

EL CEMENTO

En ingeniería civil y construcción se denomina **cemento** a un aglutinante o aglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, manejable y plástica capaz de fraguar y endurecer al reaccionar con el agua y adquiriendo por ello consistencia pétreo, el hormigón o **concreto**. Su uso está muy generalizado, siendo su principal función la de aglutinante.

Tabla de contenidos

1 Tipos de cemento

1.1 El cemento Portland

- 1.1.1 Reacciones de formación del clinker
- 1.1.2 Reacciones de hidratación
- 1.1.3 Función del yeso
- 1.1.4 Módulos
- 1.1.5 Cementos Portland especiales
 - 1.1.5.1 Portland férrico
 - 1.1.5.2 Cementos blancos

1.2 Cementos de mezclas

- 1.2.1 Cemento puzolánico
- 1.2.2 Cemento siderúrgico

1.3 Cemento de fraguado rápido

1.4 Cemento aluminoso

- 1.4.1 Reacciones de hidratación

2 Proceso de fabricación

3 Almacenamiento del cemento

Tipos de cemento

Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos:

- a) base de arcilla. Obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente.
- b) puzolánicos. La puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o de origen volcánico.

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos.

Desde el punto de vista químico se trata en general de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, obtenidos a través del cocido de calcareo, arcilla y arena. El material obtenido, molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente. Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definir las composiciones.

El cemento Portland

El cemento Portland es el tipo de cemento más utilizado como ligante para la preparación del hormigón o concreto.

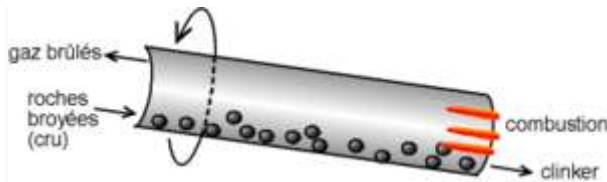
Fue inventado en 1824 en Inglaterra por el albañil Joseph Aspdin. El nombre se debe a la semejanza en su aspecto con las rocas encontradas en Portland, una isla del condado de Dorset.

La fabricación del cemento Portland se da en tres fases: (i) Preparación de la mezcla de las materias primas; (ii) Producción del clinker; y, (iii) Preparación del cemento.

Las materias primas para la producción del Portland son minerales que contienen:

- óxido de calcio (44%),
- óxido de silicio (14,5%),
- óxido de aluminio (3,5%),
- óxido de hierro (3%) y
- óxido de magnesio (1,6%).

La extracción de estos minerales se hace en canteras, que preferiblemente deben estar próximas a la fábrica, con frecuencia los minerales ya tienen la composición deseada, sin embargo en algunos casos es necesario agregar arcilla o calcáreo, o bien minerales de hierro, bauxita, u otros minerales residuos de fundiciones.



Esquema de un horno Kilm

La mezcla es calentada en un horno especial, constituido de un inmenso cilindro (llamado *Kilm*) dispuesto horizontalmente con una ligera inclinación, y rodando lentamente. La temperatura crece a lo largo del cilindro hasta llegar a aproximadamente 1400°C; la temperatura es tal que hace que los minerales se combinen pero no se fundan o vitrifiquen.

En la sección de temperatura menor, el carbonato de calcio (calcáreo) se separa en óxido de calcio y bióxido de carbono (CO₂). En la zona de alta temperatura el óxido de calcio reacciona con los silicatos y forma silicatos de calcio (Ca₂Si y Ca₃Si). Se forma también una pequeña cantidad de aluminato tricálcico (Ca₃Al) y Aluminoferrito de tricalcio (Ca₄AlFe). El material resultante es denominado *clinker*. El clinker puede ser conservado durante años antes de proceder a la producción del cemento, con la condición de que no entre en contacto con el agua.

La energía necesaria para producir el clinker es de aproximadamente 1.700 joules por gramo, pero a causa de las pérdidas de calor el valor es considerablemente más elevado. Esto comporta una gran demanda de energía para la producción del cemento, y por lo tanto la liberación de una gran cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, gas de efecto invernadero.

Para mejorar las características del producto final al clinker se le agrega aproximadamente el 2 % de yeso y la mezcla es molida finamente. El polvo obtenido es el cemento preparado para su uso.

El cemento obtenido tiene una composición del tipo:

- 64% óxido de calcio
- 21% óxido de silicio
- 5,5% óxido de aluminio
- 4,5% óxido de hierro
- 2,4% óxido de magnesio
- 1,6% sulfatos
- 1% otros materiales, entre los cuales principalmente agua.

Cuando el cemento Portland es mezclado con el agua, el producto solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas. El

endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, yeso y aluminato tricálcico, formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato, estringita y monosulfato. El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato de tricalcio formando una estructura amorfa llamada calcio-silicato-hidrato. En ambos casos, las estructuras que se forman envuelven y fijan los granos de los materiales presentes en la mezcla. Una última reacción produce el gel de silicio (SiO_2). Las tres reacciones generan calor.

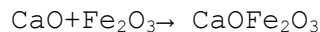
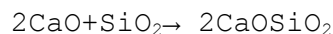
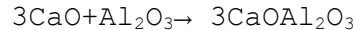
Con el agregado de materiales particulares al cemento (calcáreo o cal) se obtiene el *cemento plástico*, que fragua más rápidamente y es más fácilmente trabajable. Este material es usado en particular para el revestimiento externo de edificios.

La calidad del cemento Portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150.

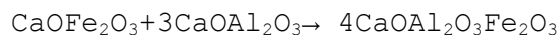
En el 2004, los principales productores mundiales de cemento Portland fueron la *Lafarge* en Francia, la *Holcim* en Suiza y la *Cemex* en México. Algunos productores de cemento fueron multados por comportamiento monopólico.

Reacciones de formación del clinker

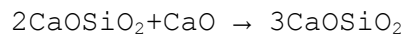
1000–1100°C



1100–1200°C



1250 - 1480°C



La composición final será de:

50% 3CaOSiO_2

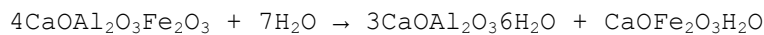
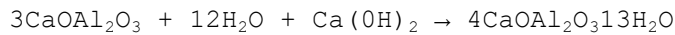
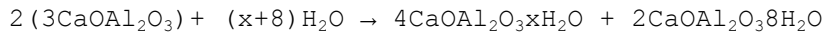
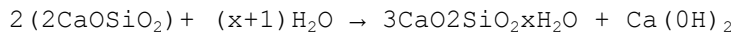
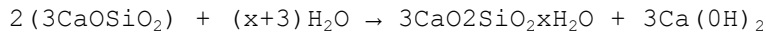
25% 2CaOSiO_2

12% $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$

8% $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$

Reacciones de hidratación

Las reacciones de hidratación, que forman el *proceso de fraguado* son:



Estas reacciones son todas exotérmicas. La más exotérmica es la hidratación de $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$, seguida de la de 3CaOSiO_2 , y luego $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ y finalmente 2CaOSiO_2 .

Función del yeso

El yeso es generalmente agregado al clinker para regular el fraguado. Su presencia hace que el fraguado se concluya aproximadamente en 45 minutos. El yeso reacciona con el aluminato tricálcico para formar una sal expansiva llamada etringita.



Módulos

Los módulos son valores característicos de cada cemento o cal, que permiten conocer en que relación se encuentran, porcentualmente, los diversos componentes en el producto final. Para el cemento Portland se tiene:

Módulo hidráulico

$$M_i = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3 + \% \text{SiO}_2} = 1.7 - 2.3$$

Módulo de silicatos

$$M_s = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3} = 1.9 - 3.2$$

Módulo silícico

$$M_c = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Al}_2\text{O}_3} = 2.5 - 3.5$$

$$M_f = \frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} = 1.5 - 2.5$$

Módulo de alúmica

Cementos Portland especiales

Los *cementos Portland especiales* son cementos que se obtienen de la misma forma que el Portland, pero que tienen características diferentes a causa de variaciones en el porcentaje de los componentes que lo forman.

Portland férrico

El *Portland férrico* está caracterizado por un *módulo de fundentes* de 0.64. Esto significa que este cemento es muy rico en hierro. En efecto se obtiene introduciendo cenizas de pirita o minerales de hierro en polvo. Este tipo de composición comporta por lo tanto, además de una mayor presencia de Fe_2O_3 , una menor presencia de $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ cuya hidratación es la que desarrolla más calor. Por este motivo estos cementos son particularmente apropiados para ser utilizados en climas cálidos. Los mejores cementos férricos son los que tienen un *módulo calcareo* bajo, en efecto estos contienen una menor cantidad de 3CaOSiO_2 , cuya hidratación produce la mayor cantidad de cal libre ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Puesto que la cal libre es el componente mayormente atacable por las aguas agresivas, estos cementos, conteniendo una menor cantidad, son más resistentes a las aguas agresivas.

Cementos blancos

Contrariamente a los cementos férricos, los *cementos blancos* tienen un módulo de fundentes muy alto, aproximadamente 10. Estos contienen por lo tanto un porcentaje bajísimo de Fe_2O_3 . El color blanco es debido a la falta del hierro que le da una tonalidad grisácea al Portland normal y un gris más oscuro al cemento ferrico. La reducción del Fe_2O_3 es compensada con el agregado de fluorita (CaF_2) y de criolita (Na_3AlF_6), necesarios en la fase de fabricación en el horno.

Cementos de mezclas

Los **cementos de mezclas** se obtienen agregando al cemento Portland normal otros componentes como la *puzolana*. El agregado de estos componentes le da a estos cementos nuevas características que lo diferencian del Portland norma.

Cemento puzolánico

Se denomina *puzolana* a una fina ceniza volcánica que se extiende principalmente en la región del Lazio y la Campaña, su nombre deriva de la localidad de Pozzuoli, en las proximidades de Nápoles, en las faldas del Vesubio. Posteriormente se ha generalizado a las cenizas volcánicas en otros lugares. Ya Vitruvio describía cuatro tipos de puzolana: negra, blanca, gris y roja.

Mezclada con cal (en la relación de 2 a 1) se comporta como el cemento pozolánico, y permite la preparación de una buena mezcla en grado de fraguar incluso bajo agua.

Esta propiedad permite el empleo innovador del hormigón, como ya habían entendido los romanos: El antiguo puerto de Cosa fue construido con puzolana mezclada con cal apenas antes de su uso y colada bajo agua, probablemente utilizando un tubo, para depositarla en el fondo sin que se diluya en el agua de mar. Los tres muelles son visibles todavía, con la parte sumergida en buenas condiciones después de 2100 años.

La puzolana es una piedra de naturaleza ácida, muy reactiva, al ser muy porosa y puede obtenerse a bajo precio. Un cemento pozolánico contiene aproximadamente:

55-70% de clinker Portland

30-45% de puzolana

2-4% de yeso

Puesto que la puzolana se combina con la cal (Ca(OH)_2), se tendrá una menor cantidad de esta última. Pero justamente porque la cal es el componente que es atacado por las aguas agresivas, el cemento pozolánico será más resistente al ataque de éstas. Por otro lado, como el $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ está presente solamente en el componente constituido por el clinker Portland, la colada de cemento pozolánico desarrollará un menor calor de reacción durante el fraguado. Este cemento es por lo tanto adecuado para ser usado en climas particularmente calurosos o para coladas de grandes dimensiones.

Cemento siderúrgico

La puzolana ha sido sustituida en muchos casos por la ceniza de carbón proveniente de las centrales termoeléctricas, escoria de fundiciones o residuos obtenidos calentando el cuarzo. Estos componentes son introducidos entre el 35 y hasta el 80%. El porcentaje de estos materiales puede ser particularmente elevado, siendo que se origina a partir de silicatos, es un material potencialmente hidráulico. Esta debe sin embargo ser activada en un ambiente alcalino, es decir en presencia de iones OH^- . Es por este motivo que debe estar presente por lo menos un 20 % de cemento Portland normal. Por los mismos motivos que el cemento pozolánico, el cemento siderúrgico también tiene buena resistencia a las aguas agresivas y desarrolla menos calor durante el fraguado. Otra característica de estos cementos es su elevada alcalinidad natural, que lo rinde particularmente resistente a la corrosión atmosférica causada por los sulfatos.

Cemento de fraguado rápido

El *cemento de fraguado rápido*, también conocido como «cemento romano», se caracteriza por iniciar el fraguado a los pocos minutos de su preparación con agua. Se produce en forma similar al cemento Portland, pero con el horno a una temperatura menor. Es apropiado para trabajos menores, de fijaciones y reparaciones, no es apropiado para grandes obras porque no se dispondría del tiempo para efectuar una buena colada.

Cemento aluminoso

El *cemento aluminoso* se produce a partir principalmente de la bauxita con impurezas de óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de titanio (TiO_2) y óxido de silicio (SiO_2). Adicionalmente se agrega calcáreo o bien carbonato de calcio. El cemento aluminoso, también llamado «cemento fundido», por lo que la temperatura del horno alcanza hasta los 1.600°C y se alcanza la fusión de los componentes. El cemento fundido es colado en moldes para formar «panes» que serán enfriados y finalmente molidos para obtener el producto final.

El cemento aluminoso tiene la siguiente composición de óxidos:

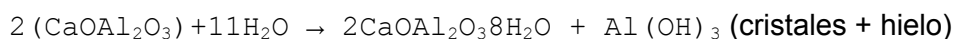
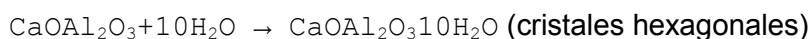
- 35-40% óxido de calcio
- 40-50% óxido de aluminio
- 5% óxido de silicio
- 5-10% óxido de hierro
- 1% óxido de titanio

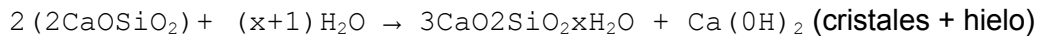
Por lo que se refiere a sus reales componentes se tiene:

- 60-70% CaOAl_2O_3
- 10-15% 2CaOSiO_2
- $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$
- $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$

Por lo que se refiere al óxido de silicio, su presencia como impureza tiene que ser menor al 6 %, porque el componente al que da origen, es decir el ($2\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$) tiene pocas propiedades hidrófilas.

Reacciones de hidratación





Mientras el cemento Portland es un cemento de naturaleza básica, gracias a la presencia de cal $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el cemento aluminoso es de naturaleza sustancialmente neutra. La presencia del hidróxido de aluminio $\text{Al}(\text{OH})_3$, que en este caso se comporta como ácido, provocando la neutralización de los dos componentes y dando como resultado un cemento neutro.

El cemento aluminoso debe utilizarse con temperaturas inferiores a los 30°C , por lo tanto en climas fríos. En efecto, si la temperatura fuera superior la segunda reacción de hidratación cambiaría y se tendría la formación de $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (cristales cúbicos) y una mayor producción de $\text{Al}(\text{OH})_3$, lo que llevaría a un aumento del volumen y podría causar fisuras.

Proceso de fabricación

Existe una gran variedad de cementos según la materia prima base y los procesos utilizados para producirlo, que se clasifican en procesos de *vía seca* y procesos de *vía húmeda*.

El proceso de fabricación del cemento comprende cuatro etapas principales:

- extracción y molienda de la materia prima
- homogeneización de la materia prima
- producción del Clinker
- molienda de cemento.

La materia prima para la elaboración del cemento (caliza, arcilla, arena, mineral de hierro y yeso) se extrae de canteras o minas y, dependiendo de la dureza y ubicación del material, se aplican ciertos sistemas de explotación y equipos. Una vez extraída la materia prima es reducida a tamaños que puedan ser procesados por los molinos de crudo.

La etapa de homogeneización puede ser por *vía húmeda* o por *vía seca*, dependiendo de si se usan corrientes de aire o agua para mezclar los materiales. En el proceso húmedo la mezcla de materia prima es bombeada a balsas de homogeneización y de allí hasta los hornos en donde se produce el clinker a temperaturas superiores a los 1500°C . En el proceso seco, la materia prima es homogeneizada en patios de materia prima con el uso de maquinarias especiales. En este proceso el control químico es más eficiente y el consumo de energía es menor, ya que al no tener que eliminar el

agua añadida con el objeto de mezclar los materiales, los hornos son más cortos y el clínker requiere menos tiempo sometido a las altas temperaturas.

El clínker obtenido, independientemente del proceso utilizado en la etapa de homogeneización, es luego molido con pequeñas cantidades de yeso para finalmente obtener cemento.

Almacenamiento del cemento

El cemento es una sustancia particularmente sensible a la acción del agua y de la humedad, por lo tanto para salvaguardar sus propiedades, se deben tener algunas precauciones muy importantes, entre otras: Inmediatamente después de que el cemento se reciba en el área de las obras si es cemento a granel, deberá almacenarse en depósitos secos, diseñados a prueba de agua, adecuadamente ventilados y con instalaciones apropiadas para evitar la absorción de humedad. Si es cemento en sacos, deberá almacenarse sobre parrillas de madera o piso de tablas; no se apilará en hileras superpuestas de más de 14 sacos de altura para almacenamiento de 30 días, ni de más de 7 sacos de altura para almacenamientos hasta de 2 meses. Para evitar que el cemento envejezca indebidamente, después de llegar al área de las obras, el Contratista deberá utilizarlo en la misma secuencia cronológica de su llegada. No se utilizará bolsa alguna de cemento que tenga más de dos meses de almacenamiento en el área de las obras, salvo que nuevos ensayos demuestren que está en condiciones satisfactorias.