

APUNTE ELABORADO POR LA CÁTEDRA

CONSTRUCCIONES 2

Titular: Ing. Rudy O. Grether

PLAN DE ESTUDIOS 2007

UNIDAD N° 4

“AGLOMERANTES”

UNIDAD N° 4: AGLOMERANTES

En la construcción se emplean gran cantidad de materiales compuestos, cuyos componentes principales son partículas pétreas y aglomerantes que las mantienen unidas para un fin determinado.

Estos aglomerantes pueden ser clasificados como:

- Aglomerantes Cálcidos
 - Cales
 - Cementos
 - Yesos
- Aglomerantes No Cálcidos
 - Bituminosos
 - Resinas varias

CALES

Las cales son aglomerantes cálcidos y pueden clasificarse como:

- Aéreas
 - Cálcidas (OMg < 7%):
 - Grasas
 - Magras
 - Fuertes
 - Magnesianas (OMg > 7%)
- Hidráulicas
 - Cales débilmente hidráulicas
 - Cales propiamente hidráulicas
 - Cales normalmente hidráulicas
 - Cales fuertemente hidráulicas

CALES AÉREAS CÁLCICAS

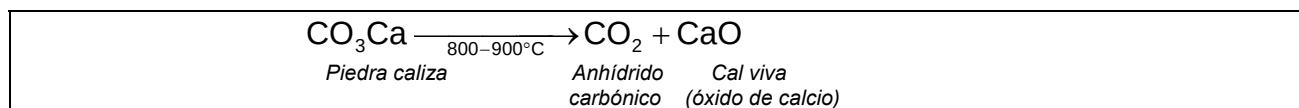
1) Proceso de fabricación

La fabricación de la cal comprende en síntesis, la extracción de la piedra caliza (CO_3Ca) del yacimiento a cielo abierto por el método de barrenado, la calcinación y el apagado.

Se procede a un machaqueo de la piedra caliza hasta lograr un tamaño máximo comprendido entre 15 y 20 cm y se procede a su calcinación en hornos verticales, en los que se introduce en forma alternada con el carbón combustible (coque). La producción es de aproximadamente 150 t/día de cal.

Otros hornos que se utilizan en la producción de cales son: intermitente de cuba y el criollo (no se utiliza en la actualidad).

El proceso químico de calcinación es el siguiente:

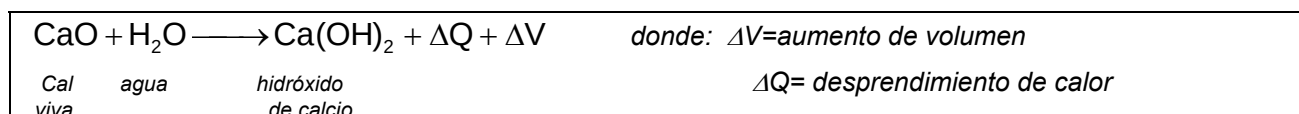


Cualquier otra sustancia que pueda contener la piedra caliza sería considerada una impureza.

El óxido de calcio (CaO) se denomina cal viva y de acuerdo al proceso a que se lo someta obtendremos:

- Cal viva en terrones.
- Cal viva molida

La cal aérea o grasa es un óxido de calcio "apagado" con agua. Por lo tanto es hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de acuerdo a la siguiente reacción química:



La primera reacción de hidrólisis del óxido de calcio cuando se mezcla con el agua no conduce a una acción aglomerante debido a que este óxido tiene demasiada energía libre y da lugar a una reacción demasiado rápida e incluso violenta, a la vez que se produce un aumento considerable de volumen (ΔV) y de calor (ΔQ) que llega incluso en ocasiones a vaporizar violentamente el agua. En conjunto el proceso resulta "expansivo" o destructivo, en lugar de aglomerante.

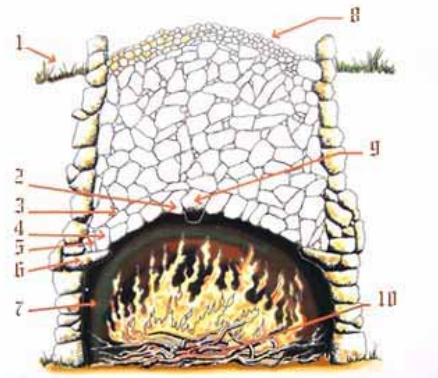
La operación de apagado se puede realizar por varios procedimientos:

- por simple extensión al aire, en cuyo caso se requieren varios meses y una pérdida muy importante por carbonatación.
- por inmersión en agua un espacio corto de tiempo, alrededor de un minuto.
- apagado en obra, para pequeños volúmenes. Se fabrica un depósito llamado artesa o cachimbo, en donde se introduce la cal viva en terrones y unas tres veces su volumen en agua. El proceso de apagado dura aproximadamente 15 días.
- Apagado en fábricas, según los métodos Schaffer o Corson, de esta forma se obtiene la cal hidratada.

Cabe destacar que si la cal viva se tritura se obtiene cal viva molida que se apaga con agua pero a diferencia de la cal en terrones, su utilización es instantánea.



Horno para fabricación de cal

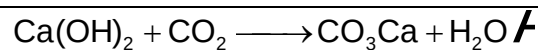


Horno de cal "criollo" (en desuso)

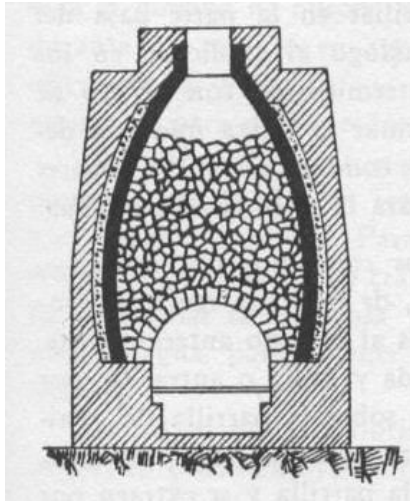
1.- Nivel del Suelo; 2.- Bóveda; 3.- Traspiques; 4.- Encañaderas; 5.- Calzos; 6.- Repisa o aparador; 7.- Caldera; 8.- Reblo: Montón de piedras, pequeñas, cuyo fin era guardar el calor; 9.- Cuño: Era la piedra que cerraba la bóveda. La piedra "clave"; 10.- Cepas de Brezo: Jara.

La característica fundamental de las cales grasas es la ausencia de fraguado y de endurecimiento hidráulico.

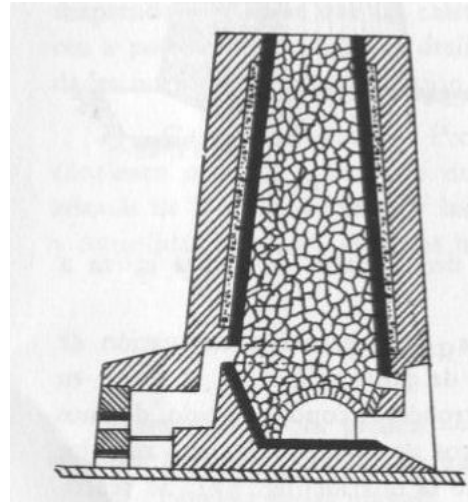
El endurecimiento total en el aire se produce a largo plazo, unos seis meses, tiempo necesario para que el anhídrido carbónico de la atmósfera penetre en su interior de modo que el endurecimiento transcurre del exterior al interior de la masa del mortero. En consecuencia, el empleo presenta dificultades en lugares poco aireados por falta de anhídrido carbónico. La reacción involucrada en este proceso es la siguiente:



Hidróxido de calcio	Anhídrido carbónico	Piedra caliza	agua (se evapora)
------------------------	------------------------	------------------	----------------------



Calcinación en hornos intermitentes.- Son unas construcciones generalmente de ladrillo, en las que se consideran tres regiones: el hogar, el vientre y la chimenea o tragante. Tienen unos cinco metros de altura y sección circular, la horizontal y la vertical, en forma ovalada. Se forma una bóveda con las piedras más gruesas, en el hogar, y el resto se llena con piedra caliza triturada. El combustible suele ser la leña o turba, durante la calcinación de tres a cuatro días, según su capacidad. La calcinación se da por terminada cuando se produce un asiento en la masa de 1/5.



Hornos continuos por capas.- Formados también por dos troncos de cono, de palastro, revestidos interiormente con ladrillo refractario. Se carga por el tragante con caliza machacada y hulla o antracita, por capas alternadas, descansando toda la masa sobre la parrilla del cenicero, y la cal, por una puerta lateral situada sobre la parrilla. A medida que la cal viva desciende, se echan nuevas capas por el tragante, siendo, por lo tanto la fabricación continua.

2) Aplicaciones

El empleo de la cal grasa es fundamentalmente el de morteros, enlucidos, revoques y trabajos de albañilería. La cal de elevada pureza ha sido empleada tradicionalmente como blanqueante eficaz y económico. La cal de inferior calidad se emplea para trabajos toscos y en morteros de relleno.

Cuando se emplea cal recientemente apagada en la misma obra, es muy difícil evitar los riesgos de tener núcleos de cal viva (óxido de calcio expansivo) que se apagan en forma lenta, produciendo los clásicos reventones en los revoques.

Los morteros de cal se transforman en morteros mixtos con una adición de cemento portland, con objeto de darles mayor resistencia y evitar los problemas de fisuración por heladas, ya que en los morteros de cal el agua es retenida durante largo plazo en forma de agua libre debido a la inexistencia de sustancias capaces de absorberla.

Otras aplicaciones de la cal son:

- Hormigones pobres (Para cimentaciones de muros, contrapisos, relleno)
- Estabilización de suelos.
- Pinturas al agua (son a base de cal)
- Potabilización de agua.

CALES HIDRAULICAS

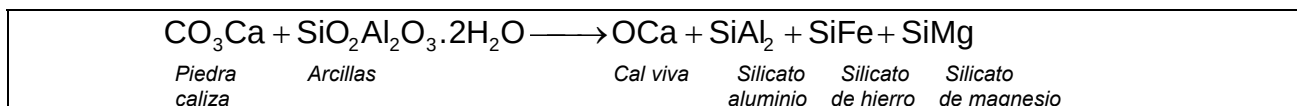
Se entiende por cal hidráulica una mezcla calcinada de caliza (CaO_3) y arcilla (silicato de alúmina hidratado, $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) en la que el contenido de arcilla oscila entre un 10 y un 20 %. La mezcla puede ser artificial o natural. En este último caso se puede partir de un material sedimentario o metamórfico que posea una composición de óxidos SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , por ejemplo las piedras margas.

1) Obtención industrial

El sistema de obtención industrial de estos materiales es el mismo que hemos indicado al hablar de cales grasas.

Los crudos mencionados anteriormente son calcinados a una temperatura comprendida entre 1100 y 1250°C, es decir, antes de alcanzar la llamada temperatura de clinkerización para una mezcla de esta composición.

El producto calcinado así obtenido contiene silicatos, aluminatos formados por la reacción de los óxidos en estado sólido y un exceso de CaO libre:



Por las mismas razones expuestas al explicar la cal aérea, este óxido de calcio libre debe ser, previamente a su empleo como aglomerante, transformado en hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para evitar así su expansión en la hidrólisis.

Este apagado del CaO libre debe ser en este caso "selectivo", es decir, debe hidratarse todo el CaO, evitando en lo posible aquellos silicatos y aluminatos que son los que le confieren su valor hidráulico en mayor o menor intensidad.

Un procedimiento continuo y selectivo consiste en apagar la cal dentro de un cilindro rotativo de unos 2 a 2,5 m de diámetro y de unos 20 m de longitud. Se consigue así reducir la cantidad de agua necesaria en un 20 %, pero requiere dejar reposar el producto antes de su empleo con el objeto de asegurar el apagado completo de la cal en el interior de los nódulos de mayor tamaño.

Finalmente es molturado a una finura conveniente para su empleo.

2) Clasificación de cales hidráulicas:

La clasificación de este tipo de cales fue efectuada de acuerdo con sus propiedades hidráulicas y estas dependen del contenido de arcilla y también de la temperatura de calcinación.

Se ha medido el grado de hidraulicidad mediante un índice establecido, lógicamente, de la siguiente forma: dado que los silicatos, aluminatos y ferritos contenidos en estas cales son los que le confieren el carácter hidráulico, la relación de sus óxidos ácidos a sus óxidos básicos son una medida de este carácter.

$$i = \frac{\text{SiO}_2\% + \text{Al}_2\text{O}_3\% + \text{Fe}_2\text{O}_3\% (\text{arcilla})}{\text{CaO}\% + \text{MgO}\% (\text{caliza})}$$

Este índice es teórico, ya que influyen otras variables sobre el poder hidráulico, tales como la composición, la temperatura de calcinación, las condiciones de apagado selectivo, etc. No obstante, es un medio útil para conocer la clasificación e identificación previa de estos materiales.

Las cales hidráulicas, según el índice de hidraulicidad (i), se clasifican así:

Cales débilmente hidráulicas	entre 0,1 y 0,16
Cales propiamente hidráulicas	entre 0,16 y 0,31
Cales normalmente hidráulicas	entre 0,31 y 0,42
Cales fuertemente hidráulicas	más de 0,42

3) Características y aplicaciones

La propiedad fundamental de estos materiales es la capacidad de fraguado en el seno del agua y las propiedades complementarias son las mismas que tienen las cales grasas. Por tanto, los criterios para su aplicación son los mismos, así como su comportamiento.

Ya hemos indicado que para conseguir un fraguado en los morteros de cal es más práctico recurrir a los "morteros mixtos" con adición de cemento portland y con todas las ventajas que supone su dosificación, la regulación de las resistencias convenientes a su aplicación, su resistencia a las heladas, etc.

YESOS

1) Materias primas:

La materia prima para la fabricación del aglomerante “yeso” es el sulfato cálcico dihidratado ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) también llamado piedra de yeso o algez. Aunque escaso existe también yeso en forma de sulfato cálcico anhidro (SO_4Ca) que se conoce con el nombre de anhidrita.

El yeso natural tiene una dureza de 2 en la escala de Mohs, y es por tanto muy blando.

Cualquiera de estas formas es adecuada para obtener yeso aglomerante, siendo la única limitación su pureza, la cual debe estar cerca de un 90%.

2) Proceso de fabricación:

El mineral se extrae del yacimiento por medio del método de barrenado.

El material obtenido de esta forma debe ser triturado hasta obtener partículas de un tamaño máximo de 2,5 cm.

La cocción se realiza en hornos verticales o rotatorios.

Los hornos verticales son recipientes cilíndricos dispuestos encima de un hogar de combustión. Los gases rodean exteriormente las paredes laterales del cilindro que está provisto de palas agitadoras y en cuyo interior contiene el yeso.

La capacidad de producción oscila entre unas 50 tn/día y 200 tn/día, según la envergadura de la instalación.

El yeso obtenido en hornos pequeños tiene mayor contenido de material recocido y en consecuencia se necesita almacenarlo durante varios días en grandes silos para conseguir un yeso de calidad constante, mientras que para el que se obtiene en instalaciones mayores puede no ser tan necesario.

El horno rotatorio de producción continua se presenta en dos tipos distintos: de combustión externa, o sea que los gases de combustión no se mezclan con el yeso, o bien de combustión interna y con circulación de gases en el mismo sentido de avance del material.

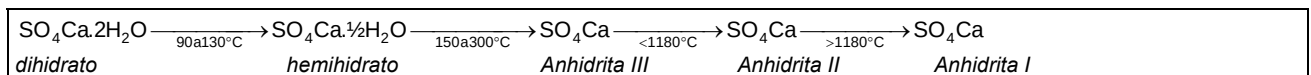
La capacidad puede ser de aproximadamente 400 a 500 tn/día y el producto obtenido requiere un tiempo de reposo en silos grandes antes de su aplicación con el objeto de uniformar su calidad.

El yeso blanco se obtiene por mezcla de yeso hemihidrato y yeso calcinado a mayor temperatura hasta la fase anhidra. La obtención de ambos productos se consigue en dos instalaciones distintas.

Actualmente se tiende a simplificar estas instalaciones empleando un horno único. Para ello se recurre a un tipo de horno rotatorio con doble salida: una inicial para el material de tamaño más fino con menor recorrido y tiempo de exposición (hemihidrato) y otra para el producto sobrecocido. La mezcla dosificada de ambos pasa a los molinos para obtener el producto final. Análogamente, se requiere reposar el material en silos con el fin de homogeneización.

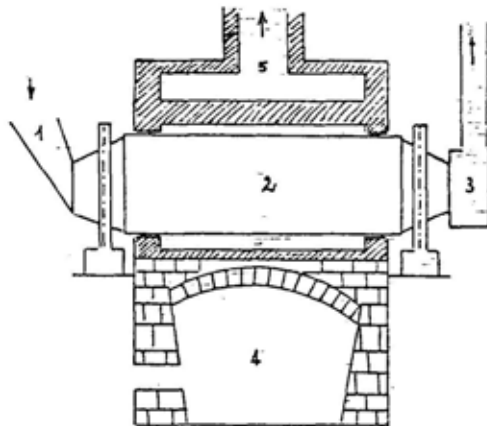
Transformaciones químicas en el proceso de fabricación:

Un esquema muy simple de las transformaciones del dihidrato, puede ser el siguiente:

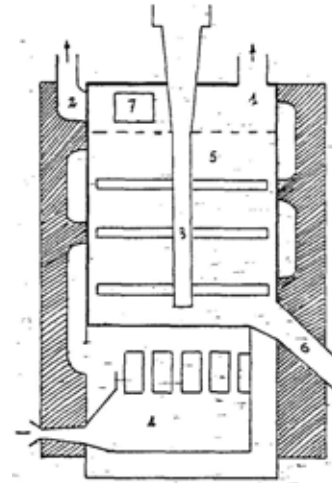


El yeso hemihidrato es el yeso común utilizado en la construcción en sus dos variedades blanco y negro.

La anhidrita III soluble, obtenida por deshidratación en atmósfera libre a temperaturas entre 150 y 300 °C, es un producto inestable que absorbe agua del ambiente con gran rapidez transformándose en hemihidrato. Mezclada con agua da un fraguado muy rápido.



Horno horizontal giratorio
1. Entrada de yeso dihidratado / 2. Marmitta / 3. Salida de vapor / 4. Hogar a fuel-oil / 5. Salida de gases de combustión



Horno vertical

La anhidrita II soluble, obtenida por deshidratación de hemihidratos a temperaturas superiores a los 300 °C, reacciona con el agua muy lentamente.

Finalmente, la anhidrita III obtenida por calcinación a alta temperatura da un producto que posee la capacidad de fraguar en el aire al cabo de varias horas dependiendo del eventual contenido de óxido cálcico procedente de la descarbonatación a la temperatura de los 900 °C y de las impurezas del carbonato de calcio que acompaña al yeso y cuyo hidróxido actúa como acelerante de fraguado. Este tipo de yeso se denomina hidráulico porque experimenta un fraguado bajo agua.

La hidratación de la fase hemidrato es la reacción más importante en el yeso aglomerante y la que le confiere fundamentalmente sus cualidades técnicas.

La presencia de una importante cantidad de yeso dihidrato actúa prácticamente como una carga inactiva disminuyendo las resistencias. La presencia en cambio, de las anhidritas en cantidad notable, mejora las cualidades técnicas del producto terminado.

3) Principales factores que condicionan la calidad de los yesos aglomerantes

La calidad de los yesos aglomerantes puede valorarse teniendo en cuenta las siguientes características:

Tiempo de utilización y de fraguado:

Respecto del tiempo de utilización interesa que sea lo más dilatado posible, sin que deteriore las restantes cualidades, con objeto de facilitar su puesta en obra. En la siguiente tabla se expresan los tiempos de utilización de algunos yesos de uso común:

	Hemihidrato	Yeso blanco	Yeso con retardante	Yeso con retardantes y plastificantes
Duración en min.	3 a 5	5 a 7	7 a 12	hasta 60 min.

Estos tiempos de empleo en la práctica pueden aplazarse mediante un "rebatido" de la masa yeso-agua antes de su fraguado inicial, pero es a costa de romper estructuras cristalinas ya formadas lo que produce un descenso de resistencias.

La relación agua-yeso varía para cada yeso pero oscila alrededor de un valor de 0,5.

Los tiempos de fraguado admisibles para cualquier tipo de yeso son los siguientes:

Inicial: entre 2 y 18 minutos.

Final: entre 6 y 90 minutos.

4) Tipos de yesos y sus empleos más destacados

A- Yeso de moldeo: Este material debe poseer las máximas cualidades y resistencia por ser el material que se requiere en la industria de yesos de moldeo y de prefabricados. Se diferencian por tener un grado de finura elevado.

Su principal aplicación es en molduras y para placas y tabiques prefabricados. Mezclado con vermiculitas o incluso con perlitas se obtienen elementos aislantes, con densidades aparentes que oscilan entre 0,6 y 1,2 gr/cm³.

B- Yeso de enlucir o Yeso blanco: Está constituido por dos componentes fundamentales: yeso hemihidrato y yeso sobrecocido, que está integrado por una mezcla de anhidritas III y II en la que predomina esta última. La anhidrita produce efectos importantes sobre la calidad tales como: evitar el descenso de resistencia a corto plazo del hemihidrato; absorber agua del medio ambiente que compensa la variación de volúmenes; aumentar la plasticidad y la elasticidad del yeso, etc., condiciones todas necesarias para su aplicación en revestimientos.

Las proporciones de hemihidrato y anhidrita varían según los distintos procedimientos de obtención.

Las aplicaciones generales de este tipo de yeso son revoques y ciellorrasos, en espesores de unos 10 a 15 mm. El empleo es muy amplio y así se usa sobre hormigón o construcciones metálicas.

5) Características tecnológicas del yeso.

Las características fundamentales del yeso, como material de construcción son su excelente adherencia a los materiales porosos, incluso sobre metales tales como el hierro, su fraguado rápido o modificable; sus propiedades aislantes térmicas, su menor capacidad calorífica; su acusticidad; su ligereza y su coste de obtención relativamente bajo.

Cabe destacar que la protección específica contra el fuego es debida a la asociación de tres cualidades: la porosidad; el contenido de agua de cristalización del orden del 20%, que, sumada al contenido de agua higroscópica, supone una capacidad de reacción endotérmica importante; y el alto punto de fusión del sulfato cálcico que se produce alrededor de los 1450°C.

CEMENTOS

Cemento portland. Proceso de Fabricación

La fabricación del cemento portland en nuestro país se inició en 1913 con la instalación de la primera fábrica de la Compañía Argentina de Cemento Portland (hoy Loma Negra) en la zona conocida como La Providencia (Sierras Bayas, Pcia. de Buenos Aires). La caliza arcillosa de esta zona presenta una composición aproximada a la del cemento portland).

Materias primas: El cemento portland se elabora a partir de una mezcla de materiales que aportan sus principales componentes: cal, sílice, alúmina y óxidos de hierro. La roca caliza, cuyo principal componente es CaCO₃, y la arcilla son las materias primas por excelencia. La primera aporta el CaO y la segunda la alúmina y los óxidos de hierro. También pueden utilizarse como materias primas: pizarra, creta, depósitos de conchillas y marga calcárea.

La marga es otra fuente importante de componente calcáreo, se trata de una roca sedimentaria originada por deposición simultánea de CaCO₃ y material arcilloso. Su color varía desde el amarillo hasta el gris oscuro. Las margas son una excelente materia prima para fabricar cemento pues contiene todos sus componentes. La arcilla está formada por hidrosilicatos de alúmina e hidróxido de hierro, que es el componente que le da color. Las impurezas no deseadas que se presentan en las materias primas son: dolomita (CaCO₃.MgCO₃), álcali (Na₂O y K₂O), pirita y marcasita (FeS₂) y en muy pequeñas proporciones óxido de manganeso (MnO₂) y titanio (TiO₂).

Además de los materiales naturales, se incorporan como agentes fundentes en el horno minerales y materiales ferrosos que permiten una menor temperatura de fusión de las materias primas. Las arenas son utilizadas para corregir el porcentaje de sílice en la mezcla.

Extracción y molienda de las materias primas: Las materias primas obtenidas de una cantera por voladura, se desmenuzan para su elaboración. La primera subdivisión de la piedra puede realizarse por diversos sistemas de presión (tritadoras de mandíbula, de cono o de cilindro) o de choque (tritadoras de martillo y

de impacto). El material triturado al pie de la cantera se almacena en silos. Seguidamente la materia prima es prehomogenizada.

Se vierten los materiales, en las proporciones correctas desde las tolvas de materia prima, en una tubería especialmente diseñada donde es secado por el flujo de aire caliente que transporta las partículas finas y deja caer las partículas gruesas en un molino de bolas, luego de molido el material es nuevamente seleccionado. Las partículas finas se conducen a un ciclón centrífugo donde son separadas del aire y transportadas a los silos de crudo. En los silos el material es nuevamente homogeneizado con aire a presión inyectado desde un cuadrante de la base mientras que los otros tres sirven de aireación. El aire a presión permite un movimiento ascendente de una columna de material y el material de las columnas lindantes se mueve lateralmente hacia el cuadrante aireado.

Cocción y molienda final: El material crudo finalmente ingresa al horno en su extremo más elevado. El horno es un cilindro de 2 a 6 m de diámetro y hasta 150 metros de longitud constituido por chapa de acero revestida interiormente con material refractario, el cual gira alrededor de su eje con una velocidad de 0.75 a 1.5 rpm. El eje tiene una leve inclinación (2 a 4%) con respecto a la horizontal. En el extremo opuesto al ingreso se sitúa el quemador que utiliza como combustible gas natural, fuel oil o carbón mineral. En los últimos años, se ha optado en el proceso por vía seca por hornos cortos precedidos por intercambiadores de calor por suspensión de crudo en los gases, constituidos por ciclones dispuestos en tramos.

El material avanza a lo largo del horno por efecto de la rotación y pendiente, encontrando zonas de temperaturas crecientes. Los procesos que tienen lugar en el horno son: evaporación, calcinación y clinkerización. En el primer tramo de los hornos largos o en los intercambiadores de calor se evapora el agua libre presente en la materia prima. Entre los 500 a 600 °C la arcilla pierde su agua de combinación y se activa. Luego comienza la disociación de los carbonatos en CaO, MgO y CO₂, a este proceso se lo conoce como "calcinación". Las materias primas se han disociado en sus óxidos básicos, los cuales seguidamente han de combinarse entre sí. A 1200 °C la ferrita se combina con los aluminatos de calcio dando lugar a una fase sólida que actúa como fundente. A mayores temperaturas, si el contenido de hierro en la materia prima es bajo, se formará el C₃A. La formación de los silicatos de calcio se produce entre los 1200 y 1600 °C, en el último tramo del horno que se denomina "zona de clinkerización". El producto final llamado clinker, tiene formas de esferas y se encuentra al rojo, debiendo ser enfriado inmediatamente para mantener los equilibrios alcanzados a altas temperaturas. El enfriamiento se realiza con aire frío en dispositivos de tambor rotatorio, planetario o de parrilla. El aire recogido se utiliza como aire de combustión. El clinker enfriado es de color gris oscuro y se deposita en un silo donde se estaciona durante 5 a 7 días hasta llegar a la temperatura ambiente.

Seguidamente el clinker es reducido a polvo mediante una molienda en molinos de bolas de circuito cerrado. Durante este proceso se incorpora piedra de yeso que modifica el fraguado del clinker, evitando el endurecimiento inmediato del material al ponerlo posteriormente en contacto con agua. El cemento molido se estaciona en silos hasta enfriarse y se embolsa en envases de 50 kg o se vende a granel.

Cemento portland. Composición

El clinker portland consta de cuatro componentes principales: el silicato tricálcico (C₃S), el silicato bicálcico (C₂S), el aluminato tricálcico (C₃A) y el ferroaluminato tetracálcico (C₄AF).

La alita (forma impura del C₃S) en el clinker portland, se presenta como cristales incoloros y opacos de sección prismática con contornos rectangulares o hexagonales de unos 50 µm aproximadamente. Esta fase es hidráulicamente activa, presentando una elevada velocidad de hidratación que determina la elevada resistencia inicial.

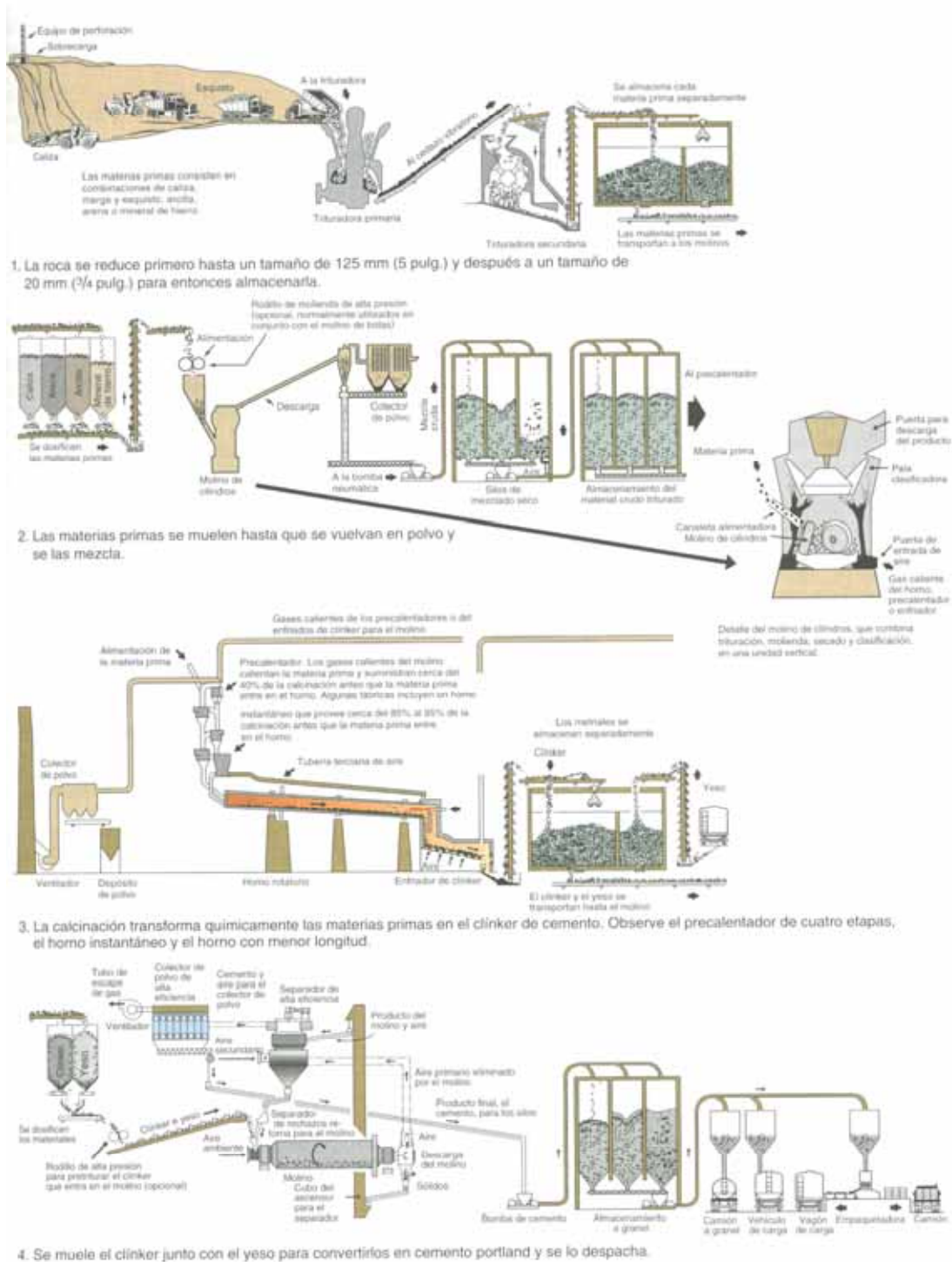
La fase belita (forma impura de C₂S) presenta cristales con un mayor brillo que los cristales de C₃S y poseen un tamaño en el orden de 30 µm, son de forma redondeada y estriados. La velocidad de reacción del C₂S es más lenta que el correspondiente al C₃S y confiere al cemento alta resistencia a largo plazo.

El material intersticial (celita) está compuesto por la fase C₄AF de cristales prismáticos bien formados, con tonos pardos y de gran poder reflector, y por la fase C₃A de color gris oscuro con forma rectangular, prismática y amorfa.

La fase C₄AF reacciona rápidamente con el agua y produce el fraguado (pasaje de estado fluido a sólido de la pasta) en pocos minutos.

El C_3A , reacciona inmediatamente con el agua y produce el fraguado instantáneo de la pasta, con una elevada liberación de calor. El fraguado instantáneo de este componente puede evitarse incorporando yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) que modifica las reacciones de hidratación.

Además de estos compuestos principales, el clinker portland posee eventualmente algunos constituyentes menores como son: el óxido de calcio libre, el óxido de magnesio, los óxidos alcalinos, el óxido de titanio, el óxido de manganeso y los cloruros. Algunos de los cuales pueden afectar adversamente la durabilidad del cemento portland.



*Etapas en la producción del cemento portland, a través del proceso seco
("Diseño y control de mezclas de concreto", PCA)*

Adiciones minerales al cemento portland

La inclusión de adiciones minerales durante la molienda con el clinker portland para obtener cementos mezclas, es una práctica que se realiza desde hace varios años por razones de índole tecnológicas. Algunas adiciones disminuyen el calor de hidratación, aumentan la resistencia frente al ataque por sulfatos, disminuyen la permeabilidad y los efectos adversos de la reacción álcali – agregado. Otras aumentan el grado de hidratación del cemento, incrementando la resistencia fundamentalmente a las primeras edades. En la actualidad, la producción de cementos mezclas también está asociada con la disminución de energía, con la conservación de recursos naturales y con el cuidado del medio ambiente.

Clasificación de las adiciones

Las adiciones que se incorporan al cemento portland, según su origen se pueden clasificar en naturales y artificiales. Las adiciones naturales pueden requerir diversos procesos para ser utilizadas, tales como: trituración, clasificación y separación en distintos tamaños de partículas y en algunos casos activación térmica. Por su parte, las adiciones artificiales provienen de desechos de otras industrias y pueden o no requerir un proceso posterior para ser utilizadas como adiciones minerales al cemento. Algunas adiciones son puzolánicas (hidráulicamente activas), otras cementantes (hidráulicamente latentes), también existen puzolánicas y cementantes o bien inertes (hidráulicamente inactivas).

Adiciones puzolánicas

Las adiciones puzolánicas son materiales silicoaluminosos que se presentan en forma amorfa o pobremente cristalina, molidos muy finos que, en presencia de humedad y a temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el Ca(OH)_2 liberado durante la hidratación de los silicatos, para formar compuestos con propiedades cementantes.

Entre las puzolanas Naturales pueden mencionarse las tobas volcánicas y las arcillas o pizarras calcinadas.

Las puzolanas Artificiales se obtienen como desechos de otras industrias. A veces requieren ser procesados -secados y pulverizados-. A este grupo pertenecen las cenizas volantes (resultantes de la combustión del carbón pulverizado en las usinas termoeléctricas), los humos de sílice (se obtiene en las industrias que elaboran metales silíceos o aleaciones ferro-silíceas) y las cenizas de cáscara de arroz.

Adiciones cementantes

El progreso de la hidratación del cemento portland con adiciones cementantes o hidráulicamente latentes, como la escoria granulada de alto horno, no se conoce con claridad. Los componentes del cemento se hidratan normalmente, y se ha comprobado que el CH proporciona una correcta alcalinidad para provocar el inicio de la hidratación de la escoria. Sin embargo, la hidratación posterior de la escoria es directa y no depende de la combinación con el CH.

Entre las adiciones cementantes podemos mencionar principalmente a las escorias:

Escoria granulada de alto horno (EGAH): Este desecho industrial surge en la reducción del mineral de hierro, cuando la escoria se enfría rápidamente.

Escoria de acero: La escoria de acerías un subproducto que se obtiene en la conversión del hierro al acero.

Escorias no ferrosas: se trata de escorias que se producen en la producción del metal de cobre, níquel y plomo.

Adiciones hidráulicamente inactivas (Fillers)

Los filler son materiales inorgánicos minerales, naturales o artificiales, especialmente seleccionados que, mediante adecuada preparación, teniendo en cuenta su distribución de tamaños de partícula, mejoran las propiedades físicas del cemento, tales como la trabajabilidad o la retención de agua y generalmente aceleran el proceso de hidratación.

La principal adición hidráulicamente inactiva utilizada en nuestro país es el filler calcáreo que está constituido por piedra caliza finamente molida.

Clasificación de los cementos

Hasta ahora hemos considerado al cemento Portland como material genérico. Sin embargo, cuando los cementos con diferentes composiciones químicas se hidratan, pueden tener propiedades distintas. Es posible, por lo tanto, seleccionar mezclas de materias primas para la producción de varios tipos de cementos, según las propiedades requeridas. De hecho, varios tipos de cementos Portland están disponibles comercialmente y además, pueden producirse cementos especiales para usos específicos.

En nuestro país se han clasificado en Cemento de uso general (IRAM 50000) y Cemento de características especiales (IRAM 50001). En esta clasificación se determinan distintas subclases según la composición, tal como se muestra en la tabla siguiente.

Cementos para uso general según la norma IRAM 50000

Tipo de cemento	Nomenclatura	Composición (g/100g)			
		Clinker + sulfato de calcio	Puzolana (P)	Escoria (E)	Filler calcáreo
Cemento Portland normal	CPN	100-90		0-10	
Cemento Portland con filler calcáreo	CPF	99-80			1-20
Cemento Portland con escoria	CPE	89-65		11-35	
Cemento Portland compuesto	CPC	98-65	Dos o más, con $P + E + F \leq 35$		
Cemento Portland puzolánico	CPP	85-50	15-50		
Cemento de alto horno	CAH	65-25		35-75	

Cementos para usos especiales según la norma IRAM 50001

Denominación	Nomenclatura
De alta resistencia inicial	ARI
Altamente resistente a los sulfatos	ARS
Moderadamente resistente a los sulfatos	MRS
De bajo calor de hidratación	BCH
Resistente a la reacción alcali-agregado	RRAA
Blanco	B

Cemento Portland de Alta Resistencia Inicial - ARI

Este cemento se utiliza cuando son requeridas altas resistencias a temprana edad. La resistencia a compresión que desarrollan a los tres días es del orden de la resistencia a los siete días del cemento portland normal para la misma razón agua/cemento. La mayor rapidez de adquisición de resistencia, se debe a la mayor finura del cemento ($450-500 \text{ m}^2/\text{kg}$) y en parte al mayor contenido de C_3S .

Su uso es apropiado para construcciones donde sea necesario remover los encofrados rápidamente. También es apropiado para hormigonar en climas fríos, debido a que el calor liberado por su hidratación permite el progreso de las reacciones. Por la misma causa no debe ser usado en el hormigonado de secciones mayores a 0.5 m pues puede causar la fisuración del hormigón por gradientes térmicos.

Cemento Portland Altamente Resistente a los Sulfatos y moderadamente resistentes a los sulfatos – ARS y MRS

Este cemento es utilizado en la fabricación de hormigones que puedan estar o estén en contacto con agua o suelos que contengan sulfatos. El ataque de sulfatos al hormigón involucra reacciones entre éstos iones y los hidratos del C_3A , que provocan la destrucción del hormigón.

El cemento moderadamente resistente a los sulfatos es apropiado para ser utilizado en estructuras en contacto con agua de mar o suelos con baja concentración de sulfato.

Cemento Portland de Bajo Calor de Hidratación - BCH

Este cemento es apropiado para ser utilizado en estructuras de volumen considerable. La elevación de la

temperatura en el interior de una gran masa de hormigón provocada por el calor liberado en la hidratación del cemento, puede ser causa de fisuración. A este cemento se le exige un calor de hidratación menor. Este cemento presenta un desarrollo de resistencia más lento que el cemento portland normal. Su resistencia final no se ve disminuida.

Cemento Portland Resistente a la Reacción Álcali-Agregado - RRAA

Este cemento sólo debe ser utilizado en el caso que formara parte de un hormigón cuyos agregados fueran potencialmente reactivos (IRAM 1512:2004) y la estructura estuviese en contacto con agua o suelos húmedos, especialmente en climas cálidos. La reacción expansiva entre el cemento y algunos agregados reactivos involucra a los álcalis contenidos en el cemento.

Cemento Portland Blanco - CB

El cemento portland blanco es el producto de la pulverización del clinker blanco. El clinker blanco se obtiene a partir de materias primas con bajo contenido de hierro en su composición: arcillas libres de hierro (caolinita) y rocas calizas sin impurezas. Este cemento presenta un contenido elevado de C_3A y bajo C_4AF . Su costo es muy elevado y con distintos óxidos este cemento puede colorearse.

Cemento de Albañilería

Es el producto obtenido por la pulverización conjunta del clinker portland, piedra caliza y aditivos químicos que mejoran la plasticidad y retención de agua, haciéndolos aptos para trabajos generales de albañilería. Este ligante fue concebido por una necesidad técnico-económica de la construcción. Las mezclas clásicas usadas para las construcciones de albañilería en base a cemento, cal apagada, polvo de ladrillo y arena presentan grandes variaciones en su composición y se requiere de un mayor tiempo para su confección. Este cemento presenta características intermedias entre la cal y el cemento portland y puede ser utilizado solamente agregando arena y agua.

Requisitos físicos exigidos a cementos para uso general según IRAM 50000

Requisito			Unidad	Min.	Máx.	Método de ensayo
Finura	Material retenido sobre el tamiz IRAM 75 μ m		g/100 g	-	15,0	IRAM 1621
	Superficie específica	Promedio	m^2 / kg	250,0	-	IRAM 1623
		Individual		225,0		
Constancia de volumen	Expansión en autoclave		%	-	1,0	IRAM 1620
Tiempo de fraguado	inicial		min	45	-	IRAM 1619
	final		h	-	10	
Contracción por secado (*)	a los 28 d de la lectura inicial		%	-	0,15	IRAM 1651-2
Requerimiento de agua, por ciento por masa de cemento (**)			g/100 g	-	64,0	

(*) Sólo se aplica para los cementos tipo CPP.

(**) Sólo se aplica para los cementos tipo CPP y CPC.

Requisitos mecánicos exigidos a cementos para uso general según IRAM 50000

Categoría	Resistencia a la compresión (MPa)				Método de ensayo
	2 d	7 d	28 d		
CP 30	-	mín. 16	mín. 30	máx. 50	IRAM 1622
CP 40	mín. 10	-	mín. 40	máx. 60	
CP 50	mín. 20	-	mín. 50	-	

Nota 3: En todo los casos, los valores de resistencia obtenidos a los 28 d deberán ser mayores que los obtenidos a los 2 d y a los 7 d.

Requisitos químicos exigidos a cementos para uso general según IRAM 50000

Característica	Tipo de cemento	Requisito	Unidad	Método de ensayo
Pérdida por calcinación (máximo)	CPN	4,0	g/100 g	IRAM 1504
	CPE			
	CPP			
	CAH			
	CPF	12,0		
	CPC	--		
Residuo insoluble (máximo)	CPN	2,0		
	CPE			
	CAH			
	CPF	5,0		
	CPC	--		
	CPP			
Trióxido de azufre (SO ₃) (máximo)	CPN	3,5		
	CPF			
	CPE			
	CPC			
	CPP			
	CAH			
Óxido de magnesio (MgO) (máximo)	CPN	5,0		
	CPP	6,0		
	CPF			
	CPE	--		
	CPC			
	CAH			
Cloruros (Cl) (máximo)	CPN	0,10		
	CPF			
	CPE			
	CPC			
	CPP			
	CAH			
Sulfuros (S ²⁻) (máximo)	CPN	0,10		
	CPF			
	CPP			
	CPE	0,50		
	CPC			
	CAH			
Coeficiente puzolánico	CPP	< 1,0	---	IRAM 1651-2

Propiedades físicas de los cementos portland

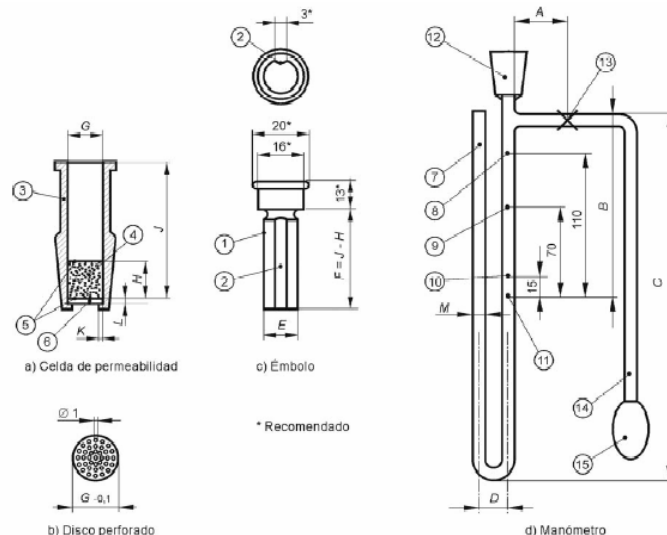
Finura

El término finura está referido al promedio del tamaño de partículas del cemento. Es una característica del cemento que cobra gran importancia debido a la influencia, favorable o desfavorable, que ejerce sobre ciertas propiedades del hormigón. Para un cemento de composición dada, una mayor finura del cemento confiere al hormigón un desarrollo de mayor resistencia a temprana edad, una menor exudación y contribuye a la trabajabilidad del mortero. Como contrapartida se tiene un mayor costo de molienda, una mayor contracción por secado, un aumento en el requerimiento de agua de la mezcla y un menor período de almacenamiento del cemento.

El tamaño de las partículas del cemento varía entre 1 y 200 µm. Existen varias formas de control de la finura del cemento. La norma IRAM 50000:2000 requiere que el 85% de las partículas sean menores a 75 µm para asegurar una adecuada hidratación. Para tal fin se determina el porcentaje retenido sobre el tamiz IRAM 75 µm (N°200) que originan 50 g de cemento, tamizados por vía húmeda y luego secado por calentamiento en estufa o placa calefactora (IRAM 1621:04). Si bien este ensayo puede servir como método de control, no da

una idea de la distribución de tamaños de las partículas.

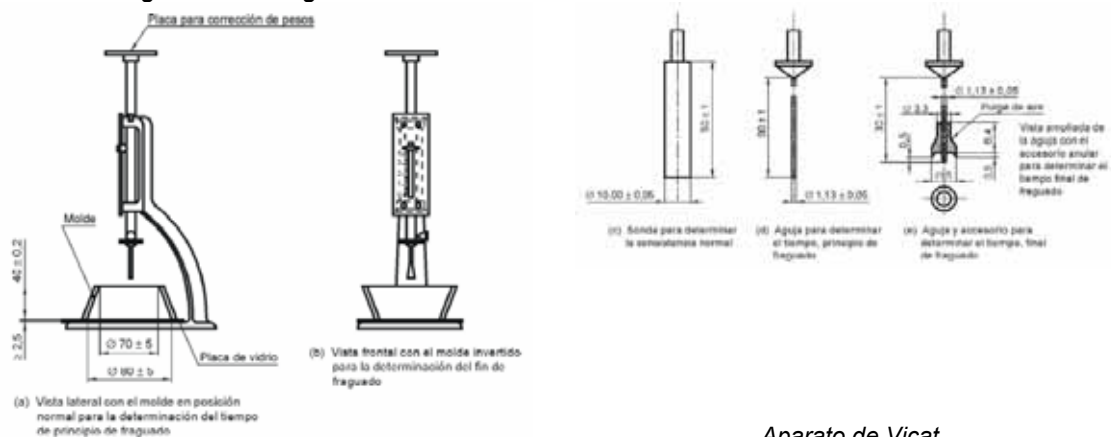
Otro método para medir la finura del cemento es por medio de su superficie específica. En nuestro país está normalizado el método de Blaine (IRAM 1623:04), que se basa en la relación existente entre la superficie específica de las partículas de una capa de cemento de porosidad establecida y la velocidad con que atraviesa el aire dicha capa.



Equipo para ensayo de finura Blaine

Consistencia Normal

Algunos de los requisitos de calidad que se establecen para el cemento portland, fraguado y expansión, son afectados por el contenido de agua de la pasta. Por esto se ha establecido, para estos ensayos una pasta de condiciones standard de humedad llamada "pasta de consistencia normal". El contenido de agua necesario para obtener esta consistencia, se determina (IRAM 1612:03) por un método de prueba y error. Se prepara una pasta mezclando 500 g de cemento y una cantidad de agua, se llena un molde troncocónico (diámetro 60 a 70 mm y altura 40 mm). El molde se centra bajo la varilla de 300 g del aparato de Vicat, cuya punta termina en una sonda de 10 mm de diámetro, y la varilla se deja caer lentamente. La pasta es de consistencia normal cuando la sonda penetra 10 ± 1 mm desde la superficie de la pasta en 30 segundos. La cantidad de agua requerida se informa respecto al peso de cemento seco. El rango usual está entre 22 y 25 % para los cementos portland, pudiendo ser mayor en los cementos portland puzolánicos (23 al 28 %). Este ensayo sólo cuantifica la plasticidad de la pasta de cemento, y por lo tanto no se correlaciona con el requerimiento de agua del hormigón confeccionado con el mismo cemento.



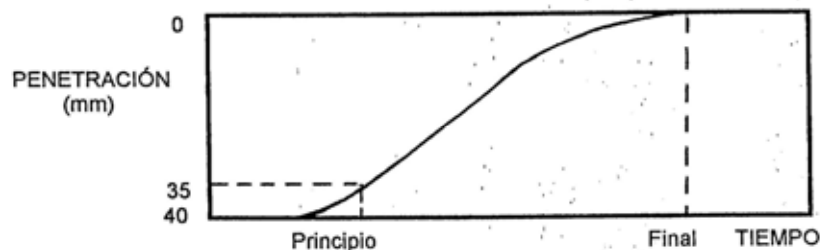
Aparato de Vicat

Fraguado del Cemento

La pasta de consistencia normal presenta una plasticidad considerable, la cual se mantiene durante el período latente de hidratación. Luego, la pasta comienza a tomar rigidez, hasta perder totalmente su plasticidad y convertirse en un sólido sin resistencia. Este proceso de endurecimiento es llamado fraguado, y se debe a las reacciones químicas del cemento con el agua ya discutidas. El fraguado no es un proceso de secado. La ganancia de resistencia tiene lugar después del fraguado, a medida que se van generando nuevos productos que reducen la porosidad del material.

En los cementos comúnmente se habla de fraguado inicial, comienzo de la rigidización, y de fraguado final, desaparición de la plasticidad. El tiempo de fraguado es usualmente determinado por la variación de la resistencia a la penetración de pequeñas agujas.

El ensayo normalizado por IRAM 1619:03 para determinar el tiempo de fraguado, utiliza el aparato de Vicat. La pasta de cemento de consistencia normal permanece plástica durante un cierto tiempo, a continuación aumenta su viscosidad rápidamente. Cuando la pasta ha espesado lo suficiente para que la aguja de Vicat penetre 35 mm a los 30 s de liberada, el fraguado inicial ha tenido lugar y se expresa como el tiempo transcurrido, en minutos, desde que se agrega el agua al cemento. El fraguado final tiene lugar cuando la aguja no produce impresión apreciable sobre ambas caras de la probeta y se expresa en horas. En la figura siguiente se representa la variación de la resistencia a la penetración de la aguja de Vicat a lo largo del tiempo, donde se definen los tiempos de fraguado.



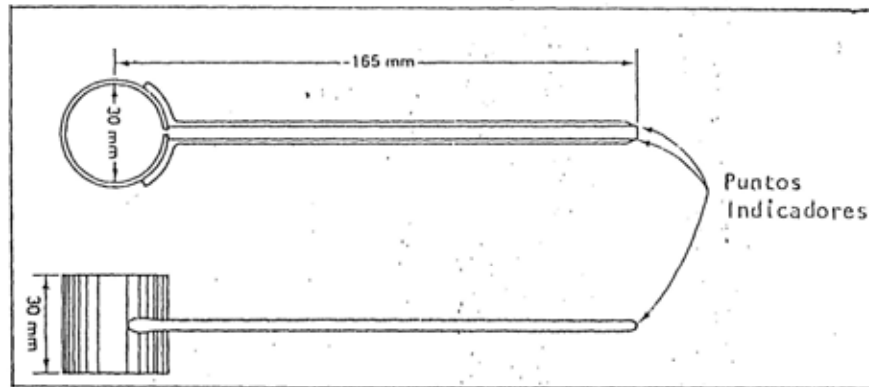
Resistencia a la penetración de una pasta de consistencia normal.

Estabilidad Dimensional

La pasta de cemento puede verse afectada por cambios excesivos de volumen que ocasionan su fisuración. La expansión puede ser causada por varios factores: inapropiada cantidad de yeso en el cemento, presencia de óxido de calcio libre, exceso de óxido de magnesio cristalizado en forma de periclase. La lenta hidratación de la cal libre y de la periclase está acompañada por un aumento de volumen que provoca la disgregación de la pasta, mortero u hormigón. Estas expansiones aparecen varios meses después de la hidratación del cemento, siendo necesario contar con un ensayo acelerado para probar la presencia de estos compuestos en el cemento antes de su utilización.

En Argentina se encuentra normalizado el ensayo de autoclave (IRAM 1620:03), donde la hidratación de la cal libre y la magnesia es acelerada por la alta temperatura del curado a vapor y la presión. Se utilizan barras prismáticas (25.4 x 25.4 x 254 mm) constituidas por pasta de consistencia normal, las cuales son curadas en un ambiente húmedo (100 % HR y 21 ± 1 °C) durante las primeras 24 horas. Luego se desmoldan, se mide su longitud y se colocan en el autoclave donde la presión de vapor se eleva a 2 ± 0.1 MPa en una hora. El volumen del autoclave, donde se colocan las probetas, es tal que la temperatura alcanza los 214 ± 2 °C. La presión se mantiene por espacio de tres horas y luego alcanza la presión normal en una hora. Se retiran las probetas se enfrían hasta temperatura ambiente y se mide su longitud final. La expansión no debe exceder 1 % para los cementos portland. El ensayo de autoclave es de gran aplicación en cementos portland.

El ensayo que es conveniente aplicar con estos cementos es el propuesto por Le Chatelier (BS-4550-III-3) cuyo instrumento se muestra en la figura siguiente. Se llena el cilindro de 30 mm de diámetro con pasta de consistencia normal, sellado se sumerge en agua a 20 °C durante 24 horas. Seguidamente, se toma la medida entre los puntos indicadores y se retorna al recipiente con agua en ebullición durante una hora. Luego se enfría y se mide la distancia entre los puntos indicadores. La diferencia entre lecturas es proporcional a la expansión y no debe exceder de 10 mm. Este ensayo sólo acusa la expansión provocada por la cal libre y debe ser aplicado a cementos portland con bajo contenido de magnesia.



Aparato de Le Chatelier par medir la sanidad de los cementos

Resistencia Mecánica

La capacidad del cemento de desarrollar resistencia es la propiedad que le ha permitido ser uno de los materiales de construcción más importante. El endurecimiento de la pasta de cemento es el resultado de la hidratación del mismo, el desarrollo de vínculos entre los productos de hidratación y la reducción gradual de la porosidad interna.

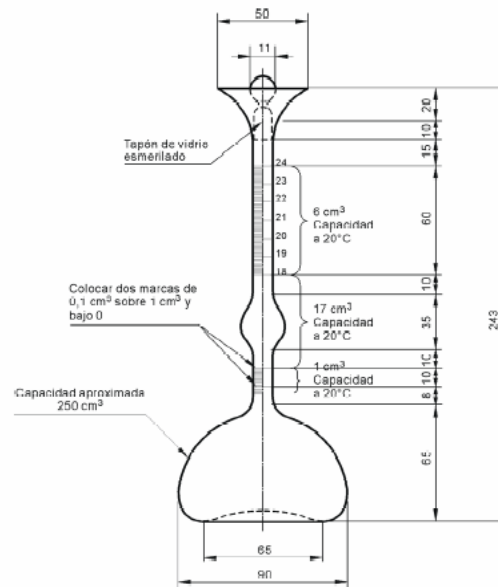
El ensayo de resistencia mecánica del cemento se efectúa sobre morteros. Sobre esta propiedad influyen la relación agua/cemento, razón cemento/agregado, tipo y graduación de la arena, forma de mezclado y llenado de moldes, condiciones de curado, humedad de la probeta a la edad de ensayo, condiciones de carga y por supuesto, la edad. Para acotar estas variables es necesario recurrir, a una normalización que permita valorar la resistencia de un cemento de una manera comparable y repetible. Los ensayos sobre pasta se han dejado de lado debido a las dificultades en el llenado del molde y en la ejecución del ensayo, que ocasiona grandes variaciones en los resultados.

El ensayo normalizado por la norma IRAM 1622:02 para determinar la resistencia utiliza probetas prismáticas (40 x 40 x 160 mm) sobre las que se determina primero la resistencia a flexión y luego la resistencia a compresión utilizando los dos trozos del prisma roto. El mortero de consistencia plástica esta formado por tres partes de arena normal (2.0 a 0.08 mm (IRAM 1633:61) y una parte de cemento en peso. La razón agua/cemento es 0,5 en peso. El mezclado se realiza en forma mecánica y la compactación en una mesa de caída libre. El curado se realiza durante las primeras veinticuatro horas en cámara húmeda ($HR \geq 90\%$ y $20 \pm 1^\circ C$), seguidamente se desmoldan los prismas y se sumergen en agua saturada de cal hasta la edad de ensayo. La resistencia a flexión se determina con carga centrada.

Otras propiedades de los cementos

Densidad Absoluta

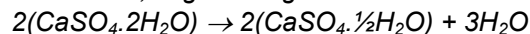
La densidad absoluta del cemento se determina utilizando el principio del volumen de líquido desplazado por un peso conocido de cemento (64 g) en el frasco de Le Chatelier (IRAM 1624:05). La densidad absoluta del cemento portland varía en el rango de 3.10 a 3.25 kg/m^3 , el valor de 3.15 es asumido para la dosificación del hormigón. En los cementos puzolánicos varía entre 2.60 y 3.00 kg/m^3 , dependiendo de la densidad de la adición utilizada y el porcentaje de mezcla. A fin de evitar la hidratación se emplea kerosene como líquido.



Volumenómetro de Le Chatelier para determinar la densidad del cemento.

Falso Fraguado

El falso fraguado se manifiesta por el desarrollo rápido y prematuro de rigidez en la pasta sin desprendimiento importante de calor. La rigidez puede ser superada y restituida la plasticidad de la pasta por un remezclado sin adición de agua. El falso fraguado ocurre por la deshidratación del yeso (CSH_2) durante su molienda conjunta con el clinker, según la siguiente reacción:



El hemihidrato es muy ávido de agua y al mezclar el cemento con agua vuelve a formarse yeso en forma de agujas que dan rigidez a la pasta de amasado. Cuando este fenómeno se presenta en la obra se debe remezclar el hormigón sin adición de agua. El método de ensayo para determinar su existencia (IRAM 1615:73) requiere preparar una pasta de consistencia dada (34 ± 4 mm) sobre la cual se determina la penetración inicial de la sonda a los 20 segundos de finalizado el mezclado y la penetración final a los 5 minutos. La penetración final debe ser mayor al 50% de la penetración inicial. Este requerimiento sólo se aplica cuando es especificado por el interesado.