

1. CONOCIMIENTOS GENERALES DEL CEMENTO

El cemento como mezcla de uso universal posee ciertos elementos y características que lo hacen singular frente a una gran variedad de materiales presentes en la naturaleza y entre los elaborados a través de procedimientos industriales simples o complejos. Para poder visualizar la industria de este producto se debe conocer qué es, su microestructura, su comportamiento frente a ciertos cambios, entre otros.

1.1. Qué es el cemento

A continuación se dará dos de algunos de los conceptos más entendibles y conocidos para la palabra cemento, para empezar a familiarizarse con el tema que se va a desarrollar.

1.1.1. Definición

El cemento es un conglomerante hidráulico; es un producto que mezclado con agua forma una pasta que fragua y endurece, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables, tanto en el aire, como bajo agua.

El cemento es un material básico para la edificación y la ingeniería civil. Tiene como propiedad principal la de formar masas pétreas resistentes y duraderas cuando se mezcla con áridos y agua.

El endurecimiento de la mezcla ocurre cierto tiempo después del amasado, permitiendo por lo tanto, moldear el producto resultante.

1.2. Tipos de cementos

Los cementos son materiales conglomerantes obtenidos por calentamiento hasta la clinkerización (sinterización) de carbonato cálcico, sílice y alúmina.

Los productos obtenidos son hidráulicos (silicatos y aluminatos cálcicos que fraguan bajo el agua) que se muelen hasta obtener materiales en forma de polvo muy fino. Aunque se trata de materiales artificiales, se distinguen los siguientes dos tipos:

1.2.1. Cementos naturales

Se utiliza para su fabricación calizas margosas (arcillosas). Estos cementos son descritos por la norma UNE 80309-2006 “Cementos naturales. Definiciones, clasificación y especificaciones de los cementos naturales” y designados genéricamente por el prefijo CN, seguido de las letras R o L, haciendo mención si se trata de cementos rápidos o lentos en fraguar. Son el resultado de la calcinación de margas a unos 1000°C. De composición química muy variable, suelen tener más sílice y alúmina y menos cal que los cementos artificiales. Pueden utilizarse en obras de albañilería, pero debido a su baja resistencia no son apropiados para elementos estructurales.

1.2.2. Cementos artificiales

Se mezclan calizas y arcillas para su fabricación, en proporción tal, que toda la cal reaccione con los silicatos convenientemente preparados y dosificados. Son más constantes en su composición que los cementos naturales. La cocción de la mezcla se realiza a una temperatura de entre 1450 y 1480 °C. La masa homogénea obtenida se denomina clínquer, la cual, después de ser triturada finamente, se convierte en el componente básico para la fabricación del cemento. Entre los cementos artificiales se distinguen los siguientes:

1.2.2.1. Portland

El clínker de cemento portland se obtiene por sinterización de una mezcla de materias primas (crudo, pasta o harina finamente dividido, íntimamente mezclado y homogéneo) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y pequeñas cantidades de otras materias.

Las materias primas para la fabricación del cemento Portland consisten esencialmente en caliza, marga, arena silíceo y arcilla. También se emplean otras adiciones tales como yeso o materiales puzolánicos. Las calizas y margas aportan el óxido de calcio y las arcillas son responsables del aporte de los óxidos metálicos.

El proceso de elaboración consiste en mezclar las rocas calcáreas y las arcillas en proporciones adecuadas y molerlas finamente, de manera que el CaO de la caliza y los compuestos de la arcilla (SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃) resulten homogenizados adecuadamente.

El producto resultante, denominado polvo crudo, se calcina en un horno a temperaturas de 1450°C-1600°C, donde se produce la fusión incipiente del producto resultante, denominado clínker. El clínker está compuesto fundamentalmente por los cuatro óxidos anteriormente mencionados y conocidos como se describe en la tabla I.

Tabla I. **Principales óxidos de clínker**

| Compuesto | Fórmula | Abreviatura |
|---------------------|--------------------------------|-------------|
| Cal | CaO | C |
| Sílice | SiO | S |
| Alúmina | Al ₂ O ₃ | A |
| Hierro | Fe ₂ O ₃ | F |
| Agua | H ₂ O | H |
| Anhídrido Sulfúrico | SO ₃ | Ŝ |
| Óxido Magnésico | MgO | M |
| Óxido Sódico | Na ₂ O | N |
| Óxido Potásico | K ₂ O | K |

Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 30.

1.2.2.2. Aluminato cálcico

Se fabrican con caliza y bauxita (alúmina), obteniéndose aluminatos cálcicos y presentan alta resistencia inicial. Los compuestos que se forman son aluminato monocálcico y silicato bicálcico. No necesita ningún tipo de regulador de fraguado. Llamados anteriormente cementos aluminosos, de endurecimiento muy rápido y, por lo tanto, de muy altas resistencias a cortas edades. De acuerdo con la norma UNE 80310:1996 “Cementos de Aluminato de Calcio” se designan con el prefijo CAC, seguido de la letra R, indicativa de altas resistencias iniciales.

1.2.2.3. Siderúrgico

Mezcla de clínker de Portland, yeso y escoria de alto horno. La escoria de alto horno es un material hidráulico latente, es decir, que posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada. Esta escoria debe de estar constituida por lo menos 2/3 en masa de la suma de CaO, MgO y SiO₂. El resto contiene Al₂O₃ junto con pequeñas cantidades de otros óxidos. La escoria granulada del horno alto se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria en estado de fusión de composición adecuada, procedente de la fusión de mineral de hierro en altos hornos y constituida al menos en dos tercios de su masa por escoria vítrea.

1.2.2.4. Puzolánico

Mezcla de clínker de Portland, yeso y puzolana (material silíceo que mezclado con cal y agua produce compuestos hidráulicos). Los materiales puzolánicos son sustancias naturales o industriales de composición silícea o silicoaluminosas, o bien una mezcla de ambas.

Estos materiales no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan a la temperatura ambiente, con el hidróxido de calcio disuelto y forman compuestos de silicato y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia. Estos compuestos son similares a los formados durante el endurecimiento de los materiales hidráulicos..

1.2.2.5. Especiales

Estos no son otros que los cementos de uso general a los cuales se les ha incorporado ciertas propiedades especiales que le agregan utilidad para determinadas aplicaciones particulares. Entre estos se puede mencionar los blancos, de alta resistencia inicial, altamente resistente a los sulfatos, moderadamente resistente a los sulfatos, de bajo calor de hidratación, resistente a la reacción álcali-agregado.

1.3. Características físicas y químicas del cemento Portland

El cemento tiene ciertas características físicas y químicas que permiten se realicen cambios en él, mejorando su rendimiento si se dan de la manera adecuada, ya que por lo contrario se pueden alterar dando como resultados cementos de baja calidad y poco resistentes. A continuación se explicarán brevemente algunas de ellas.

1.3.1. Características físicas de los cementos Portland

Las características físicas de los cementos Portland están íntimamente ligadas con su contextura, como su nombre hace referencia, su forma, tamaño, su manera de reaccionar y transformarse frente a estímulos de origen físico.

1.3.1.1. Finura de molido

Es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tiene lugar durante su fraguado y primer endurecimiento.

Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento hidratan solo en profundidades de 0.01 mm, por lo que, si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte.

Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que, en general, resulta perjudicial), el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado, y disminuye su resistencia a las aguas agresivas. Pero siendo así que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, se llega a una situación de compromiso: el cemento portland debe estar finamente molido, pero no en exceso. Lo deseable es que un cemento alcance sus debidas resistencias, a las distintas edades, más bien por razón de calidad de clínker que por razón de finura de molido. La nuevas normativas no incluyen prescripciones para finura de molido.

1.3.1.2. Tiempo de fraguado

Tiempo que tarda la pasta de cemento en adquirir rigidez, desde el inicio hasta el fin del fraguado. La velocidad de fraguado de un cemento viene limitada por las normas, estableciendo un período de tiempo, a partir del amasado, dentro del cual deben producirse, como se dijo ya, el inicio y el fin del fraguado. Ambos conceptos se definen de un modo convencional, mediante la aguja de Vicat, ya que el fraguado es un proceso continuo que inicia al amasar el cemento y se prolonga por el endurecimiento, sin solución de continuidad. Las penetraciones de la aguja de Vicat sobre una probeta de pasta normal de cemento, en función del tiempo, dan referencia del proceso de fraguado.

El límite inferior que marca la tabla II para el comienzo del fraguado es pequeño y puede resultar insuficiente para muchas obras de hormigón, en las que las distancias de transporte sean grandes. Debe comprobarse, en tales casos, que el principio de fraguado del cemento se aleja del mínimo admitido.

El fraguado es más corto y rápido en su comienzo cuanto más elevada es la finura del cemento. La meteorización de este (almacenamiento prolongado) aumenta la duración del fraguado.

La presencia de materia orgánica (que puede provenir del agua o de arena) retrasa el fraguado y puede llegar a inhibirlo. A menor cantidad de agua de amasado, así como a mayor sequedad del aire ambiente, corresponde un fraguado más corto.

Tabla II. **Tiempo de fraguado de acuerdo con la resistencia mecánica**

| Resistencia del cemento | Principio del Fraguado (min) | Final del fraguado (horas) |
|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Muy alta | >45 | <12 |
| Alta, Media y Baja | >60 | <12 |

Fuente: Universidad de Castilla- La Mancha.

http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Cementos_RC08.pdf. Consulta: 13 de septiembre de 2011.

1.3.1.3. Potencial de Hidrógeno

Es muy alcalino a causa de la presencia de portlandita. Desde el punto de vista de la durabilidad la portlandita, es la mayor contribuyente a la elevada alcalinidad o reserva alcalina del hormigón, manteniendo al material en la zona de pasivación del acero de las armaduras, lo que las protege de una posible oxidación.

“Al ser el producto hidratado de mayor solubilidad, actúa como una disolución amortiguadora del pH, impidiendo fenómenos de degradación, que se basan en una acidificación de la fase acuosa de los poros.”¹ (Massana, 2010, p.41). Por otro lado, hace al hormigón más vulnerable frente a compuestos ácidos y su mayor solubilidad posibilita una teórica disminución de la densidad del material, al encontrarse expuesto a fluidos.

¹ MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 41.

1.3.1.4. Expansión y retracción

Los ensayos de estabilidad de volumen tienen por objeto manifestar, a corto plazo, el riesgo de expansión tardía que puede tener un cemento fraguado debida a la hidratación de óxido de calcio y/o de óxido de magnesio libres. La retracción es debida al agua de amasado no combinada.

La retracción por secado es lo que la mayoría considera “la verdadera contracción”. Este tipo involucra el movimiento y pérdida de agua dentro de los poros extremadamente pequeños de la pasta hidratada de cemento y desde el interior de la estructura de los productos de hidratación o gel, que modifica el volumen en el concreto. La retracción por carbonatación ocurre debido a la reacción del cemento hidratado con el dióxido de carbono en el aire, en presencia de humedad.

1.3.1.5. Calor de hidratación

La propiedad de liga de las pastas de cemento se debe a la reacción química entre el cemento y el agua, llamado hidratación, la cual provoca una reacción exotérmica que produce calor.

El término hidratación es una descripción global de varios fenómenos a raíz de la reacción química del cemento Portland y agua. Esta reacción deriva la formación de una pasta de cemento hidratado creando masa sólida cohesiva y adherente, el elemento esencial del concreto.

Tabla III. **Propiedades que aportan los componentes del cemento**

| Propiedades | S₃C | S₂C | C₃A | C₄AF |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Velocidad de hidratación | Grande | Pequeño | Instantánea | Grande |
| Calor de hidratación | Grande | Pequeño | Grande | Pequeño |
| Resistencia mecánica | Grande y pronta | Grande y tardía | Escasa | Escasa |
| Resistencia química | Aceptable | Buena | Malísima | Buena |

Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de Morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 32.

1.3.1.6. Rigidez y resistencia mecánica

La pasta al fraguar adquiere rigidez y, con el tiempo, resistencia. La resistencia mecánica de un hormigón será tanto mayor cuanto mayor sea la del cemento empleado.

Pero esta característica no es la única que debe buscarse, ya que por sí sola no garantiza otras igual de necesarias, o quizás más como la durabilidad. Como resistencia de un cemento se entiende la de un mortero normalizado amasado con arena de características y granulometría determinadas y con relación agua/cemento establecida.

La tabla III describe cómo actúan algunas de las propiedades físicas del cemento de acuerdo con sus componentes químicos.

1.3.2. Características químicas de los cementos Portland

Las características químicas de los cementos Portland están íntimamente ligadas a las reacciones químicas que se crean al estar frente a estímulos de origen químico.

1.3.2.1. Componentes químicos del cemento Portland

Todos están compuestos de óxidos de silicio, aluminio y calcio y son los mostrados en la tabla IV.

- Silicato tricálcico (S_3C): aporta resistencia inicial.
- Silicato bicálcico (S_2C): aporta resistencia a largo plazo.
- Aluminato tricálcico (C_3A): aporta resistencia inicial. Acelera la velocidad de fraguado, mientras que el yeso controla su proceso de hidratación.
- Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF): acelera el fraguado. Los óxidos de hierro actúan como fundentes. Dan el color gris al cemento.

1.3.2.1. Productos de hidratación del cemento Portland

Al entrar en contacto con el agua, los componentes del cemento reaccionan (se hidratan), formando productos:

- Portlandita: cristales de hidróxido cálcico (cal libre) .Constituye entre el 20-25% del volumen de la pasta de cemento hidratado.

Apenas contribuye a la resistencia, debido a que su carácter enlazante es mínimo, por el mayor número de cristales. Desde el punto de vista de la durabilidad, la portlandita, es la mayor contribuyente a la elevada alcalinidad del hormigón, protegiendo al acero de una posible oxidación. Impide fenómenos de degradación por su solubilidad. Figura 1.

Tabla IV. **Principales compuestos químicos del cemento no hidratado**

| Compuesto | Fórmula | Abreviaturas | Porcentaje |
|--|--|-----------------------|------------|
| Silicato Tricálcico (alita) | 3CaOSiO_2 | S_3C | 40-60 |
| Silicato bicálcico (belita) | 2CaOSiO_3 | S_2C | 30-20 |
| Aluminato Tricálcico | $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ | C_3A | 7-14 |
| Ferroaluminato Tetracálcico (celita) | $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF | 5-12 |

Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 30.

- Geles tobermoríticos: estructuras laminares formadas por silicatos y aluminatos cálcicos hidratados (CSH). Entre las láminas se sitúan moléculas de agua que se polarizan. Es el componente mayoritario de la pasta de cemento hidratada, aproximadamente 50-60% del volumen total, y se considera el más importante por su aportación a las propiedades mecánicas de la pasta. Figura 2.

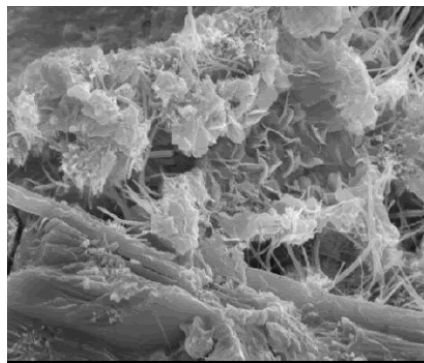
- Ettringita: cristales de sulfo-aluminato cálcico en forma de agujas (muy expansiva) . Estos compuestos constituyen un 15-20% del volumen de la pasta de cemento hidratado y, aunque contribuye en muy pequeña proporción a las resistencias del producto final, juega un papel muy importante en cuanto a la durabilidad en medios sulfatados. Figura 3.

Figura 1. **Portlandita**



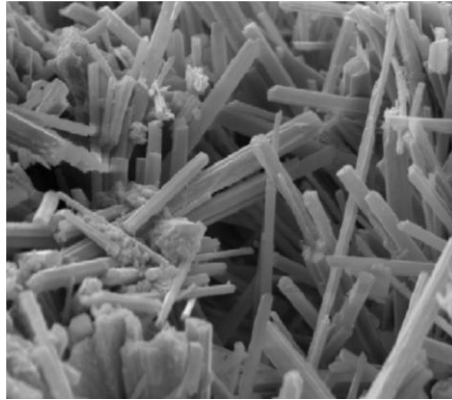
Fuente: BARLUENGA BADIOLA, G. Tema 3. Cementos. p. 14.

Figura 2. **Geles C-S-H**



Fuente: BARLUENGA BADIOLA, G. Tema 3. Cementos. p. 14.

Figura 3. **Ettringita**



Fuente: BARLUENGA BADIOLA, G. Tema 3: Cementos. p. 14.

1.3.3. Proceso de hidratación y fraguado del cemento

Uno de los principales procesos que sufre el cemento en contacto con el agua son la hidratación y el fraguado. De la correcta reacción entre los componentes depende si su resistencia alcanzará los valores esperados.

1.3.3.1. Hidratación

Para producir las reacciones químicas que provocan el endurecimiento del cemento es necesario añadir agua. Este proceso se define como hidratación y los productos que se forman, son productos de hidratación. “El cemento es un sistema químico de componentes anhidro inestables, que al combinarse con agua forman compuestos hidratados estables que tienen la propiedad de adherirse a los granos de áridos, formando una red resistente.”²

² MASSANA GUITART, D. Jordi. Durabilidad de morteros de cemento en contacto con purines de cerdo. p. 35.

1.3.3.2. Fraguado

Cuando el cemento y el agua entran en contacto, se inicia una reacción química exotérmica que determina el paulatino endurecimiento de la mezcla. Dentro del proceso general de endurecimiento se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se vuelve difícil de manejar; tal estado corresponde al fraguado inicial de la mezcla. A medida que se produce el endurecimiento normal de la mezcla, se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor muy apreciable; este estado se denomina fraguado final.

1.4. ¿Qué es una adición del cemento Portland?

Las adiciones han sido usadas desde hace un tiempo para mejorar las características tanto físicas como químicas de los cementos; a continuación se hará una breve explicación de ellas.

1.4.1. Definición de adición

Compuestos orgánicos o inorgánicos que modifican las propiedades de los materiales conglomerados en estado endurecido. Pueden estar incorporadas al cemento (inorgánicas). Las adiciones pueden ser activas, cuando reaccionan con los productos de hidratación del Clínter, variando la resistencia, o inactivas, que no aportan resistencia. “Si tienen una elevada finura, mejoran la homogeneidad”.³

³ BARLUENGA BADIOLA, Gonzalo. Tema 3: Cementos. p. 3.

Se debe tener claro que al hablar de adición y aditivo no se refiere a lo mismo. Como ya se dijo, la adición se refiere a materiales orgánicos o inorgánicos que modifican propiedades de los conglomerantes desde la homogeneización de la materia prima y sus productos de hidratación, mientras que los aditivos son sustancias químicas agregadas para modificar propiedades después de su proceso de fabricación.

1.4.2. Adiciones de los cementos Portland

Se ha hablado últimamente de los materiales cementicios suplementarios, llamados también adiciones minerales que contribuyen al endurecimiento del concreto a través de actividad hidráulica o puzolánica. Ejemplos típicos pueden ser la ceniza volante, escoria de alto horno y humo de sílice, los cuales pueden ser usados individualmente o combinados en cementos portland o mezclas de cemento. Estos materiales reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio, liberado en la hidratación del cemento portland, para formar los componentes de este.

A menudo son agregados al concreto para hacer las mezclas más económicas, reduciendo la impermeabilidad, incrementando la resistencia o modificando otras propiedades. Las más usadas son:

- Filler calizo
- Cenizas volantes
- Escorias
- Puzolanas
- Humo de sílice o microsílíce

1.4.2.1. Cenizas volantes

Se obtienen por precipitación de cenizas de hornos alimentados con carbón pulverizado. Se distinguen dos tipos:

- Ceniza volante sílicea (V): es una puzolana industrial en forma de polvo fino constituido de sílice reactivo y alúminas partículas esféricas. (Se utilizan en la fabricación de cementos SR y MR.
- Ceniza volante calcárea (W): es un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas o puzolánicas. Consta esencialmente de CaO reactivo, sílice reactivo y alúmina.

1.4.2.2. Humo de sílice

Es un subproducto de la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos eléctricos de arco, para la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio.

Está constituido por partículas muy pequeñas con alto contenido de sílice amorfa (es muy reactivo). Reacciona con la portlandita produciendo geles tobermoríticos (C-S-H). Se utiliza en la fabricación de cementos SR y MR y en hormigones de altas prestaciones (HAP). Densifica la matriz de cemento (fuerte aumento de resistencia) y reduce la permeabilidad (HAP).

En general, es bien conocido que la incorporación de escorias, puzolanas y otros materiales, modifican la estructura de los poros y asimismo, la permeabilidad del cemento. En términos generales, se reduce la absorción capilar y se incrementa la resistencia a la penetración de cloruros.

Sin embargo, es necesaria una adición de buena calidad y en proporción óptima para obtener estas características.

1.4.2.3. Escoria granulada de horno alto

Se obtiene por enfriamiento rápido en estado de fusión del mineral de hierro en un horno alto. Aunque su composición es variable, al menos dos tercios de su suma debe estar constituida por la suma de óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y dióxido de silicio (SiO₂) el resto contiene óxido de aluminio (Al₂O₃) y otros compuestos. Las escorias de horno alto tienen capacidad hidráulica latente o potencial. Si estas se mezclan simplemente con agua, se recubren de una delgada capa protectora empobrecida en Ca⁺². En medios alcalinos (como los que se dan en medios cementantes) la reacción de hidratación continúa procediendo lentamente.

1.4.2.4. Puzolanas

Las puzolanas naturales son sustancias de composición silíceas y/o silico-aluminosas, de origen volcánico o sedimentario, con una composición química y mineralógica adecuadas. Las puzolanas naturales calcinadas son materiales del mismo origen pero activados térmicamente. Están compuestas esencialmente por dióxido de silicio reactivo (SiO₂) y óxido de aluminio (Al₂O₃), además de óxido de hierro (Fe₂O₃) y otros óxidos.

Los materiales puzolánicos no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos reaccionan con la portlandita formada en el proceso de hidratación del cemento Portland, dando como resultado final compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio.

De este modo, este tipo de cementos compuestos dispone de una menor reserva de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), presentando como contrapartida mayores proporciones de gel C-S-H que el cemento portland sin adiciones, proporcionándole, de esta manera, una mayor resistencia mecánica y una buena durabilidad frente a algunos ambientes agresivos.

1.4.2.5. Esquisto calcinado

Contiene fases del clínker, principalmente silicato bicálcico y aluminato monocálcico (hidráulico y puzolánico). El esquisto calcinado, particularmente el bituminoso, se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800°C.

Debido a la composición del material natural y al proceso de producción, el esquisto calcinado contiene fases de clínker y proporciones mayores de óxidos puzolánicamente reactivos. En consecuencia, en estado finamente molido, el esquisto calcinado presenta propiedades hidráulicas como las del cemento portland, así como propiedades puzolánicas.

1.4.2.6. Caliza

A diferencia del resto de adiciones comentadas, que pueden ser consideradas como activas, el filler calizo es químicamente inerte. Es un material de naturaleza inorgánica y origen mineral compuesto principalmente por carbonato cálcico (al menos el 75%) y con un contenido en arcilla menor al 1,2%. Puede utilizarse para aumentar la cantidad de finos (polvo), de la fracción menor de 0.125 mm, por ejemplo en hormigones autocompactantes.

Debido a que el fino que se elimina en las canteras durante la fabricación de áridos calizos triturados, es un residuo de difícil colocación que suele ir a vertederos inertes, así es la adición de menor coste y con cuya recuperación se hace la fabricación de hormigón más sostenible. Como se trata de un inerte, no tiene reacción hidráulica, pero aumenta la cohesividad necesaria para estos hormigones, disminuye la retracción química, y aumenta la durabilidad.

En general, en el campo del prefabricado y donde la demanda de resistencia inicial sea elevada, la adición más recomendada es el filler calizo. Sus prestaciones de resistencia inicial elevada lo hacen adecuado para la elaboración de hormigón, tanto en masa como armado, cuando se requiera un desencofrado rápido. También se utiliza para prefabricados ligeros, piezas de hormigón visto o arquitectónico y la elaboración de morteros preparados.

1.5. Proceso de fabricación del cemento portland

El proceso de fabricación del cemento se puede resumir en cinco subprocesos, que básicamente son los siguientes:

- Obtención y preparación de materias primas
- Homogeneización y molienda de crudo
- Precalentador de ciclones
- Fabricación de clínker
- Molienda de clínker

1.5.1. Obtención y preparación de materias primas

El proceso de fabricación del cemento comienza con la extracción de las materias primas que se encuentran en yacimientos. Las canteras se explotan mediante voladuras controladas, en el caso de materiales duros como caliza y pizarras, mientras que en el caso de materiales blandos, como arcillas y margas, se utilizan excavadoras para su extracción.

Una vez extraído y clasificado el material, se procede a su trituración hasta obtener una granulometría adecuada para el producto de molienda y se traslada a la fábrica, para su almacenamiento antes de la homogeneización.

1.5.2. Homogeneización y molienda del crudo

El material es almacenado en capas uniformes para ser posteriormente seleccionadas de forma controlada.

La prehomogeneización permite preparar la dosificación adecuada de los diferentes componentes reduciendo su variabilidad. Posteriormente, todos estos materiales son puestos en molinos verticales o de bolas, para reducir su tamaño y favorecer así su cocción en el horno. En el molino vertical se tritura el material a través de la presión que ejercen sus rodillos sobre una mesa giratoria. De allí en adelante, la materia prima se almacena en un silo para incrementar la uniformidad de la mezcla.

1.5.3. Precalentador de ciclones

Se distinguen cuatro tipos de procesos de fabricación, en función de cómo se procesa el material antes de la entrada en el horno de clínker: vía seca, vía semiseca, vía semihúmeda o vía húmeda. La alimentación al horno se realiza a través del precalentador de ciclones, que calienta la materia prima para facilitar su cocción. La harina o crudo (materia prima molida) se introduce por la parte superior de la torre y va descendiendo por ella. Mientras tanto, los gases provenientes del horno, que están a altas temperaturas, ascienden a contracorrientes, precalentando así el crudo que alcanza los 1000°C antes de entrar al horno.

1.5.4. Fabricación de clínker

A medida que la harina va avanzando en el interior del horno, mientras este rota, la temperatura va aumentando hasta alcanzar los 1,500 °C. A esta temperatura se producen reacciones químicas que dan lugar al conocido clínker. A la salida del horno, el clínker se introduce en el enfriador, que inyecta aire frío del exterior para reducir su temperatura de los 1,400°C a los 100°C.

El aire caliente generado en este dispositivo se introduce nuevamente en el horno para favorecer la combustión, mejorando así la eficiencia energética del proceso.

1.5.5. Molienda de clínker

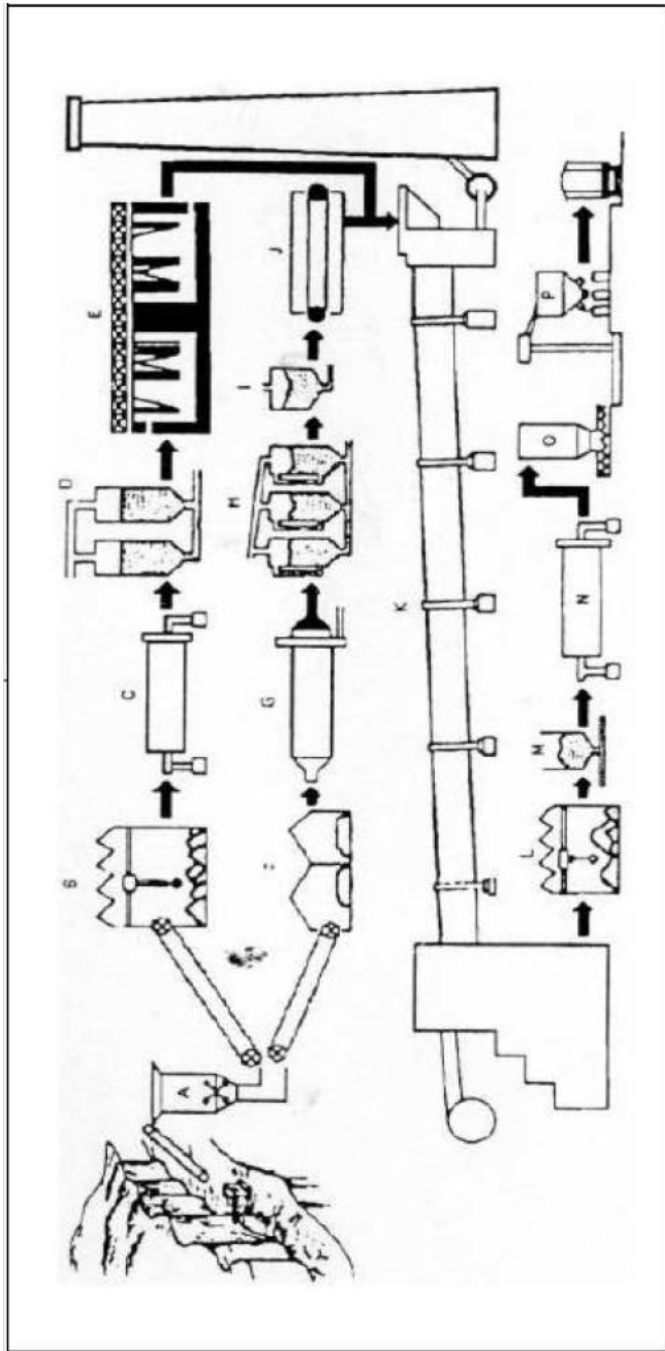
Con el clínker preparado, se mezcla con yeso y adiciones, en proporciones adecuadas, dentro de un molino de cemento. En su interior los materiales se muelen, se mezclan y homogeneizan.

Los molinos pueden ser de rodillos (horizontales y verticales) y de bolas. Este último consiste en un gran tubo que rota sobre sí mismo y que contiene bolas de acero en su interior. Gracias a la rotación del molino, las bolas colisionan entre sí, triturando el clínker y las adiciones, hasta lograr un polvo fino y homogéneo: el cemento.

Las distintas calidades del cemento se obtienen con la adición de materiales como escorias de alto horno, humo de sílice, puzolanas naturales, cenizas volantes y calizas ya mencionadas, que le permiten alcanzar determinadas características.

La figura 4 muestra el proceso para la fabricación del cemento en el siguiente orden: machacado, almacenamiento-humectación (proceso húmedo), pulverizado, dosificación, recipiente de almacenamiento de la mezcla pastosa, premezclado (proceso seco), pulverizado-secado, mezclado, granulación, secado, horno rotativo, escoria, aditivos, pulverizado, almacenamiento, embalado.

Figura 4. Proceso de fabricación del cemento I



Fuente: BARLUENGA BADIOLA, G. Tema 3: Cementos. p. 2.

1.5.6. Procesos de fabricación del clínker

Los procesos de fabricación del clínker pueden darse por las siguientes vías:

1.5.6.1. Proceso de vía seca

La materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverizada. El sistema del horno comprende una torre de ciclones para intercambio de calor en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno. El proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completado antes de la entrada del material en el horno, si se instala una cámara de combustión a la que se añade parte del combustible (precalcinador).

1.5.6.2. Proceso de vía húmeda

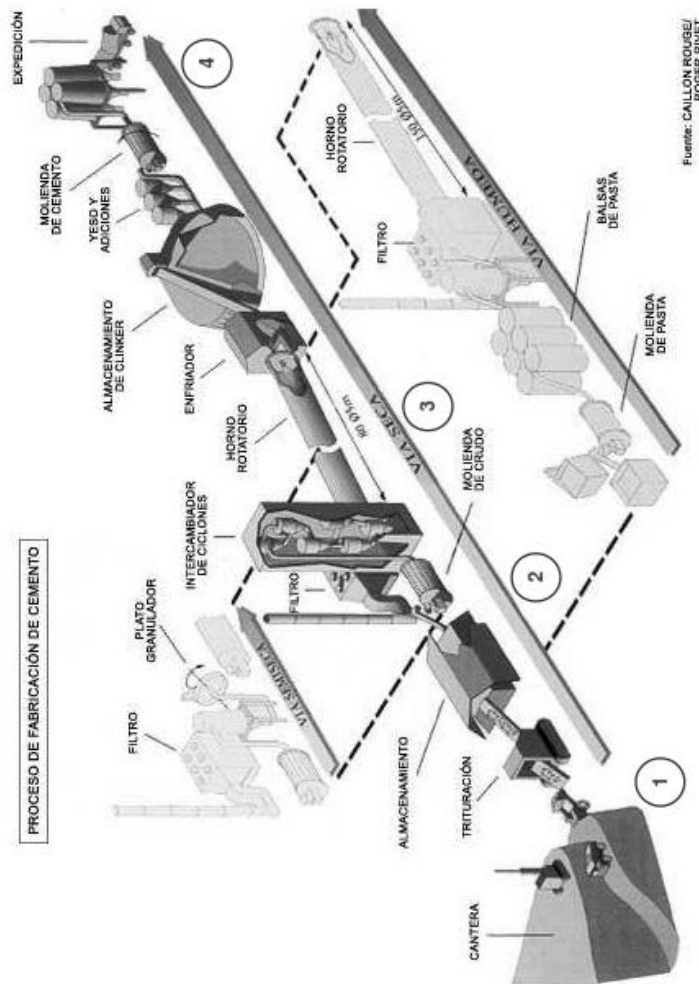
Este proceso es utilizado normalmente en aquellas materias primas de alto contenido en humedad. El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta con agua resultando una pasta con contenido de agua de un 30-40 % que es alimentada en extremo más elevado del horno de clínker.

1.5.6.3. Procesos de vía semiseca y semihúmeda

El material de alimentación se consigue añadiendo o eliminando agua respectivamente, al material obtenido en la molienda de crudo. Se obtienen "pellets" o gránulos con un 15-20 % de humedad, que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular gases calientes provenientes del horno. Cuando el material alcanza la entrada del horno, el agua se ha evaporado y la cocción ha comenzado.

En todos los casos, el material procesado en el horno rotatorio alcanza una temperatura entorno a los 1450°. Es enfriado bruscamente al abandonar el horno en enfriadores planetarios o de parrillas, obteniéndose de esta forma el clínker. La figura 5 muestra la manufactura del cemento con los diferentes procesos de fabricación del clínker.

Figura 5. Proceso de fabricación del cemento II



Fuente: CEMENTOS LAMONA. <http://www.lamona.biz/EL%20CEMENTO-1/historia%20del%20CEMENTO.pdf>. p. 3. Consulta: Septiembre 2010

