 1962. (IMG12464, IMG12463, IMG12462)

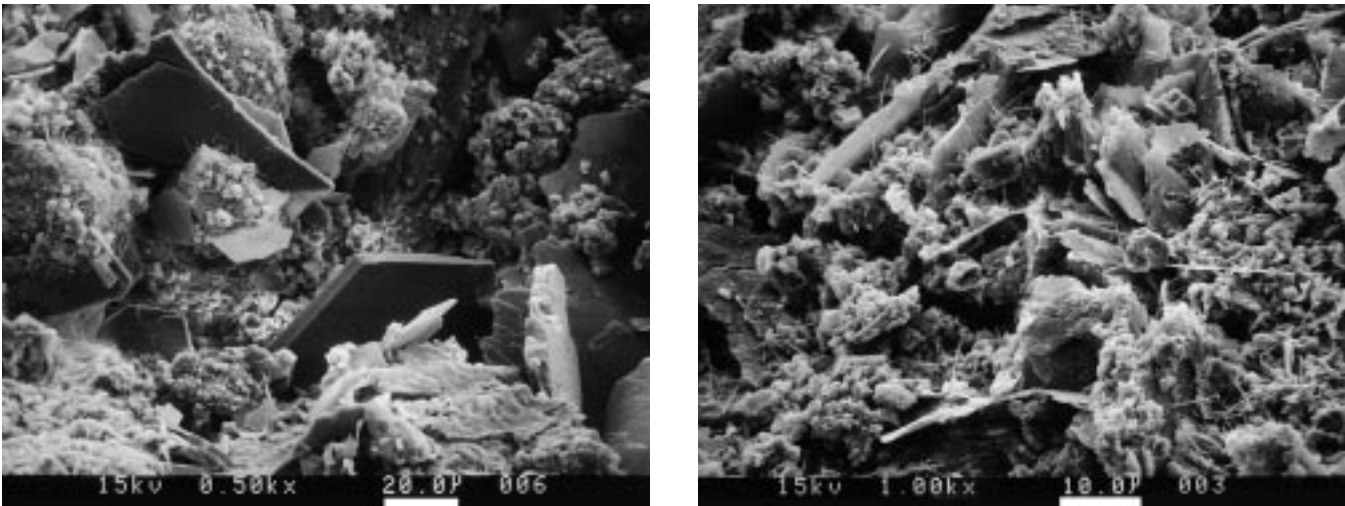


Fig. 2-27. Micrografías electrónicas de barrido de una pasta endurecida de cemento (izquierda) aumento 500X y (derecha) aumento 1000X). (IMG12461, IMG12460)

anhidrita u otra fuente de sulfato) y el agua se combinan para formar etringita (trisulfoaluminato de calcio hidratado), monosulfato de calcio y otros compuestos afines. Estas transformaciones básicas de los compuestos se presentan en la Tabla 2-10. Brunauer (1957), Copeland y otros (1960), Lea (1971), Powers y Brownyard (1947), Powers (1961) y Taylor (1997) presentaron la estructura de los poros y la química de las pastas de cemento. La Figura 2-28 muestra los volúmenes relativos estimados de los compuestos en las pastas hidratadas de cemento portland.

Un modelo computacional para la hidratación y el desarrollo de la microestructura, en la Web, se encuentra en NIST (2001) [<http://vcctl.cbt.nist.gov>].

El porcentaje aproximado de cada compuesto se puede calcular a través del análisis químico de los óxidos del

cemento anhidro (cálculos de Bogue). Debido a las imprecisiones de los cálculos de Bogue, se pueden determinar los porcentajes de los compuestos de manera más precisa a través de las técnicas de difracción de rayos X (ASTM C 1365, IRAM 1714, NTP 334.108). La Tabla 2-11 presenta la composición típica de los compuestos elementales así como la finura de cada uno de los principales tipos de cemento portland en los EE.UU.

Normalmente se describen los elementos como óxidos sencillos para la consistencia de las normas. Sin embargo, raramente se encuentran en el cemento en la forma de óxidos. Por ejemplo, el azufre del yeso normalmente se designa como SO₃ (trióxido de azufre), sin embargo el cemento no contiene ningún trióxido de azufre. Las cantidades de calcio, sílice y alúmina establecen la cantidad de

Tabla 2-10. Reacciones de Hidratación de los Compuestos del Cemento Portland (Expresados en óxidos)

2 (3CaO•SiO ₂) Silicato tricálcico	+ 11 H ₂ O agua	= 3CaO•2SiO ₂ •8H ₂ O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ 3 (CaO•H ₂ O) Hidróxido de calcio
2 (2CaO•SiO ₂) Silicato dicálcico	+ 9 H ₂ O agua	= 3CaO•2SiO ₂ •8H ₂ O Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ CaO•H ₂ O Hidróxido de calcio
3CaO•Al ₂ O ₃ Aluminato tricálcico	+ 3 (CaO•SO ₃ •2H ₂ O) Yeso	+ 26 H ₂ O agua	= 6CaO•Al ₂ O ₃ •3SO ₃ •32H ₂ O Etringita
2 (3CaO•Al ₂ O ₃) Aluminato tricálcico	+ 6CaO•Al ₂ O ₃ •3SO ₃ •32H ₂ O Etringita	+ 4 H ₂ O agua	= 3 (4CaO•Al ₂ O ₃ •SO ₃ •12H ₂ O) Monosulfoaluminato de calcio
3CaO•Al ₂ O ₃ Aluminato tricálcico	+ CaO•H ₂ O Hidróxido de calcio	+ 12 H ₂ O agua	= 4CaO•Al ₂ O ₃ •13H ₂ O Aluminato tretacálcico hidratado
4CaO•Al ₂ O ₃ •Fe ₂ O ₃ Ferroaluminato tetraacálcico	+ 10 H ₂ O agua	+ 2 (CaO•H ₂ O) Hidróxido de calcio	= 6CaO•Al ₂ O ₃ •Fe ₂ O ₃ •12H ₂ O Ferroaluminato de calcio hidratado

Nota: Esta tabla enseña sólo las transformaciones principales y no todas las transformaciones que ocurren. La composición del silicato de calcio hidratado (C-S-H) no es estequiométrica (Tennis y Jennings 2000).

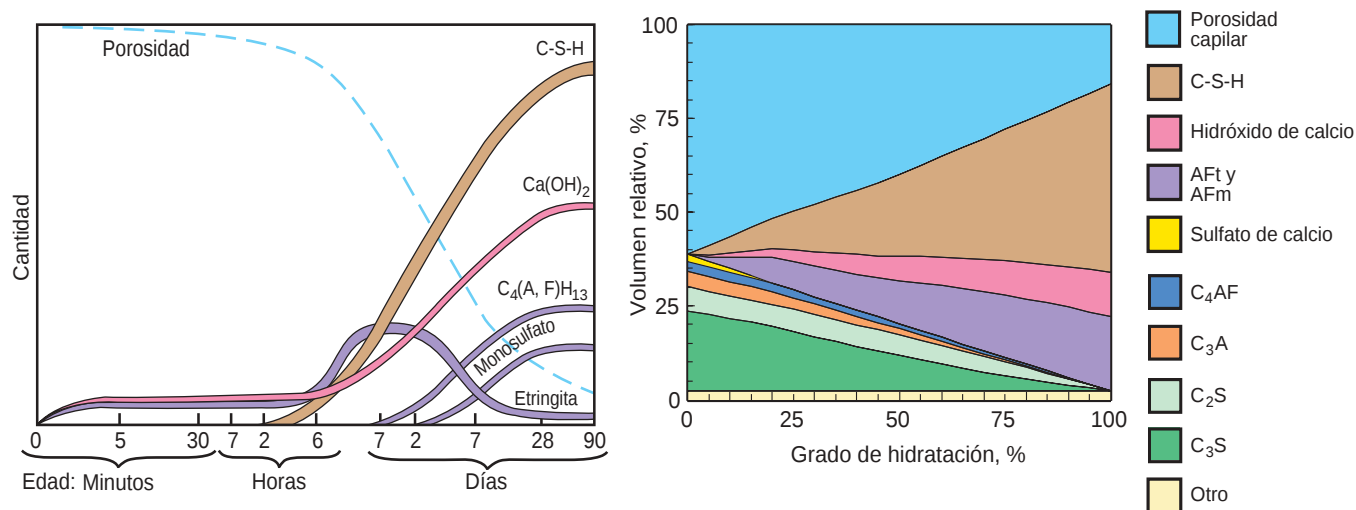


Fig. 2-28. Volúmenes relativos de los compuestos principales en la microestructura de las pastas de cemento en proceso de hidratación (izquierda) en función del tiempo (adaptado de Locher, Richartz y Sprung 1976) y (derecha) en función del grado de hidratación, estimado por el modelo de computadora para la relación agua-cemento de 0.50 (adaptado de Tennis y Jennings 2000). Los valores son para la composición media de un cemento tipo I (Gebhardt 1995): C₃S = 55%, C₂S = 18%, C₃A = 10% y C₄AF = 8%. “AFt y AFm” incluyen etringita (AFt) y monosulfoaluminato de calcio (AFm) y otros compuestos hidratados de aluminato de calcio. Consulte la Tabla 2-5 para la transformación de los compuestos.

Tabla 2-11. Composición Química, Composición de los Compuestos y Finura de los Cementos de los EE.UU.

Tipo de cemento portland	Composición química, %						Na ₂ O eq	Composición potencial de los compuestos, %				Finura Blaine m ² /kg
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
I (min-max)	18.7-22.0	4.7-6.3	1.6-4.4	60.6-66.3	0.7-4.2	1.8-4.6	0.11-1.20	40-63	9-31	6-14	5-13	300-421
I (promedio)	20.5	5.4	2.6	63.9	2.1	3.0	0.61	54	18	10	8	369
II** (min-max)	20.0-23.2	3.4-5.5	2.4-4.8	60.2-65.9	0.6-4.8	2.1-4.0	0.05-1.12	37-68	6-32	2-8	7-15	318-480
II** (promedio)	21.2	4.6	3.5	63.8	2.1	2.7	0.51	55	19	6	11	377
III (min-max)	18.6-22.2	2.8-6.3	1.3-4.9	60.6-65.9	0.6-4.6	2.5-4.6	0.14-1.20	46-71	4-27	0-13	4-14	390-644
III (promedio)	20.6	4.9	2.8	63.4	2.2	3.5	0.56	55	17	9	8	548
IV (min-max)	21.5-22.8	3.5-5.3	3.7-5.9	62.0-63.4	1.0-3.8	1.7-2.5	0.29-0.42	37-49	27-36	3-4	11-18	319-362
IV (promedio)	22.2	4.6	5.0	62.5	1.9	2.2	0.36	42	32	4	15	340
V (min-max)	20.3-23.4	2.4-5.5	3.2-6.1	61.8-66.3	0.6-4.6	1.8-3.6	0.24-0.76	43-70	11-31	0-5	10-19	275-430
V (promedio)	21.9	3.9	4.2	63.8	2.2	2.3	0.48	54	22	4	13	373
Blanco (min-max)	22.0-24.4	2.2-5.0	0.2-0.6	63.9-68.7	0.3-1.4	2.3-3.1	0.09-0.38	51-72	9-25	5-13	1-2	384-564
Blanco (promedio)	22.7	4.1	0.3	66.7	0.9	2.7	0.18	63	18	10	1	482

* Estos valores representan un resumen de estadísticas combinadas. Los cementos con aire incluido (incorporado) no están incluidos. Para una homogeneización de la información, los elementos están expresos en la forma padrón de óxidos. Esto no significa que la forma de óxidos esté presente en el cemento. Por ejemplo, el azufre se reporta como SO₃, trióxido de azufre, pero el cemento portland no contiene trióxido de azufre. La “composición potencial de los compuestos” se refiere a los cálculos de la ASTM C 150 (AASHTO M 85) usando la composición química del cemento. La composición real de los compuestos puede ser menor, debido a reacciones químicas incompletas o alteradas.

** Incluyendo los cementos finamente molidos.

Adaptado de PCA (1996) y Gebhardt (1995).

los compuestos principales en el cemento y efectivamente las propiedades del cemento hidratado. El sulfato está presente para controlar el tiempo de fraguado, bien como la contracción por secado y el aumento de resistencia (Tang 1992). Batí (1995) y PCA (1992) discuten los elementos menores y su efecto en las propiedades del cemento. El conocimiento actual de la química del cemento indica que

los compuestos principales del cemento tienen las siguientes propiedades:

Silicato Tricálcico, C₃S, se hidrata y se endurece rápidamente y es responsable, en gran parte, por el inicio del fraguado y la resistencia temprana (Fig. 2-29). En general, la resistencia temprana del concreto de cemento portland es mayor, cuando el porcentaje de C₃S aumenta.

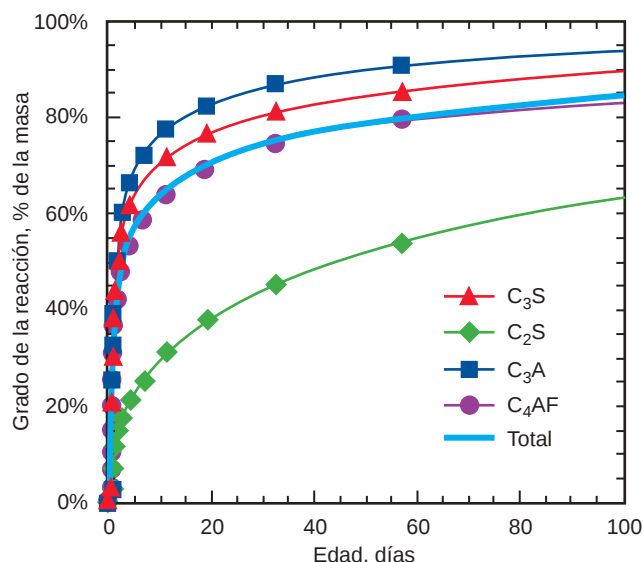


Fig. 2-29. Reactividad relativa de los compuestos del cemento. La curva llamada "total" tiene una composición del 55% de C_3S , 18% de C_2S , 10% de C_3A y 8% de C_4AF , una composición media del cemento tipo I (Tennis y Jennings 2000).

Silicato Dicálcico, C_2S , se hidrata y se endurece lentamente y contribuye grandemente para el aumento de resistencia en edades más allá de una semana.

Aluminato Tricálcico, C_3A , libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye un poco para el desarrollo de las resistencias tempranas. Los cementos con bajos porcentajes de C_3A resisten mejor a suelos y aguas con sulfatos.

Ferroaluminato Tetracálcico, C_4AF , es el producto resultante del uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización (clinkerización o cocción) durante la fabricación del cemento. Este compuesto contribuye muy poco para la resistencia. La mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se deben al C_4AF y sus hidratos.

Sulfato de Calcio, como anhidrita (sulfato de calcio anhidro), yeso (sulfato de calcio dihidratado) o hemidrato, comúnmente llamado de yeso de París (sulfato de calcio hemidrato), se adiciona al cemento durante la molienda final, ofreciendo sulfato para la reacción con el C_3A y la formación de etringita (trisulfoaluminato de calcio). Esto controla la hidratación del C_3A . Sin sulfato, el fraguado del cemento sería rápido. Además del control del fraguado y del desarrollo de resistencia, el sulfato también ayuda a controlar la contracción (retracción) por secado y puede influenciar la resistencia hasta 28 días (Lerch 1946).

Además de los compuestos principales arriba, existen también otras formulaciones de compuestos (PCA 1997, Taylor 1997, Tennis y Jennings 2000).

Agua (Evaporable y No-evaporable)

El agua es un ingrediente clave de las pastas, morteros y concretos, pues las fases en el cemento portland tienen que reaccionar químicamente con el agua para desarrollar resistencia. La cantidad de agua adicionada a la mezcla también controla la durabilidad. El espacio en la mezcla inicialmente lleno de agua, con el tiempo, se sustituye parcial o completamente mientras que las reacciones de hidratación ocurren (Tabla 2-10). Si se usa más que aproximadamente 35% de agua en masa de cemento – relación agua-cemento de 0.35 – va a permanecer una porosidad en el material endurecido, incluso después de la hidratación completa. Ésta se llama porosidad capilar. La Figura 2-30 muestra que pastas de cemento con alta y baja relación agua-cemento tienen masas iguales después del secado (el agua evaporable fue removida). El cemento consume la misma cantidad de agua en ambas pastas resultando en un volumen mayor en la pasta con relación agua-cemento mayor. A medida que la relación agua-cemento aumenta, la porosidad capilar aumenta y la resistencia disminuye. Las propiedades de transporte, tales como permeabilidad y difusividad también aumentan, permitiendo que sustancias perjudiciales ataquen el concreto o la armadura (refuerzo) más fácilmente.

El agua en los materiales cementantes se encuentra en muchas formas. Agua libre es el agua de la mezcla que no reaccionó con las fases del cemento. La retenida es el agua químicamente combinada en las fases sólidas o físicamente adherida a las superficies del sólido. No es posible una separación confiable del agua químicamente combinada y del agua físicamente adsorbida. Por lo tanto, Powers (1949) distinguió agua evaporable y agua no-evaporable. El agua no-evaporable es la cantidad de agua retenida por un espécimen después de que se lo ha sujeto a procedimientos de secado para la remoción de toda el agua libre (tradi-

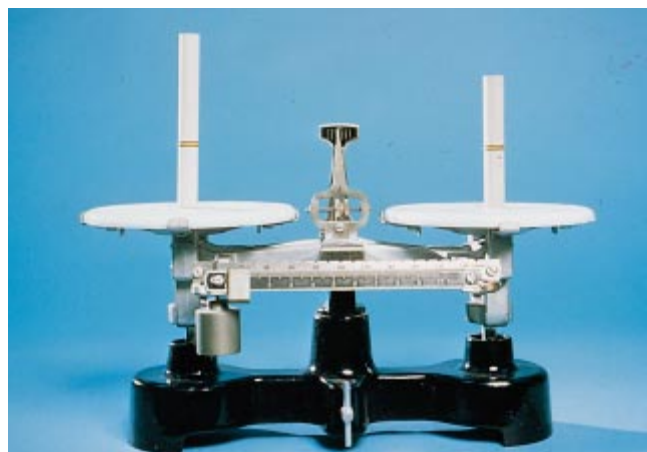


Fig. 2-30. Cilindros de pastas de cemento de pesos iguales y el mismo contenido de cemento, pero mezclados con diferentes relaciones agua-cemento, enseñados después de que toda el agua se ha evaporado. (IMG12302)

cionalmente a través del calentamiento a 105°C). El agua evaporable ha sido originalmente considerada como agua libre, pero ahora se reconoce que parte de la adsorbida también puede ser perdida bajo calentamiento a esa temperatura. Toda el agua no-evaporable es agua combinada, pero el opuesto no es verdadero.

Para la completa hidratación del cemento portland, sólo aproximadamente 40% de agua es necesaria (relación agua-cemento de 0.40). Si la relación agua-cemento es mayor que 0.40, el exceso del agua que no se utiliza para la hidratación permanece en los poros capilares o se evapora. Si la relación agua-cemento es menor que 0.40, parte del cemento va a permanecer anhidro.

Para estimarse el grado de hidratación del material hidratado, normalmente se usa el contenido de agua no-evaporable. Para convertir la cantidad de agua no-evaporable medida en el grado de hidratación, se hace necesario el conocimiento del valor de la relación agua no-evaporable – cemento (a_n/c) para la hidratación completa. La determinación de esta relación se hace experimentalmente con la preparación de una pasta de alta relación agua-cemento (por ejemplo 1.0) y su molienda continua en un molino de bolas mientras que se hidrata. En este procedimiento, la completa hidratación del cemento se logrará después de 28 días.

Alternativamente, se puede obtener de la composición potencial de Bogue del cemento un valor estimado de la relación agua no-evaporable – cemento (a_n/c) para la completa hidratación. El contenido de agua no-evaporable para la mayoría de los compuestos del cemento portland se presenta en la Tabla 2-12. Para un cemento ASTM tipo I típico, estos coeficientes van a resultar en un (a_n/c) calculado para la hidratación completa del cemento de 0.22 a 0.25.

Tabla 2-12. Contenido de Agua No-evaporable para la Hidratación Completa de los Compuestos del Cemento

Compuesto del cemento hidratado	Contenido de agua no-evaporable (combinada) (g agua/g compuesto del cemento)
C ₃ S hidratado	0.24
C ₂ S hidratado	0.21
C ₃ A hidratado	0.40
C ₄ AF hidratado	0.37
Cal libre (CaO)	0.33

PROPIEDADES FÍSICAS DEL CEMENTO

Las especificaciones de cemento presentan límites para las propiedades físicas y para la composición química. La comprensión de la importancia de las propiedades físicas es útil para la interpretación de los resultados de los ensayos (pruebas) de los cementos. Los ensayos de las propiedades físicas de los cementos se deben utilizar para la evaluación de las propiedades del cemento y no del concreto. Las especificaciones del cemento limitan las propiedades de acuerdo con el tipo de cemento. Durante la fabricación, se monitorean continuamente la química y las siguientes propiedades del cemento:

Tamaño de las Partículas y Finura

El cemento portland consiste en partículas angulares individuales, con una variedad de tamaños resultantes de la pulverización del clínker en el molino (Fig. 2-31 izquierda). Aproximadamente 95% de las partículas del cemento son menores que 45 micrómetros, con un promedio de partícu-

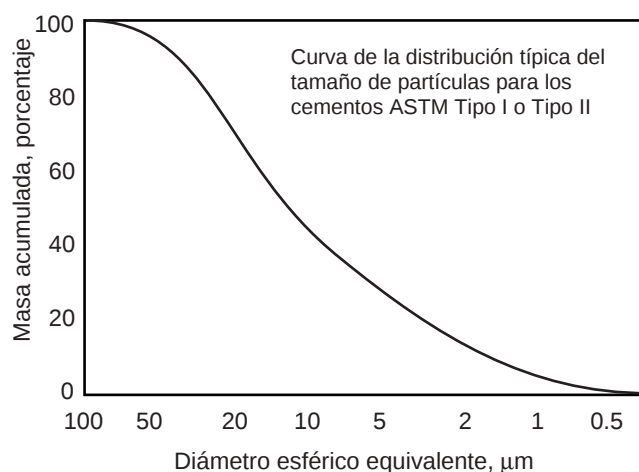
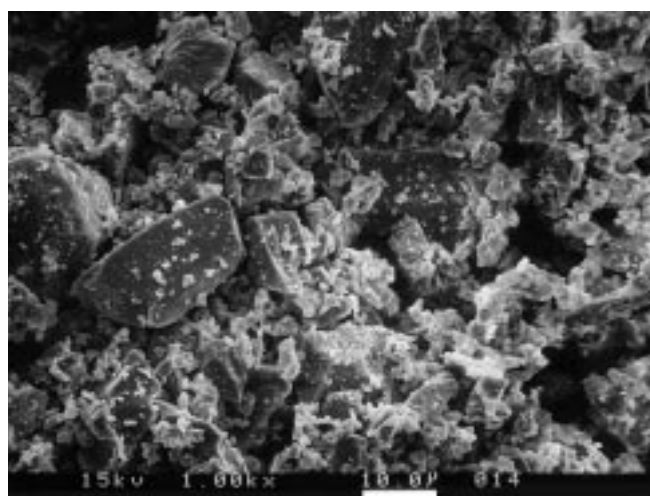


Fig. 2-31. (izquierda) Micrografía electrónica de barrido de un polvo de cemento con aumento de 1000X y (derecha) distribución del tamaño de las partículas del cemento portland. (IMG12459)

las de 15 micrómetros. La Figura 2-31 (derecha) ilustra la distribución del tamaño de las partículas para el cemento portland. La distribución total del tamaño de las partículas del cemento se llama “finura”. La finura del cemento afecta el calor liberado y la velocidad de hidratación. La mayor finura del cemento (partículas menores) aumenta la velocidad o tasa de hidratación del cemento y, por lo tanto, acelera el desarrollo de la resistencia. Los efectos de la mayor finura sobre la resistencia de las pastas se manifiestan, principalmente, durante los primeros siete días.

A principio del siglo XX, la finura del cemento se expresaba como masa del cemento por fracción de tamaño (porcentaje de la masa retenida en tamaños de tamices específicos). Hoy en día, la finura normalmente se mide por el ensayo (prueba) de permeabilidad al aire Blaine (Tabla 2-13)

que mide indirectamente el área superficial de las partículas de cemento por unidad de masa. Cementos con partículas más finas tienen mayor área superficial en metros cuadrados por kilogramo de cemento. Se han empleado, en el pasado, centímetros cuadrados por gramo, pero, actualmente, se consideran estas medidas arcaicas. A excepción de la AASHTO M 85, la mayoría de las normas de cemento no tienen un límite máximo para la finura, sólo mínimo. Se puede utilizar en los ensayos de finura, el ensayo del turbidímetro de Wagner (Fig. 2-32, Tabla 2-14), el tamiz de 45 micrómetros (No. 325) (Fig. 2-33, Tabla 2-14) o los tamices de 150 μm (No. 100) y 75 μm (No. 200) (Tabla 2-14) y el analizador electrónico de tamaño de partículas (Rayos X o láser) (Fig. 2-34). Los datos de la finura Blaine para los cementos Norteamericanos se presentan en la Tabla 2-11.

Tabla 2-13. Normas de Ensayos para la Determinación de la Finura por el Método de Permeabilidad Blaine

País	Norma	Nombre
Argentina	IRAM 1623	Cemento portland. Método de ensayo de finura por tamizado seco y por determinación de la superficie específica por permeabilidad al aire (método de Blaine).
Chile	NCh159	Cemento - Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine
Colombia	NTC 4985	Cementos. Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del equipo de barrido por aire
Ecuador	NTE 0196	Cementos. Determinación de la finura. Método de Blaine
EE.UU.	ASTM C 204	Método de ensayo para la determinación de la finura del cemento hidráulico a través del aparato de permeabilidad al aire
	AASHTO T 153	Finura del cemento hidráulico a través del aparato de permeabilidad al aire
Guatemala	NGO 41014 h2	Cemento portland. Determinación de la finura con el aparato Blaine para medir permeabilidad al aire
México	NMX – C – 056 – 1997 – ONNCCE	Determinación de la finura de los cementantes hidráulicos (Método de permeabilidad al aire)
Perú	NTP 334.002	Cementos. Determinación de la finura expresada por la superficie específica (Blaine)
Uruguay	UNIT-NM 76	Cemento portland. Determinación de la finura mediante la permeabilidad al aire (método de Blaine)
Venezuela	COVENIN 0487	Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del aparato Blaine de permeabilidad



Fig. 2-32. Aparato del ensayo de Blaine (izquierda) y turbidímetro de Wagner (derecha) para la determinación de la finura del cemento. Los valores de finura de Wagner son un poco mayores que la mitad de los valores de Blaine. (IMG12303, IMG12458)

Tabla 2-14. Normas de Ensayos para la Determinación de la Finura del Cemento

País	Norma	Nombre
Argentina	IRAM 1621	Cemento portland. Método de ensayo de finura por tamizado húmedo
	IRAM EXP 1623	Cemento portland. Método de ensayo de finura por tamizado seco y por determinación de la superficie específica por permeabilidad al aire (método de Blaine).
Chile	NCh150	Cemento - Determinación de la finura por tamizado
	NCh149	Cemento - Determinación de la superficie específica por el turbidímetro de Wagner
Colombia	NTC 226	Cementos. Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio de los tamices de 75 μm - (No. 200) - y 150 μm - (No. 100).
	NTC 294	Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Método para determinar la finura del cemento hidráulico sobre el tamiz ICONTEC 45 μm (No. 325)
	NTC 597	Determinación de la finura del cemento portland por medio del turbidímetro.
Ecuador	NTE 0489	Cementos. Determinación de la finura por tamizado seco
	NTE 0957	Cementos. Determinación de la finura por tamizado húmedo.
	NTE 0197	Cementos. Determinación de la finura. Método del turbidímetro de Wagner
EE.UU.	ASTM C 430	Método de ensayo para la finura del cemento hidráulico por tamizado 45 μm (No. 325)
	AASHTO T 192	Finura del cemento hidráulico por tamizado 45 μm (No. 325)
	ASTM C 184	Método de ensayo para la finura del cemento hidráulico por tamizado 150 μm (No. 100) y 75 μm (No. 200)
	AASHTO T 128	Finura del cemento hidráulico por tamizado 150 μm (No. 100) y 75 μm (No. 200)
	ASTM C 115	Método de ensayo para la finura por turbidímetro
	AASHTO T 98	Finura del cemento portland por turbidímetro
Guatemala	NGO 41003 h8	Cementos hidráulicos. Determinación de finura por tamizado seco con tamices No. 100 (150 μm) y No. 200 (75 μm)
	NGO 41003 h22	Cementos hidráulicos. Determinación de la finura usando un tamiz No. 325 (45 μm)
	NGO 41014 h3	Cemento portland. Determinación de la finura por turbidimetría.
México	NMX – C – 049 – 1997 – ONNCCE	Método de prueba para la determinación de la finura de los cementantes hidráulicos mediante el tamiz 130 μm .
	NMX-C-150	Determinación de la finura de cementantes hidráulicos mediante el tamiz 80 μm (No. 200)
	NMX – C - 55	Método de prueba para determinar finura de los cementantes hidráulicos (método turbidimétrico)
Perú	NTP 334.058	Cementos. Método de ensayo para determinar la finura por tamizado seco con tamices ITINTEC 149 μm (No. 100) e ITINTEC 74 μm (No. 200)
	NTP 334.046	Cementos. Método de ensayo para determinar la finura por tamizado húmedo con tamiz ITINTEC 149 μm (No. 100) y 74 μm (No. 200)
	NTP 334.045	Cementos. Método de ensayo para determinar la finura por tamizado húmedo con tamiz normalizado 45 μm (No. 325).
	NTP 334.072	Cementos. Determinación de la finura del cemento portland por medio del turbidímetro
Uruguay	UNIT 327	Cementos. Método de determinación de finura por tamizado seco con tamices. UNIT 149 y 74.
	UNIT 1064	Cementos. Método de determinación de la finura por tamizado húmedo con tamiz 75 μm
Venezuela	COVENIN 0489	Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del cedazo (45 micras) No. 325
	COVENIN 0488	Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del turbidímetro

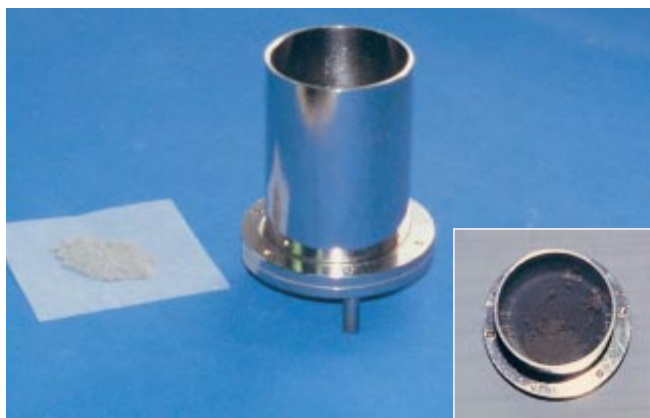


Fig. 2-33. Ensayos acelerados (ensayos rápidos), tales como el lavado de cemento encima de este tamiz de 45 micrómetros, ayudan a controlar la finura del cemento durante la producción. Se presenta una vista del receptáculo del tamiz (cedazo). La foto más pequeña, a la derecha, presenta una vista, de arriba, de una muestra de cemento en el tamiz antes que sea lavada con agua (IMG12457, IMG12456).

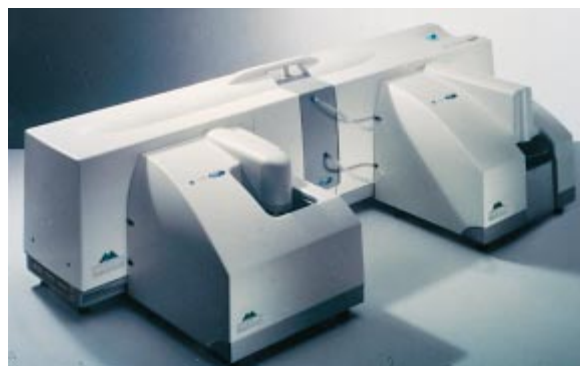


Fig. 2-34. Un analizador de partículas a láser que usa difracción de láser para determinar la distribución del tamaño de las partículas en el polvo. La Fig. 2-31 (derecha) ilustra los valores típicos. (IMG12455)

Sanidad (Constancia de Volumen)

La sanidad se refiere a la habilidad de la pasta de cemento en mantener su volumen. La falta de sanidad o la expansión destructiva retardada se puede causar por la cantidad excesiva de cal libre o magnesia supercalcinadas. La mayoría de las especificaciones para cemento portland limitan el contenido de magnesia (periclusa) y la expansión máxima que se mide por el ensayo de expansión en autoclave. Desde la adopción del ensayo de expansión en autoclave en 1943 en los EE.UU. (Tabla 2-15), pocos casos de expansiones se han atribuido a la falta de sanidad (Fig. 2-35) (Gonnerman, Lerch y Whiteside 1953).



Fig. 2-35. En el ensayo de sanidad, las barras con sección cuadrada de 25 mm son expuestas a altas temperaturas y a la presión en autoclave para determinarse la estabilidad de volumen de la pasta de cemento. (IMG12454)

Tabla 2-15. Ensayos de Expansión en Autoclave del Cemento

País	Norma	Nombre
Argentina	IRAM 1620	Cemento portland. Método de determinación de la constancia de volumen mediante ensayo en autoclave
Chile	NCh157	Cemento - Ensayo de expansión en autoclave
Ecuador	NTE 0200	Cemento Portland. Determinación de la expansión. Método del autoclave
EE.UU.	ASTM C 151	Método de ensayo para la expansión en autoclave del cemento portland
	AASHTO T 107	Expansión en autoclave del cemento portland
Guatemala	NGO 41014 h1	Cemento portland. Determinación de la expansión en autoclave
México	NMX-C 062-97	Método de prueba para determinar la sanidad de cementantes hidráulicos
Perú	NTP 334.004	Cementos. Ensayo en autoclave para determinar la estabilidad de volumen
Uruguay	UNIT 514	Cementos. Ensayo de autoclave para determinar la estabilidad de volumen
Venezuela	COVENIN 0491	Cemento Portland. Determinación de la expansión en autoclave

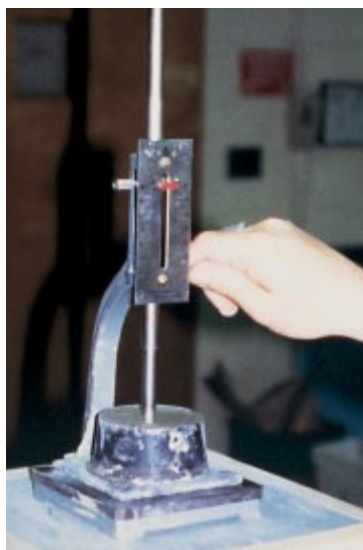


Fig. 2-36. Ensayo de consistencia normal para pastas usando la aguja de Vicat. (IMG12304)



Fig. 2-37. Ensayo de consistencia para morteros usando la mesa de fluidez. El mortero se coloca en un molde de latón centralizado en la mesa (foto pequeña, a la derecha). El técnico debe usar guantes al manejar el mortero para la protección de su piel. Después que se remueve el molde y se somete la mesa a una sucesión de caídas, se mide el diámetro del mortero para determinarse la consistencia. (IMG12453, IMG12452)

ción de ingredientes distintos con la misma penetrabilidad o fluidez.

Tiempo de Fraguado

El objetivo del ensayo (pruebas) del tiempo de fraguado es la determinación (1) del tiempo que pasa desde el momento

Consistencia

La consistencia se refiere a la movilidad relativa de la mezcla fresca de pasta o mortero de cemento o su habilidad de fluir. Durante los ensayos (pruebas) de cemento, se mezclan pastas de consistencia normal, definidas como la penetración de 10 ± 1 mm de la aguja de Vicat (ASTM C 187, AASHTO T 129, COVENIN 494, IRAM 1612, Nch151, NMX-C-057-1997-ONNCCE, NTC 110, NTE 0157, NTP 334.074, UNIT-NM 43) (Fig. 2-36). Se mezclan los morteros para obtenerse una relación agua-cemento fija o proporcionar una fluidez dentro de un rango prescrito. La fluidez de los morteros se determina en una mesa de fluidez (mesa de caídas, mesa de sacudidas) como se describe en las normas ASTM C 230, ASTM C 1437, AASHTO M 152, COVENIN 0485, Nch 2257/1, NMX-C-144, NTC 111, NTP 334.057 (Fig. 2-37). Ambos métodos, el de consistencia normal y el de fluidez, se usan para regular la cantidad de agua en las pastas y morteros, respectivamente, para que se los utilice en ensayos subsecuentes. Ambos permiten la compara-

de la adición del agua hasta cuando la pasta deja de tener fluidez y de ser plástica (llamado fraguado inicial) y (2) del tiempo requerido para que la pasta adquiera un cierto grado de endurecimiento (llamado fraguado final).

Para determinar si un cemento se fragua de acuerdo con los límites especificados en las especificaciones de cemento, los ensayos se realizan con el uso del aparato de Vicat (Tabla 2-16) (Fig. 2-38) o la aguja de Gillmore (Tabla 2-17) (Fig. 2-39).

El ensayo de Vicat gobierna si no se especifica ningún ensayo por



Fig. 2-38. El ensayo del tiempo de fraguado en pasta usando la aguja de Vicat. (IMG12502)

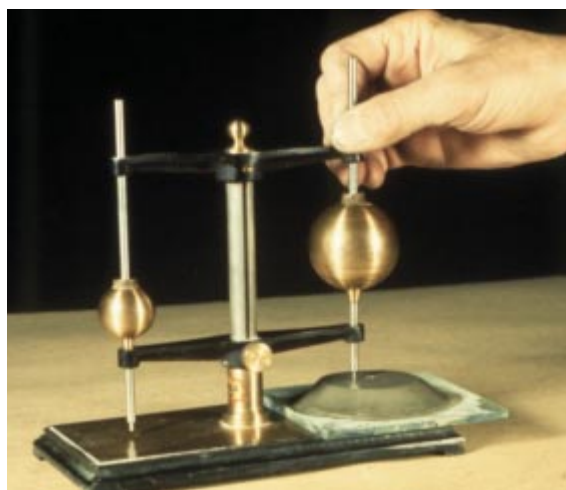


Fig. 2-39. El tiempo de fraguado determinado por la aguja de Gillmore. (IMG12451)

parte del comprador. El inicio del fraguado de la pasta de cemento no debe ocurrir demasiado temprano y el final del fraguado no debe ocurrir muy tarde. Los tiempos de fraguado indican si la pasta está o no sufriendo reacciones normales de hidratación. El sulfato (del yeso u otras fuentes) en el cemento regula el tiempo del fraguado, pero este tiempo también se afecta por la finura, relación agua-cemento y cualquier aditivo empleado. El tiempo de fraguado del concreto no tiene correlación directa con el de las pastas debido a la

Tabla 2-16. Ensayos del Tiempo de Fraguado Usando la Aguja de Vicat

País	Norma	Nombre
Argentina	IRAM 1619	Cemento portland. Método de determinación del tiempo de fraguado.
Chile	NCh152	Cemento - Método de determinación del tiempo de fraguado.
Colombia	NTC 118	Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat.
Ecuador	NTE 0158	Cementos. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat.
EE.UU.	ASTM C 191	Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado del cemento hidráulico con la aguja de Vicat.
	AASHTO T 131	Tiempo de fraguado con la aguja de Vicat.
Guatemala	NGO 41003 h10	Cementos hidráulicos. Determinación del tiempo del fraguado usando agujas de Vicat.
México	NMX – C – 059 – 1997 – ONNCCE	Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos (método de Vicat).
Perú	NTP 334.006	CEMENTOS. Determinación del fraguado utilizando la aguja de Vicat.
Uruguay	UNIT-NM 65	Cemento portland. Determinación del tiempo de fraguado.
Venezuela	COVENIN 0493	Cemento Portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat.

Tabla 2-17. Ensayos del Tiempo de Fraguado Usando la Aguja de Gillmore

País	Norma	Nombre
Colombia	NTC 109	Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Método para determinar los tiempos de fraguado del cemento hidráulico por medio de las agujas de Gillmore.
Ecuador	NTE 0159	Determinación del tiempo de fraguado. Método de Gillmore.
EE.UU.	ASTM C 266	Método de ensayo para el tiempo de fraguado de pastas de cemento hidráulico, a través de las agujas Gillmore.
	AASHTO T 154	Tiempo de fraguado del cemento hidráulico a través de las agujas Gillmore.
Guatemala	NGO 41003 h9	Cementos hidráulicos. Determinación del tiempo de fraguado usando agujas de Gillmore.
México	NMX C 58-67	Determinación del tiempo de fraguado en cementantes hidráulicos (Método Gillmore).
Perú	NTP 334.056	Cementos. Método de ensayo para determinar los tiempos de fraguado del cemento hidráulico por medio de las agujas de Gillmore.

pérdida de agua para el aire o sustrato (lecho), presencia de agregado y diferencias de temperatura en la obra (en contraste con las temperaturas controladas en el laboratorio). La Figura 2-40 ilustra los promedios de los tiempos de fraguado para cementos portland.

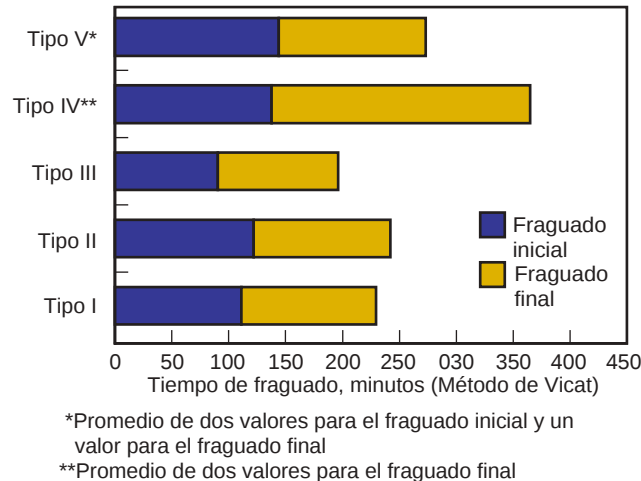


Fig. 2-40. Tiempo de fraguado para cementos portland (Gebhardt 1995 y PCA 1996).

Endurecimiento Prematuro (Falso Fraguado y Fraguado Rápido)

El endurecimiento prematuro es el desarrollo temprano de la rigidez en las características de trabajabilidad o plasticidad de la pasta, mortero o concreto de cemento. Esto incluye ambos fraguados, el falso y el rápido.

El falso fraguado se evidencia por la pérdida considerable de plasticidad, inmediatamente después del mezclado, sin ninguna evolución de calor. Desde el punto de vista de la colocación y manejo, las tendencias de fraguado falso en el cemento no van a causar problemas, si se mezcla el concreto por un tiempo más largo que el usual o si el concreto es remezclado sin añadirle agua adicional antes de su transporte y colocación. El falso fraguado ocurre cuando una gran cantidad de sulfatos se deshidrata en el molino de cemento formando yeso. La causa del endurecimiento prematuro es la rápida cristalización o el entrelazamiento de las estructuras en forma de aguja con el yeso secundario. El mezclado complementario sin la adición del agua rompe estos cristales y restablece la trabajabilidad. La precipitación de etringita también puede contribuir para el falso fraguado.

El fraguado rápido se evidencia por una pérdida rápida de trabajabilidad en la pasta, mortero o concreto a una edad aún temprana. Esto es normalmente acompañado de una evolución considerable de calor, resultante principalmente de la rápida reacción de los aluminatos. Si la cantidad o forma adecuadas de sulfato de calcio no están disponibles para controlar la hidratación del aluminato de calcio, el endurecimiento es aparente. El fraguado rápido no se lo puede disipar, ni tampoco se puede recuperar la plasticidad por el mezclado complementario sin la adición de agua.

El endurecimiento correcto resulta de un equilibrio cuidadoso de los compuestos de sulfato y aluminato, bien como de temperatura y finura adecuadas de los materiales (las cuales controlan la hidratación y la tasa de disolución). La cantidad de sulfato transformado en yeso tiene un efecto significativo. Por ejemplo, con un cemento específico, 2% de yeso permitieron un tiempo de fraguado de 5 horas, mientras que 1% de yeso promovió el fraguado rápido y 3% permitieron el falso fraguado (Helmuth y otros 1995).

Los cementos se ensayan para endurecimiento prematuro usando las pruebas del método de la pasta: ASTM C 451 (AASHTO T 186), COVENIN 0365, IRAM 1615, NMX-C-132-1997-ONNCCE, NGO 41014 h4, NTC 297, NTE 0875, NTP 334.052; o las pruebas del método del mortero: ASTM C 359 (AASHTO T 185), NTC 225, NTE 0201, NTP 334.053. Sin embargo, estos ensayos (pruebas) no consideran todos los factores relacionados con el mezclado, colocación, temperatura y condiciones de obra que puedan causar endurecimiento temprano. Ellos tampoco consideran el endurecimiento prematuro causado por las interacciones con los otros ingredientes del concreto. Por ejemplo, concretos mezclados por periodos

muy cortos, menos de un minuto, tienden a ser más susceptibles al endurecimiento rápido (ACI 225).

Resistencia a Compresión

La resistencia a compresión es aquella obtenida por la prueba (ensayo), por ejemplo, de cubos o cilindros de mortero de acuerdo con las normas nacionales de la Tabla 2-18. La Figura 2-41 enseña el ensayo según la norma ASTM C 109. Se debe preparar y curar los especímenes de acuerdo con la prescripción de la norma y con el uso de arena estándar.

El tipo de cemento, o más precisamente, la composición de los compuestos y la finura del cemento influyen



Fig. 2-41. Se hacen cubos de 50 mm (2 pulg.) (izquierda) y se los presnan para la determinación de las características de resistencia del cemento. (IMG12450, IMG12449)

Tabla 2-18. Normas para la Determinación de la Resistencia del Cemento

País	Norma	Nombre
Argentina	IRAM 1622	Cemento portland. Determinación de resistencias mecánicas.
Chile	NCh158	Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento
Colombia	NTC 220	Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado
Ecuador	NTE 0488	Cementos. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista
EE.UU.	ASTM C 109	Norma de método de ensayo para resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (usando especímenes cúbicos de 50 mm)
	AASHTO T 106	Resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (usando especímenes cúbicos de 50 mm o 2 pulg.)
México	NMX-C-061-ONNCCE	Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos
Perú	NTP 334.051	CEMENTOS. Método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de Cemento Portland cubos de 50 mm de lado
Uruguay	UNIT 525	Cementos. Método de ensayo. Determinación de resistencias mecánicas
	UNIT 21	Ensayos físicos y mecánicos del cemento portland
Venezuela	COVENIN 0484	Cemento Portland. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en probetas cúbicas de 50,8 mm de lado

fuertemente la resistencia a compresión. Algunas normas como, por ejemplo, la ASTM C 1157, la IRAM 50000, la MNX-C-414-ONNCCE y la NTP 334.082, traen los requisitos de ambas resistencias, la mínima y la máxima, mientras

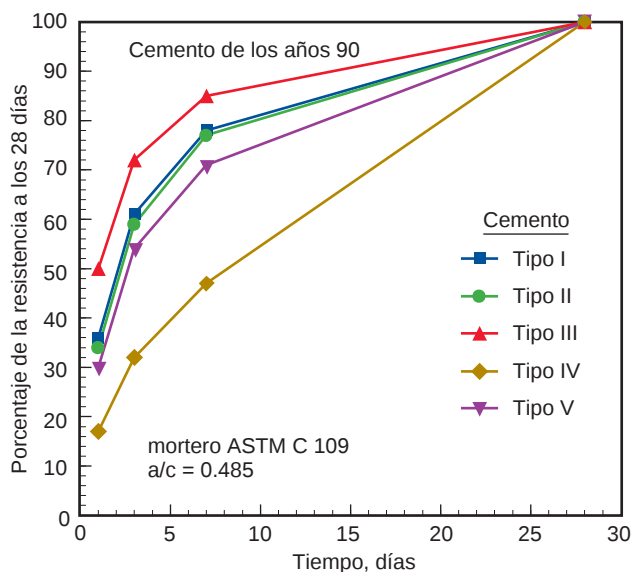


Fig. 2-42. Desarrollo relativo de la resistencia de cubos de morteros de cemento como un porcentaje de la resistencia a los 28 días. Los promedios fueron adaptados de Gebhardt 1995.

que la ASTM C 150 y la ASTM C 595 (AASHTO M 85 y M 240), bien como la mayoría de las normas de los países Latinoamericanos, presentan solamente los requisitos de resistencia mínima. Los requisitos de resistencia mínima de las especificaciones de cemento se cumplen por la mayoría de los fabricantes de cemento. Pero, no se debe asumir que dos tipos de cemento que tengan los mismos requisitos de resistencia van a producir morteros o concretos con la misma resistencia, sin que se hagan modificaciones de las proporciones de la mezcla.

En general, la resistencia del cemento (basada en ensayos en cubos de mortero) no se la puede usar para el pronóstico de la resistencia del concreto con un alto grado de precisión, debido a las muchas variables en las características de los agregados, mezclado del concreto, procedimientos de construcción y condiciones del medioambiente en la obra (Weaver, Isabelle y Williamson 1970 y Dehayes 1990). Las Figuras 2-42 y 2-43 ilustran el desarrollo de la resistencia en morteros estándares, preparados con varios tipos de cemento portland. Word (1992) presenta las resistencias a largo plazo de morteros y concretos preparados con cemento portland y cemento adicionado. La uniformidad de la resistencia del cemento de una única fuente se puede determinar de acuerdo con los procedimientos, por ejemplo, de la ASTM C 917.

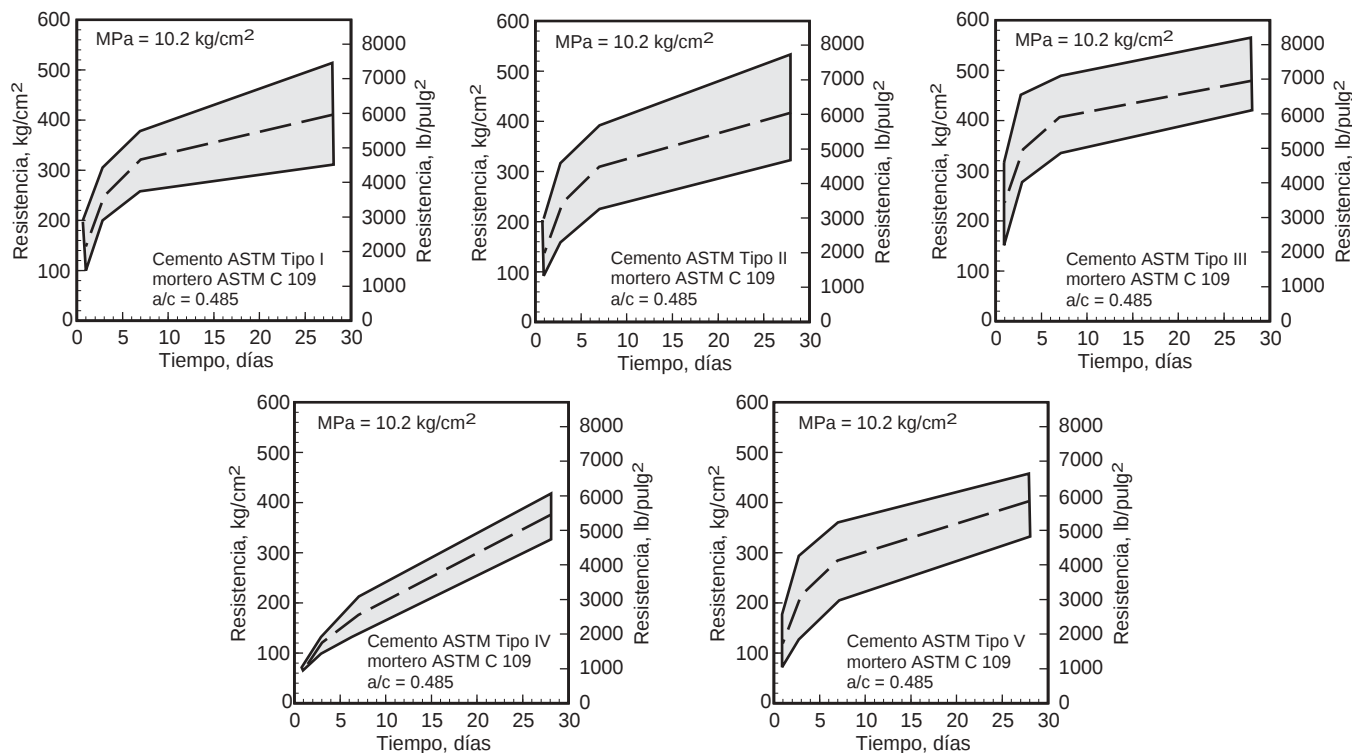


Fig. 2-43. Desarrollo de resistencia de cubos de mortero de cemento portland de varias estadísticas combinadas. La línea rayada representa los valores promedios y el área rayada, la gama de valores (adaptado de Gebhardt 1995).

Calor de Hidratación

El calor de hidratación es el calor que se genera por la reacción entre el cemento y el agua. La cantidad de calor generado depende, principalmente, de la composición química del cemento, siendo el C_3A y el C_3S los compuestos más importantes para la evolución de calor. La relación agua-cemento, la finura del cemento y la temperatura de curado también son factores que intervienen en la generación de calor. Un aumento de la finura, del contenido de cemento y de la temperatura de curado aumentan el calor de hidratación. A pesar del cemento portland poder liberar calor por muchos años, la tasa de generación de calor es mayor en las edades tempranas. Se genera una gran cantidad de calor en los tres primeros días, con la mayor tasa de liberación de calor normalmente ocurriendo a lo largo de las primeras 24 horas (Copeland y otros 1960). El calor de hidratación se ensaya según las normas ASTM C 186, COVENIN 0495, IRAM 1617, IRAM 1852, NMX-C-151-ONNCCE, NTC 117, NTE 0199, NTP 334.064, UNIT 326 o por calorímetro de conducción (Fig. 2-44).

Para la mayoría de los elementos de concreto, tales como losas, el calor generado no trae preocupación porque el calor se disipa rápidamente en el ambiente. Sin embargo, en estructuras de grandes volúmenes, con espesor mayor de un metro (yarda), la tasa y la cantidad de calor generado son importantes. Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable de la temperatura del concreto. Este aumento de temperatura puede ser indeseable, pues después del endurecimiento a altas temperaturas, el enfriamiento no uniforme de la masa de concreto hasta la temperatura ambiente puede crear esfuerzos de tracción (esfuerzos de tensión) indeseables. Por otro lado, el aumento de la temperatura en el concreto causado por el calor de hidratación es frecuentemente beneficioso en clima frío, pues ayuda a mantener las temperaturas favorables para el curado.

La Tabla 2-19 presenta valores de calor de hidratación para varios tipos de cemento portland. Estos datos limitados muestran que el cemento tipo III (ASTM C 150) tiene calor de hidratación más alto que los otros tipos de cemento, mientras que el tipo IV (ASTM C 150) tiene el



Fig. 2-44. El calor de hidratación se puede determinar por (izquierda) ASTM C 186 y por (derecha) calorímetro de conducción. (IMG12447, IMG12448)

Tabla 2-19. Calor de Hidratación de Cementos Portland de los EE.UU. Seleccionados de la Década de 90, según la Norma ASTM C 186, en kJ/kg*

	Cemento tipo I		Cemento tipo II		Cemento tipo II – Moderado calor de hidratación	Cemento tipo III		Cemento tipo IV		Cemento tipo V
	7 días	28 días	7 días	28 días	7 días	7 días	28 días	7 días	28 días	7 días
No. de muestras	15	7	16	7	4	2	2	3	1	6
Promedio	349	400	344	398	263	370	406	233	274	310
Máximo	372	444	371	424	283	372	414	251	-	341
Mínimo	320	377	308	372	227	368	397	208	-	257
% del tipo I (7 días)	100		99		75	106		67		89

* Esta tabla se basa en datos muy limitados.
1 cal/g = 4.184 kJ/kg. PCA (1997).

calor más bajo. También se debe observar la diferencia en la generación de calor entre el tipo II (ASTM C 150) normal y el moderado calor de hidratación tipo II (ASTM C 150).

Los cementos no generan calor a una tasa constante. La producción de calor durante la hidratación de un cemento portland tipo I (ASTM C 150) se presenta en la Figura 2-45. El primer pico presentado en el perfil de calor se debe a la liberación de calor por las reacciones iniciales de los compuestos del cemento, tales como aluminato tricálcico. Algunas veces llamado de calor de humedecimiento, este primer pico de calor se sigue por un periodo de baja reactividad conocido como periodo de incubación o inducción. Después de algunas horas, aparece un segundo pico atribuido a la hidratación del silicato tricálcico, señalizando el comienzo del proceso de endurecimiento de la pasta. Finalmente, hay un tercer pico debido a la reacción renovada del aluminato tricálcico; su intensidad y localización dependen normalmente de la cantidad de aluminato tricálcico y de sulfato en el cemento.

En el ensayo (prueba) de calorimetría, las primeras medidas de calor se obtienen aproximadamente 7 minutos después de la mezcla de la pasta; como resultado, sólo se puede observar la inclinación descendente del primer pico (Etapa 1, Fig. 2-45). El segundo pico (pico de C_3S) normalmente ocurre entre 6 y 12 horas. El tercer pico (pico de C_3A renovado en la conversión de AFt para AFM) ocurre entre 12 y 90 horas. Esta información puede ser útil en el control del aumento de temperatura en el concreto masivo (Tang 1992).

Cuando es necesario minimizar la generación de calor en el concreto, los diseñadores deben escoger un cemento con más bajo calor, tales como el cemento portland tipo II

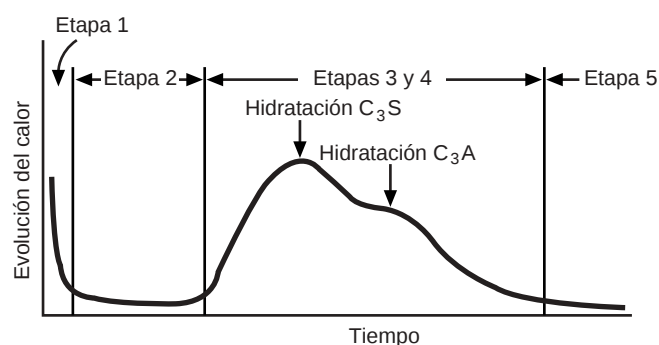


Fig. 2-45. Evolución del calor como función del tiempo para pasta de cemento. La etapa 1 es el calor de humedecimiento o de la hidrólisis inicial (hidratación del C_3A y del C_3S). La etapa 2 es el periodo de incubación relacionado al tiempo de fraguado inicial. La etapa 3 es una reacción acelerada de los productos de hidratación que determina la tasa de endurecimiento y el tiempo de fraguado final. En la etapa 4 hay una desaceleración de la formación de los productos de hidratación y determina la tasa de aumento de resistencia inicial. La etapa 5 es lenta, caracterizada por la formación estable de productos de hidratación, estabilizando la tasa de aumento de resistencia a edades avanzadas.

(ASTM C 150, AASHTO M 85), con la opción de los requisitos de moderado calor de hidratación. Como no todos los cementos tipo II se fabrican para el desarrollo de un nivel moderado de calor, la opción de moderado calor de hidratación se debe solicitar especialmente. El cemento de bajo calor de hidratación se puede utilizar para el control de la subida de la temperatura, pero raramente está disponible. Los cementos de moderado calor y bajo calor también están disponibles en las especificaciones de la ASTM C 595 (AASHTO M 240) y C 1157. El empleo de los materiales cementantes suplementarios es también una opción para reducir la subida de temperatura.

La ASTM C 150 (AASHTO M 85), la COVENIN 28, la NCR40, NTP 334.009, NTP 334.090 tienen tanto un enfoque químico como físico para el control del calor de hidratación. Se puede especificar cualquiera de los enfoques, pero no ambos. La ASTM C 595 (AASHTO M 240) y C 1157, IRAM 50001, NMX-C-414-ONNCCE y NTP 334.082 usan límites físicos. Para más informaciones, consulte PCA (1997).

Pérdida por Ignición (Pérdida por Calcinación, Pérdida al Fuego)

La pérdida por ignición (pérdida por calcinación) del cemento portland se determina por el calentamiento de una muestra de cemento con masa conocida a una temperatura de 900°C a 1000°C , hasta que la masa se mantenga constante. Se determina entonces la pérdida de masa de la muestra. Normalmente, una gran pérdida por ignición es una indicación de prehidratación y carbonatación, las cuales pueden ser resultantes del almacenamiento prolongado o de manera incorrecta, o de la adulteración durante el transporte. El ensayo (prueba) de pérdida por ignición se realiza de acuerdo con las normas de ASTM C 114 (AASHTO T 105), COVENIN 0109, IRAM 1504, NCh147, NGO 41003 h18, NMX-C-151-ONNCCE, NTC 184, NTE 0160, NTP 334.086 y UNIT-NM 18 (Figura 2-46).



Fig. 2-46. Ensayo de pérdida por ignición del cemento. (IMG12305)

Masa Específica y Masa Específica Relativa

La masa específica del cemento (peso específico, densidad) se define como el peso de cemento por unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyéndose el aire entre las partículas. La masa específica se presenta en megagramos por metro cúbico o gramos por centímetro cúbico (el valor numérico es el mismo en las dos unidades). La masa específica del cemento varía de 3.10 hasta 3.25, con promedio de 3.15 Mg/m³. El cemento portland de alto horno y el portland puzolánico tienen masas específicas que varían de 2.90 hasta 3.15, con promedio de 3.05 Mg/m³. La masa específica del cemento (Tabla 2-20) no es una indicación de la calidad del cemento, su principal uso es en los cálculos de las proporciones de la mezcla.



Fig. 2-47. La masa específica del cemento se puede determinar por (izquierda) el uso del frasco volumétrico de Le Chatelier y queroseno (kerosene) o por (derecha) el uso de un picnómetro de helio. (IMG12446, IMG12445)

Para el proporcionamiento de la mezcla, puede ser más útil expresar la masa específica como masa específica relativa, también llamada de gravedad específica, densidad relativa o densidad absoluta. La densidad relativa es un número adimensional determinado por la división de la masa específica del cemento por la densidad del agua a 4°C, la cual es 1.0 Mg/m³ (1.0 g/cm³, 1000 kg/m³ o 62.4 lb/pies³).

Se supone la masa específica relativa del cemento portland como siendo 3.15 para su uso en los cálculos volumétricos del proporcionamiento de la mezcla de concreto. Como las proporciones de la mezcla traen las cantidades de los ingredientes del concreto en kilogramos o libras, se debe multiplicar la masa específica relativa por la densidad del agua a 4°C, establecida como 1000 kg/m³ (62.4 lb/pies³), para la determinación de la masa específica de las partículas de cemento en kg/m³ o lb/pies³. Este producto se divide por la masa de cemento para que se determine el volumen absoluto de cemento por metro cúbico o pie cúbico.

Masa Unitaria

La masa unitaria (densidad aparente) del cemento se define como masa de las partículas de cemento más el aire entre las partículas por unidad de volumen. La masa unitaria del cemento puede variar considerablemente, dependiendo de como se maneja y almacena el cemento. Si el cemento portland está muy suelto, puede pesar sólo 830 kg/m³ (52 4 lb/pies³), mientras que cuando se consolida el cemento a través de vibración, el mismo cemento puede pesar tanto como 1650 kg/m³ (103 4 lb/pies³) (Toler 1963). Por esta razón, las buenas prácticas indican que se debe medir el cemento en masa y no en volumen (Fig. 2-48).

Tabla 2-20. Normas para la Determinación de la Masa Específica y de la Masa Específica Relativa

País	Norma	Nombre
Argentina	IRAM 1624	Cemento portland. Método de determinación de la densidad absoluta
Chile	NCh154	Cemento – Determinación del peso específico relativo
Colombia	NTC 221	Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico
Ecuador	NTE 0156	Cementos. Determinación de la densidad
EE.UU.	ASTM C 188	Método de ensayo para la determinación de la densidad del cemento hidráulico
	AASHTO T 133	Densidad del cemento hidráulico
México	NMX-C-152	Cementantes hidráulicos – método de prueba para la determinación del peso específico de cementantes hidráulicos
Perú	NTP 334.005	Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento portland
Uruguay	UNIT-NM 23	Cemento portland. Método de determinación de la densidad absoluta
Venezuela	COVENIN 0492	Cemento Portland. Determinación de la densidad real



Fig. 2-48. Los dos recipientes contienen 500 gramos de polvo de cemento seco. A la izquierda, el cemento ha sido solamente colocado en el recipiente. A la derecha, el cemento ha sido ligeramente vibrado – imitando la consolidación durante el transporte o la compactación mientras que se lo almacena en los silos. La diferencia del 20% del volumen aparente enseña la necesidad de medirse el cemento por su peso y no por su volumen, al mezclarse el concreto. (IMG12444)

ANÁLISIS TÉRMICO

Las técnicas de análisis térmico están disponibles hace muchos años para el análisis de las reacciones hidráulicas y de las interacciones del cemento tanto con adiciones minerales como con aditivos químicos (Figs. 2-45 y 2-49). Tradicionalmente, el análisis térmico no eran parte de los programas de ensayos de rutina. Sin embargo, recientemente, el análisis térmico ha ganado popularidad en el análisis de las propiedades físicas y químicas de los materiales cementantes y de las materias primas para la fabricación del cemento (Bhatti 1993, Shkolnik y Miller 1996, Tennis 1997).

En el análisis térmico, se calienta una pequeña muestra a una tasa controlada hasta altas temperaturas (hasta 1000°C o más). A medida que los compuestos reaccionan o se decomponen, se registran los cambios que ocurren en función del tiempo y de la temperatura. Con el aumento de la temperatura de la muestra, hay una serie de cambios,



Fig. 2-49. Equipamiento de análisis térmico. (IMG12443)

tales como cambios de la masa, temperatura, energía o estado de la muestra. Un sólido puede derretirse, vaporizarse, decomponerse en un gas con sólidos residuales o reaccionar con un gas (a temperaturas elevadas) para formar un sólido diferente o un sólido diferente y otro gas.

Los usos más comunes del análisis térmico incluyen:

- Identificación de cuales productos de hidratación se formaron y en que cantidades
- Resolución de problemas de endurecimiento prematuro
- Identificación de la presencia de impurezas en las materias primas
- Determinación del grado de envejecimiento del clínker o del cemento
- Estimación de la reactividad de las puzolanas y escorias para su empleo en cementos adicionados
- Identificación de la cantidad de materia orgánica y sus variaciones en las canteras
- Cuantificación del grado de carbonatación de una muestra expuesta
- Análisis de problemas de durabilidad en el concreto.

Abajo, se discuten algunas técnicas específicas de análisis térmico.

Análisis por Termogravimetría (TGA)

El análisis por termogravimetría (TGA) es una técnica que mide la masa de una muestra a medida que se calienta (o se enfría) a una tasa controlada. El cambio de masa de la muestra depende de la composición de la muestra, de la temperatura, de la tasa de calentamiento y el tipo del gas en el horno (aire, oxígeno, nitrógeno, argón u otro gas). Un cambio de masa en una temperatura específica identifica la presencia de un compuesto químico particular. La magnitud del cambio de masa indica la cantidad del compuesto en la muestra.

El agua libre de la muestra se evapora, disminuyendo la masa, cuando la temperatura se eleva de la temperatura ambiente hasta 100°C. La muestra también pierde cierta cantidad de agua adsorbida en los productos de hidratación, principalmente el agua en los aluminatos de calcio.

Entre 100°C y 400°C, el agua combinada en los productos hidratados, principalmente en el gel de C-S-H, se pierde, juntamente con el resto del agua en los aluminatos de calcio. Entre 400°C y 500°C, el hidróxido de calcio presenta una pérdida de masa muy distinta, pues se decompone en óxido de calcio (sólido) y vapor de agua. La cantidad de la pérdida de masa se puede usar para la determinación de la cantidad de hidróxido de calcio presente originalmente en la muestra. Arriba de los 500°C, se puede perder más una pequeña cantidad de agua de los productos de hidratación. Las fases carbonatadas pierden dióxido de carbono a aproximadamente 800°C.

Con la determinación de la cantidad de hidróxido de calcio, un TGA presenta una indicación del grado de hidratación de una muestra. Se puede obtener la reactividad de

las puzolanas por la evaluación del desaparecimiento del hidróxido de calcio debido a la reacción puzolánica.

Análisis Térmico Diferencial (DTA)

El análisis térmico diferencial (DTA) es un método analítico a través del cual se mide la diferencia de temperatura entre una muestra y el control mientras que la muestra se calienta. El control normalmente es un material inerte, tal como alúmina en polvo, que no reacciona en la temperatura empleada en el ensayo (prueba). Si la muestra reacciona a una cierta temperatura, entonces su temperatura aumenta o disminuye en relación al material inerte de control, pues la reacción emite energía (exotérmica) o absorbe energía (endotérmica). Un termopar mide la temperatura de cada material, permitiendo que se registre la diferencia de temperaturas. El DTA es ideal para el control de la transformación de los compuestos del cemento durante la hidratación. Se puede realizar el DTA juntamente con el TGA.

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

En la calorimetría diferencial de barrido (DSC), se mide directamente el calor absorbido o liberado en función de la temperatura y del tiempo y se compara con una referencia. Una ventaja de los métodos DTA y DSC es que no se requiere ningún cambio de masa, entonces si una muestra se funde sin vaporizarse, aún se pueden tomar las medidas.

De la misma manera que en DTA, se puede emplear el DSC para la determinación de que compuestos están presentes en las diferentes etapas de la hidratación. La Figura 2-50 muestra dos curvas diferentes de calorimetría

de barrido o termogramas. La curva superior (a) presenta una pasta de cemento portland después de 15 minutos de hidratación. Los picos en la curva entre 100°C y 200°C son resultado de la descomposición endotérmica (absorción de calor) del yeso y de la etringita, mientras que el pico a 270°C se debe al sulfato de calcio y potasio hidratado. Cerca de los 450°C, se puede observar un pico menor, debido al hidróxido de calcio.

La curva inferior (B) en la Figura 2-50 enseña la misma pasta de cemento después de 24 horas de hidratación. Observe la desaparición del pico debido a la etringita, la reducción del tamaño del pico debido a singenita y el crecimiento de los picos debidos a la etringita y al hidróxido de calcio. El tamaño de las áreas bajo las curvas está relacionado a la cantidad de material en la muestra.

ENSAYOS VIRTUALES DE CEMENTO

La tecnología computacional permite, hoy en día, la simulación de los compuestos del cemento (Fig. 2-51), su hidratación, el desarrollo de su microestructura y de sus propiedades físicas. Se pueden observar las combinaciones de materiales, compuestos del cemento o distribución del tamaño de las partículas para la predicción del desempeño del cemento. Algunas de las propiedades que se pueden pronosticar son calor de hidratación, calor adiabático, resistencia a compresión, tiempo de fraguado, reología (tensión de escurrimiento y viscosidad), percolación, porosidad, difusividad, conductividad térmica, conductividad eléctrica, carbonatación, propiedades elásticas, perfil de secado, susceptibilidad a los mecanismos de degradación, contracción (retracción) autógena y volúmenes de los reactivos y de los productos de hidratación en función del tiempo. Se pueden observar los efectos de

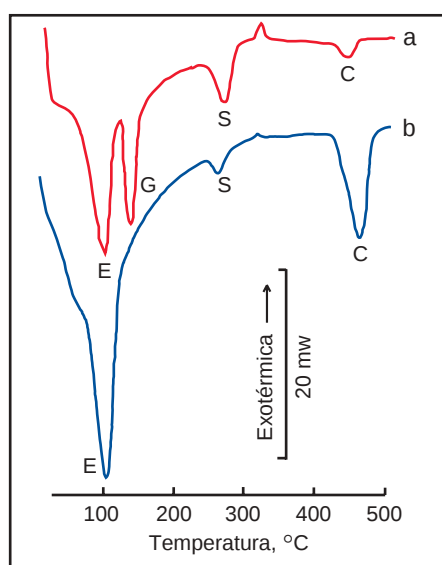


Fig. 2-50. Termograma de calorimetría diferencial de barrido de una pasta de cemento después de (a) 15 minutos y (b) 24 horas de hidratación. C = hidróxido de calcio; E = etringita; G = yeso y S = singenita.

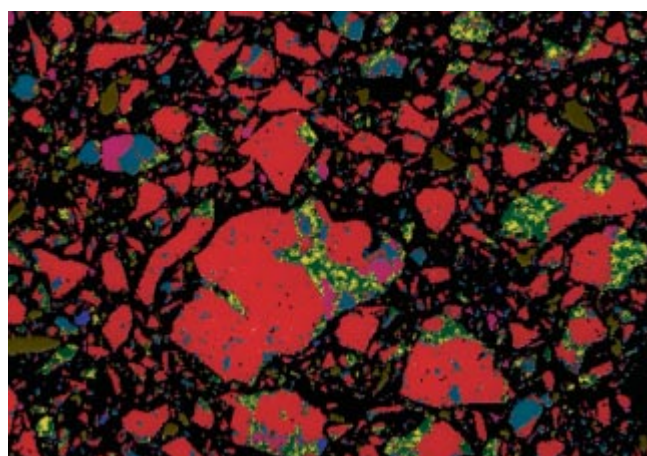


Fig. 2-51. Imagen en dos dimensiones del cemento portland. Los colores son: rojo – silicato tricálcico, azul claro – silicato dicálcico, verde – aluminato tricálcico, amarillo – ferro-aluminato tetracálcico, verde claro – yeso, blanco – cal libre, azul oscuro – sulfato de potasio y magenta – periclase. La imagen ha sido obtenida por una combinación de SEM e imágenes de Rayo X (NIST 2001).



Fig. 2-52. Los cementos portland se despachan a granel de los silos en las plantas para el consumidor por (de la izquierda para la derecha) carril, camión y agua. (IMG12306, IMG12441, IMG12440)

varios contenidos de sulfato y álcalis, juntamente con la interacción de los materiales cementantes suplementarios y de los aditivos químicos. El modelo computacional predice el desempeño sin los gastos y el tiempo necesarios para los ensayos físicos (NIST 2001).

TRANSPORTE Y ENVASE

La Tabla 2-21 presenta la producción de cemento en diversos países. En los EE.UU., la mayor parte del cemento comercializado es a granel por tren, camiones, barcazas o barcos, mientras que en otros países tales como Bolivia,

Chile, Costa Rica, Paraguay y Colombia, entre otros, la mayor parte del cemento se comercializa en sacos (bolsas). La manera más comúnmente usada para el manejo del cemento a granel es la carga y descarga neumática. Pero, la reciente introducción de bolsones con capacidad de volumen de una hasta doce toneladas ofrece una nueva alternativa para el manejo del cemento. El cemento a granel se mide por toneladas métricas (1000 kg) o toneladas cortas (2000 libras).

El cemento envasado en bolsas es conveniente para su uso en las obras de construcción (Fig. 2-53) y pequeñas obras. La masa de cemento en cada saco varía en cada país, diferentes productores y tipos de cemento. La Tabla 2-22 muestra la cantidad de cemento en las bolsas en diversos países. Informaciones específicas sobre la masa de cada tipo de cemento y productor se encuentran en la bolsa.

Debido a gran variedad de tamaño de bolsas y de la presencia de materiales cementantes suplementarios, la terminología del factor de la bolsa de cemento, tal como “una mezcla de bolsa seis” no se debe usar para la descripción del contenido del cemento en una mezcla de concreto.

Al final del siglo XIX y comienzo del XX, el cemento se transportaba en barriles, siendo que un barril contenía

Tabla 2-21. Producción de Cemento en 2000

País	Producción (Millones de toneladas métricas)
Argentina	6.12
Bolivia	1.30
Canadá	12.01
Chile	3.38
Colombia	7.07
Costa Rica	1.15
Ecuador	2.80
El Salvador	1.12
Estados Unidos	82.85
Guatemala	2.00
Honduras	1.28
México	31.70
Nicaragua	0.65
Panamá	1.00
Paraguay	0.65
Perú	3.62
Puerto Rico	1.60
Uruguay	0.70
Venezuela	8.20
Suriname	0.07



Fig. 2-53. El cemento puede despacharse en bolsas, principalmente para aplicaciones en morteros y pequeñas obras. (IMG12439)

Tabla 2-22. Masa de las Bolsas de Cemento en Diversos Países

País	Masa en cada bolsa de cemento (kg)
Argentina	1, 4, 5, 8, 25 y 50
Bolivia	50
Canadá	25 y 50
Chile	5, 20, 42.5 y bolsones de 1.5 ton
Colombia	25, 42.5 y 50
Costa Rica	50 y bolsones de 1 a 1.5 ton
Ecuador	50
El Salvador	42.5
Estados Unidos	42
México	5, 10, 25, 42 y 50
Perú	42.5
Uruguay	50
Venezuela	42.5

4 sacos (171 kgs o 376 lb o 4 pies cúbicos) de cemento. La utilización de la unidad de barril es arcaica y no se la debe usar.

ALMACENAMIENTO DEL CEMENTO

El cemento es un material sensible a la humedad; si se mantiene seco, va a retener su calidad indefinidamente. El cemento almacenado en contacto con el aire húmedo o humedad fragua más lentamente y tiene menos resistencia que un cemento mantenido seco. En la planta de cemento y en las instalaciones de las plantas de concreto premezclado, el cemento a granel se almacena en silos. La humedad relativa en los almacenes o cobertizos usados para guardar los sacos de cemento debería ser la más baja posible. Todas las fisuras y aberturas de los muros y techos deberían ser cerradas. No se debería almacenar los sacos de cemento en pisos húmedos pero sí deben descansar sobre tarimas (palets, estrados). Los sacos se deben apilar juntos para reducir la circulación del aire, pero no se deben nunca apilar cerca de los muros externos. Los sacos que se almacenan por un largo periodo se deben cubrir con lonas (mantas) u otra cobertura impermeable.

En pequeñas obras donde el cobertizo no esté disponible, los sacos se deben colocar sobre plataformas de madera elevadas (palet) sobre el suelo. Las coberturas impermeables deben cubrir toda la pila y extenderse para allá de los bordes de la plataforma para prevenir que la lluvia llegue hasta al cemento y a la plataforma (Fig. 2-54). Las plataformas mojadas pueden dañar los sacos inferiores.

El cemento almacenado por periodos prolongados puede sufrir lo que se llama de “compactación por almacenamiento” o “compactación de bodega”. Esto se corrige

normalmente rodando los sacos sobre el suelo. En el momento del uso, el cemento debe fluir libremente y no debe poseer terrones. Si los terrones no se rompen fácilmente, se debe ensayar el cemento antes de que se lo emplee en trabajos importantes. Se deben hacer ensayos (pruebas) de resistencia y pérdida por ignición, siempre que haya cualquier duda en cuanto a la calidad del cemento.

Normalmente, los cementos no permanecen almacenados por mucho tiempo, pero se pueden almacenar por largos periodos sin presentar deterioro. El cemento a granel se debe almacenar en silos o depósitos de concreto impermeable o acero. Se debe usar aeración seca a baja presión o vibración en los silos para mantener la fluidez del cemento y evitarse la formación de grumos. Como el cemento se queda suelto, no se debe almacenar un volumen de cemento mayor que 80% de la capacidad del silo.



Fig. 2-54. Cuando almacenado en la obra, el cemento se debe proteger de la humedad. (IMG12438)

CEMENTO CALIENTE

Cuando se pulveriza el clinker de cemento en el molino, la fricción genera calor. Entonces, el cemento recién molido está aún caliente cuando se lo coloca en los silos de almacenamiento en las plantas de cemento. Este calor se disipa lentamente, por lo tanto en el verano, cuando la demanda de cemento es mayor, el cemento puede estar todavía caliente cuando es enviado a una planta de concreto premezclado o a la obra. Algunos ensayos han mostrado que el efecto del cemento caliente en la trabajabilidad y en el desarrollo de la resistencia del concreto no es relevante (Lerch 1955). Las temperaturas del agua de mezclado y de los agregados son mucho más importantes para la temperatura final del concreto.

REFERENCIAS

- Abrams, Duff A., "Effect of Hydrated Lime and Other Powdered Admixtures in Concrete (Efecto de la Cal Hidratada y de Otros Aditivos Minerales en el Concreto)," *Proceedings of the American Society for Testing Materials*, Vol. 20, Part 2, 1920. Reprinted with revisions as Bulletin 8, Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute, Junio 1925, 78 páginas. Disponible en la PCA como LS008, http://www.portcement.org/pdf_files/LS008.pdf.
- ACI Committee 223, *Standard Practice for the Use of Shrinkage Compensating Concrete (Práctica Normalizada para el Uso del Concreto con Contracción Compensada)*, ACI 223, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1998, 28 páginas.
- ACI Committee 225, *Guide to the Selection and Use of Hydraulic Cements (Guía para la Elección y el Uso de Cementos Hidráulicos)*, ACI 225, ACI Committee 225 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 1999.
- Aspdin, Joseph, *Artificial Stone (Piedra Artificial)*, British Patent No. 5022, Diciembre 15, 1824, 2 páginas.
- Auburn, *Historical Timeline of Concrete (Historia del Concreto)*, AU BSC 314, Auburn University, http://www.auburn.edu/academic/architecture/bsc/classes/bsc314/timeline/time_line.htm, Junio 2000.
- Barger, Gregory S.; Lukkarila, Mark R.; Martin, David L.; Lane, Steven B.; Hansen, Eric R.; Ross, Matt W.; y Thompson, Jimmie L., "Evaluation of a Blended Cement and a Mineral Admixture Containing Calcined Clay Natural Pozzolan for High-Performance Concrete (Evaluación de los Cementos Adicionados y de los Aditivos Minerales que Contienen Pozzolanas Naturales de Arcilla Calcinada para el Concreto de Alto Desempeño)," *Proceedings of the Sixth International Purdue Conference on Concrete Pavement Design and Materials for High Performance*, Purdue University, West Lafayette, Indiana, Noviembre 1997, 21 páginas.
- Bentz, Dale P., y Farney, Glenn P., *User's Guide to the NIST Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory (Guía del Usuario para el Laboratorio de ensayos Virtuales de Cemento y Concreto)*, Version 1.0, NISTIR 6583, Noviembre. 2000.
- Bhatty, Javed I., "Application of Thermal Analysis to Problems in Cement Chemistry (Aplicación del Análisis Térmico a los Problemas en Química del Cemento)," Chapter 6, *Treatise on Analytical Chemistry*, Part 1, Volume 13, J. D. Winefordner editor, John Wiley & Sons, 1993, páginas 355 a 395.
- Bhatty, Javed I., *Role of Minor Elements in Cement Manufacture and Use (El Papel de los Elementos Minoritarios en la Manufactura y en el Uso del Cemento)*, Research and Development Bulletin RD109, Portland Cement Association, 1995, 48 páginas.
- Bowles, O. y Taeves, A. *Cement in Latin America (El Cemento en América Latina)*, Information circular, United States, Department of the Interior, Bureau of Mines, Junio 1946.
- Brown, Gordon E., *Analysis and History of Cement (Análisis e Historia del Cemento)*, Gordon E. Brown Associates, Keswick, Ontario, 1996, 259 páginas.
- Brunauer, S., *Some Aspects of the Physics and Chemistry of Cement (Algunos Aspectos de la Física y de la Química del Cemento)*, Research Department Bulletin RX080, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX080.pdf, 1957.
- Brunauer, Stephen, *Tobermorite Gel—The Heart of Concrete (Gel de Tobermorita – el Corazón del Concreto)*, Research Department Bulletin RX138, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX138.pdf, 1962, 20 páginas.
- Bureau of Reclamation, *Concrete Manual (Manual del Concreto)*, 8th ed., U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, revisado en 1981.
- BS 915-2, *Specification for High Alumina Cement (Especificación para el Cemento de Alto Contenido de Alumina)*, British Standards Institution, 1972.
- Campbell, Donald H., *Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker (Examen e Interpretación Microscópica del Cemento Portland y del Clinker)*, SP030, Portland Cement Association, 1999.
- Clausen, C. F., *Cement Materials (Materiales Cementantes)*, Research Department Report MP-95, Portland Cement Association, 1960.
- Copeland, L.E., y Hayes, John C., *The Determination of Non-evaporable Water in Hardened Portland Cement Paste (Determinación del Agua No-Evaporable en la Pasta Endurecida de Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX047, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX047.pdf, 1953.
- Copeland, L. E.; Kantro, D. L.; y Verbeck, George, *Chemistry of Hydration of Portland Cement (Química de la Hidratación del Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX153, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX153.pdf, 1960.
- Copeland, L. E., y Schulz, Edith G., *Electron Optical Investigation of the Hydration Products of Calcium Silicates and Portland Cement (Investigación Electrónica Óptica de los Productos de Hidratación de los Silicatos de Calcio y del Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX135, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX135.pdf, 1962.
- Davidovits, Joseph; Davidovits, Ralph; y James, Claude, editors, *Geopolymer '99 (Geopolímero 99)*, The Geopolymer Institute, <http://www.geopolymer.org>, Insset, Université de Picardie, Saint-Quentin, France, Julio 1999.

DeHayes, Sharon M., "C 109 vs. Concrete Strengths (C 109 contra la Resistencia del Concreto)" *Proceedings of the Twelfth International Conference on Cement Microscopy*, International Cement Microscopy Association, Duncanville, Texas, 1990.

Detwiler, Rachel J.; Bhatti, Javed I.; Barger, Gregory; and Hansen, Eric R., "Durability of Concrete Containing Calcined Clay (Durabilidad del Concreto conteniendo Arcilla Calcinada)," *Concrete International*, Abril 2001, páginas 43 a 47.

Detwiler, Rachel J.; Bhatti, Javed I.; y Bhattacharja, Sankar, *Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements (Materiales Cementantes Suplementarios para el Uso en los Cementos Adicionados)*, Research and Development Bulletin RD112, Portland Cement Association, 1996, 108 páginas.

EN 197-1, *European Standard for Cement—Part 1: Composition, Specifications and Common Cements (Norma Europea para el Cemento – Parte 1: Composición, especificaciones y cementos comunes)*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2000.

EN 197-2, *European Standards for Cement—Part 2: Conformity Evaluation (Norma Europea para el Cemento – Parte 2: evaluación de la conformidad)*, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2000.

Farny, J. A., *Hormigón de Cemento Blanco*, EB222, Portland Cement Association 2003, 24 páginas.

Farny, J. A., *Concreto de Cemento Blanco*, primera edición, EB224, Portland Cement Association, 2003a, 24 páginas.

Gajda, John, *Development of a Cement to Inhibit Alkali-Silica Reactivity (Desarrollo de un cemento para Inhibir la Reactividad Alkali-Silice)*, Research and Development Bulletin RD115, Portland Cement Association, 1996, 58 páginas.

Gebhardt, R. F., "Survey of North American Portland Cements: 1994 (Levantamiento de los Cementos Portland en América del Norte)," *Cement, Concrete, and Aggregates*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Diciembre 1995, páginas 145 a 189.

Gonnerman, H. F., *Development of Cement Performance Tests and Requirements (Desarrollo de Ensayos y Requisitos de Desempeño de Cementos)*, Research Department Bulletin RX093, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX093.pdf, 1958.

Gonnerman, H. F., y Lerch, William, *Changes in Characteristics of Portland Cement as Exhibited by Laboratory Tests Over the Period 1904 to 1950 (Cambios de las Características del Cemento Portland como se Muestra por Ensayos de Laboratorio durante el Período de 1904 y 1950)*, Research Department Bulletin RX039, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX039.pdf, 1952.

Gonnerman, H. F.; Lerch, William; y Whiteside, Thomas M., *Investigations of the Hydration Expansion Characteristics of Portland Cements (Investigaciones de las Características de Expansión en la Hidratación de los Cementos Portland)*, Research Department Bulletin RX045, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX045.pdf, 1953.

Greening, Nathan R.; Copeland, Liewellyn E.; y Verbeck, George J., *Modified Portland Cement and Process (Cemento Portland Modificado y su Proceso)*, United States Patent No. 3,628,973, Publicado por Portland Cement Association, Diciembre 21, 1971.

Hansen, W. C.; Offutt, J. S.; Roy, D. M.; Grutzeck, M. W.; y Schatzlein, K. J., *Gypsum & Anhydrite in Portland Cement (Yeso y Anhidrita en el Cemento Portland)*, United States Gypsum Company, Chicago, 1988, 104 páginas.

Helmuth, Richard; Hills, Linda M.; Whiting, David A.; y Bhattacharja, Sankar, *Abnormal Concrete Performance in the Presence of Admixtures (Comportamiento Anormal del Concreto en Presencia de Aditivos)*, RP333, Portland Cement Association, 1995, 94 páginas.

Hills, Linda M., "Clinker Formation and the Value of Microscopy (Formación del Clínter y el Valor de la Microscopía)," *Proceedings of the Twenty-Second International Conference on Cement Microscopy*, Montreal, 2000, páginas 1 a 12.

Johansen, Vagn, y Idorn, G. M., "Cement Production and Cement Quality (Producción y Calidad del Cemento)," *Material Science of Concrete I*, Edited by J. Skalny, American Ceramic Society, 1989, páginas 27 a 72.

Kanare, Howard M., *Certifying Portland Cement to ANSI/NSF 61 for Use in Drinking Water System Components (Certificación del Cemento Portland por ANSI/NSF 61 para el Uso en Componentes del Sistema de Agua Potable)*, SP117, Portland Cement Association, 1995, 253 páginas.

Kanare, Howard M., y West, Presbury B., "Leachability of Selected Chemical Elements from Concrete (Tendencia a la Lixiviación de Elementos Químicos Seleccionados desde el Concreto)," *Emerging Technologies Symposium on Cement and Concrete in the Global Environment*, SP114, Portland Cement Association, 1993, 366 páginas.

Klemm, Waldemar A., *Ettringite and Oxyanion-Substituted Ettringites—Their Characterization and Applications in the Fixation of Heavy Metals: A Synthesis of the Literature (Etringita y Etringitas Sustitutas del Oxianión – Su caracterización y aplicaciones en la fijación de los metales pesados: una síntesis de la Literatura)*, Research and Development Bulletin RD116, Portland Cement Association, 1998, 80 páginas.

Klieger, Paul, y Isberner, Albert W., *Laboratory Studies of Blended Cements—Portland Blast-Furnace Slag Cements (Estudios de Laboratorio de Cementos Adicionados) – Cementos Portland de Alto Horno)*, Research Department Bulletin RX218, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX218.pdf, 1967.

Lange, D. y Stutzman, P., *The Concrete Microscopy Library (Biblioteca de la Microscopía del Concreto)*, <http://www.cce.ce.uiuc.edu/lange/micro>, 1999.

Lea, F. M., *The Chemistry of Cement and Concrete (La Química del Cemento y del Concreto)*, 3rd ed., Chemical Publishing Co., Inc., New York, 1971.

Lerch, William, *Hot Cement and Hot Weather Concrete Tests (Cemento Caliente y Ensayos para el Concreto en Clima Caluroso)*, IS015, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/IS015.pdf, 1955.

Lerch, William, *The Influence of Gypsum on the Hydration and Properties of Portland Cement Pastes (La Influencia del Yeso sobre la Hidratación y las Propiedades de las Pastas de Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX012, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX012.pdf, 1946.

Locher, F. W.; Richartz, W.; y Sprung, S., "Setting of Cement-Part I: Reaction and Development of Structure (Fraguado del Cemento - Parte 1: Reacción y Desarrollo de la Estructura)," *ZKG INTERN.* 29, No. 10, 1976, páginas 435 a 442.

McMillan, F. R.; Tyler, I. L.; Hansen, W. C.; Lerch, W.; Ford, C. L.; y Brown, L. S., *Long-Time Study of Cement Performance in Concrete (Estudio de Largo Plazo del Comportamiento del Cemento en el Concreto)*, Research Department Bulletin RX026, Portland Cement Association, 1948.

Melander, John M. y Isberner, Albert W. Jr., *Portland Cement Plaster (Stucco) Manual (Manual del Estuco de Cemento Portland)*, EB049, Portland Cement Association, 1996, 60 páginas.

Nehdi, Moncef, "Ternary and Quaternary Cements for Sustainable Development (Cementos Ternarios y Cuaternarios para el desarrollo Sustentable)," *Concrete International*, Abril 2001, páginas 35 a 42.

NF P15-315, *Hydraulic Binders: High Alumina Melted Cement (Aglomerantes Hidráulicos: Cemento fundido con alto contenido de alumina)*, AFNOR Association française de normalisation, 1991.

NIST, *Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory (Laboratorio de Ensayos Virtuales de Cemento y Concreto)*, <http://vcctl.cbt.nist.gov>, 2001.

Odler, Ivan, *Special Inorganic Cements (Cementos Inorgánicos Especiales)*, E&FN Spon, New York, 2000, 420 páginas.

PCA, *An Analysis of Selected Trace Metals in Cement and Kiln Dust (Un Análisis de Metales Seleccionados en el Cemento y el Polvo del Horno)*, SP109, Portland Cement Association, 1992, 60 páginas.

PCA, *Emerging Technologies Symposium on Cements for the 21st Century (Simposio de las Tecnologías Emergentes en los Cementos del Siglo XXI)*, SP206, Portland Cement Association, 1995, 140 páginas.

PCA, "Portland Cement: Past and Present Characteristics (Cemento Portland: Características del Pasado y del Presente)," *Concrete Technology Today*, PL962, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL962.pdf, Julio 1996, páginas 1 a 4.

PCA, "Portland Cement, Concrete, and the Heat of Hydration (Cemento Portland, Concreto y calor de Hidratación)," *Concrete Technology Today*, PL972, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL972.pdf, Julio 1997, páginas 1 a 4.

PCA, "What is White Cement? (¿Qué es el Cemento Blanco?)," *Concrete Technology Today*, PL991, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL991.pdf, Abril 1999, 4 páginas.

PCA, *U.S. Cement Industry Fact Sheet (Realidad de la Industria del Cemento en EE.UU.)*, Portland Cement Association, 2002.

Perenchio, William F. y Klieger, Paul, *Further Laboratory Studies of Portland-Pozzolan Cements (Estudios de Laboratorio Adicionales sobre los Cementos Portland Puzolánicos)*, Research and Development Bulletin RD041, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD041.pdf, 1976.

Pfeifer, Donald W., y Perenchio, W. F., *Reinforced Concrete Pipe Made with Expansive Cements (Tubería de Concreto Reforzado producida con Cementos Expansivos)*, Research and Development Bulletin RD015, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD015.pdf, 1973.

Powers, T. C., *Some Physical Aspects of the Hydration of Portland Cement (Algunos Aspectos Físicos de la Hidratación del Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX126, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX126.pdf, 1961.

Powers, T. C., *The Nonevaporable Water Content of Hardened Portland-Cement Paste-Its Significance for Concrete Research and Its Method of Determination (El Contenido de Agua No-Evaporable de las Pastas Endurecidas de Cemento Portland - Su Significado para la Investigación del concreto y su Método de Determinación)*, Research Department Bulletin RX029, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX029.pdf, 1949.

Powers, T. C., y Brownyard, T. L., *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste (Estudios de las Propiedades Físicas de las Pastas Endurecidas de Cemento Portland)*, Research Department Bulletin RX022, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX022.pdf, 1947.

Russell, H. G., *Performance of Shrinkage-Compensating Concretes in Slabs (Desempeño de los Concreto de Contracción Compensada en las Losas)*, Research and Development Bulletin RD057, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD057.pdf, 1978.

- Shkolnik, E., y Miller, F. M., "Differential Scanning Calorimetry for Determining the Volatility and Combustibility of Cement Raw Meal Organic Matter (Calorimetría Diferencial de Barrido para la Determinación de la Volatilidad y de la Combustibilidad de la Materia Orgánica de la Harina Cruda del Cemento)," *World Cement Research and Development*, Mayo 1996, páginas 81 a 87.
- Snell, Luke M., y Snell, Billie G., *The Erie Canal—America's First Concrete Classroom (El Canal Erie – la primera sala de aula del concreto en América)*, <http://www.siue.edu/~lsnell/erie.htm>, 2000.
- Stark, David, *Durability of Concrete in Sulfate-Rich Soils (Durabilidad del Concreto en Suelos Ricos en Sulfatos)*, Research and Development Bulletin RD097, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RD097.pdf, 1989.
- Stark, David, *Performance of Concrete in Sulfate Environments (Comportamiento del Concreto en Ambientes con Sulfatos)*, R&D Serial No. 2248, Portland Cement Association, 2002.
- Tang, Fulvio J., *Optimization of Sulfate Form and Content (Optimización de la Forma y del Contenido de Sulfatos)*, Research and Development Bulletin RD105, Portland Cement Association, 1992, 44 páginas.
- Taylor, H. F. W., *Cement Chemistry (Química del Cemento)*, Thomas Telford Publishing, London, 1997, 477 páginas.
- Tennis, Paul D., "Laboratory Notes: Thermal Analysis by TGA, DTA, and DSC (Notas de Laboratorio: Análisis térmico por TGA, DTA y DSC)," *Concrete Technology Today*, PL971, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/PL971.pdf, Abril 1997, páginas 6 y 7.
- Tennis, Paul D., y Jennings, Hamlin M., "A Model for Two Types of Calcium Silicate Hydrate in the Microstructure of Portland Cement Pastes (Un Modelo para Dos Tipos de Silicatos de Calcio Hidratados en la Microestructura de las Pastas de Cemento Portland)," *Cement and Concrete Research*, Pergamon, Junio 2000, páginas 855 a 863.
- Toler, H. R., *Flowability of Cement (Flujo del Cemento)*, Research Department Report MP-106, Portland Cement Association, Octubre, 1963.
- Verbeck, G. J., *Field and Laboratory Studies of the Sulphate Resistance of Concrete (Estudios de Campo y de Laboratorio sobre la Resistencia del Concreto a Sulfatos)*, Research Department Bulletin RX227, Portland Cement Association, http://www.portcement.org/pdf_files/RX227.pdf, 1967.
- Washa, George W., y Wendt, Kurt F., "Fifty Year Properties of Concrete (50 Años de Propiedades del Concreto)," *ACI Journal*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, Enero 1975, páginas 20 a 28.
- Weaver, W. S.; Isabelle, H. L.; y Williamson, F., "A Study of Cement and Concrete Correlation (Un Estudio sobre la Correlación entre el Cemento y el Concreto)," *Journal of Testing and Evaluation*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, Enero 1974, páginas 260 a 280.
- White, Canvass, *Hydraulic Cement (Cemento Hidráulico)*, U. S. patent, 1820.
- Wood, Sharon L., *Evaluation of the Long-Term Properties of Concrete (Evaluación a Largo Plazo de las Propiedades del Concreto)*, Research and Development Bulletin RD102, Portland Cement Association, 1992, 99 páginas.
- Zhang, Min-Hong; Bremner, Theodore, W; y Malhotra, V. Mohan, "The Effect of Portland Cement Type on Performance" (El Efecto del Tipo de Cemento Portland sobre el Desempeño), *Concrete International*, Enero 2003, páginas 87 a 94.

