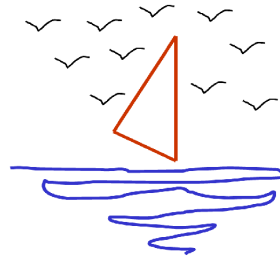


Presentaciones adaptadas al texto del libro:
“Temas de química (II) para alumnos de ITOP e ICCP”

Tema 13.- Conglomerantes



ROCÍO LAPUENTE ARAGÓ
Departamento de Ingeniería de la Construcción
 UNIVERSIDAD DE ALICANTE

CONGLOMERANTES.



yeso



cal



cemento



La hidratación se produce, una vez amasado, por la progresiva reacción con el agua

FRAGUADO

El proceso se caracteriza por una rápida solidificación de la pasta

y más lentamente
por una adquisición de resistencias mecánicas hasta alcanzar el carácter pétreo

ENDURECIMIENTO



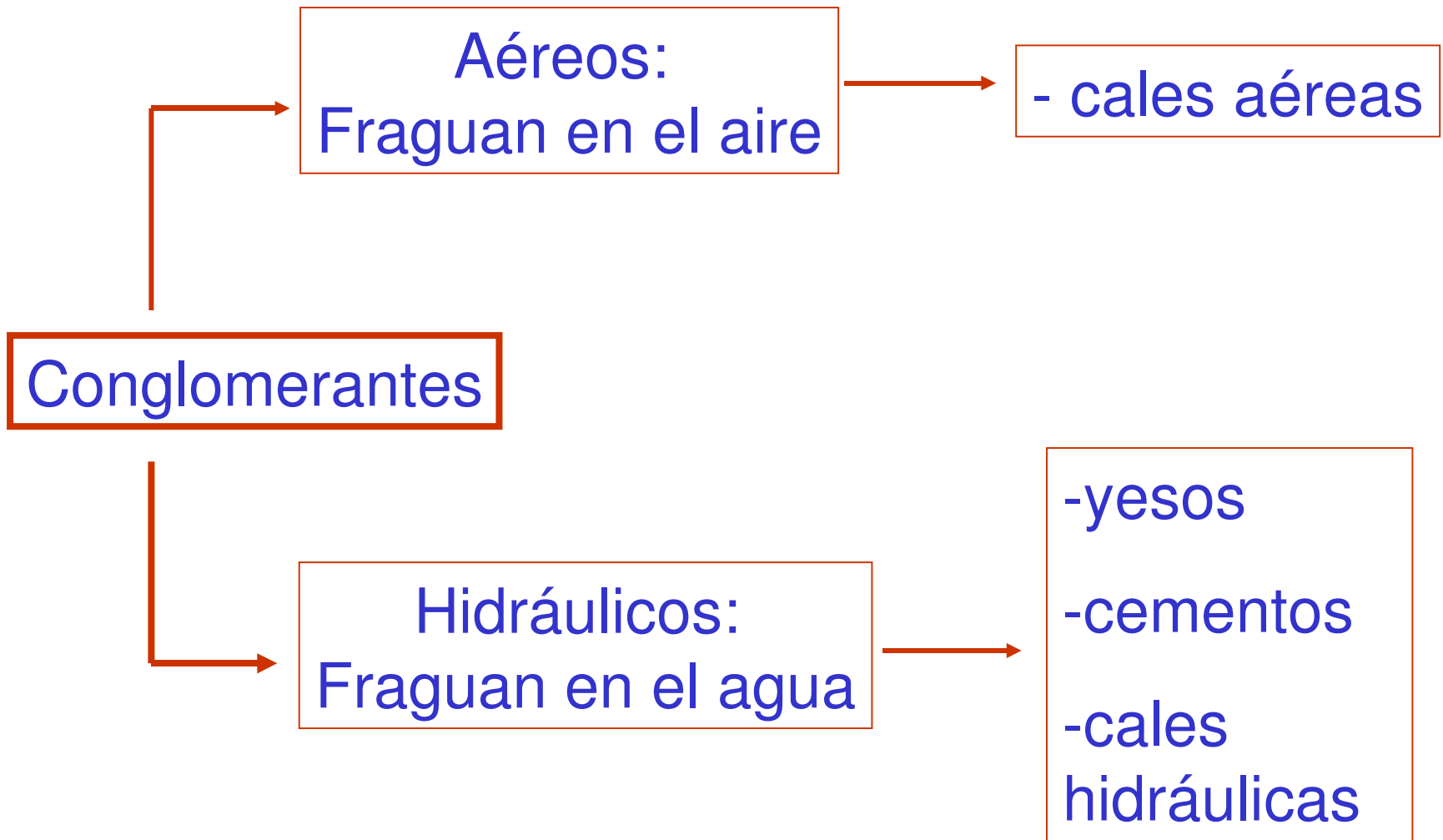
1. Conglomerantes

Conglomerantes son materiales naturales o artificiales que por combinación con agua (y en algún caso también CO_2) sufren un proceso de endurecimiento que da lugar a un material resistente.

También se utilizan como elemento de unión de partículas de áridos naturales, dando lugar a unos nuevos materiales pétreos artificiales: los morteros y hormigones.

Los más importantes conglomerantes son yesos, cales y cementos.



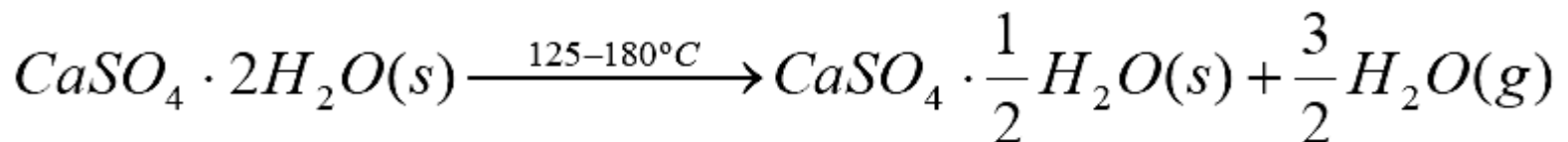


2.- YESOS

El yeso es un conglomerante artificial obtenido por la deshidratación del Algez o piedra de yeso, es conocido desde la antigüedad (egipcios y árabes).

El proceso de fabricación consta de los siguientes pasos: Extracción, Trituración, Cocción.

La ecuación muestra el paso del Algez al semihidrato o hemihidrato.



El proceso de fraguado es el contrario, que ocurre al amasarlo con agua.

Según la teoría de Le Chatelier al amasar el yeso cocido con agua se forma alrededor de las partículas una disolución sobresaturada de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, a partir de la cual precipita este dihidrato formando unos cristales que se entrecruzan y que le dan resistencia a la masa fraguada.



El interés del yeso es la rapidez de su fraguado (en unos 30 minutos), por lo que se utiliza para inmovilizar provisionalmente.



Algunos problemas que presenta es ser permeable por lo que no se le puede emplear en lugares expuestos al agua.

En contacto con el hierro y acero produce corrosión.

Además, el yeso es parcialmente soluble en agua (aproximadamente 1'8 gramos por litro).

La reacción de fraguado es exotérmica produciéndose además una expansión debido al crecimiento de los cristales.



El aljez
($\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

&

La anhidrita natural
(SO_4Ca)



están ampliamente distribuidos en la corteza terrestre

únicamente no se encuentran en las zonas
volcánicas



Los depósitos de aljez y de anhidrita, se originaron como consecuencia de la evaporación

de las aguas de mares con poca profundidad en las que se fueron formando soluciones acuosas sobresaturadas de CaSO_4

Para que esto ocurra debe reducirse a 1/5 el agua.





LOS PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN Y REHIDRATACIÓN, SON LA BASE DE LA TECNOLOGÍA DEL YESO.

DESHIDRATACIÓN

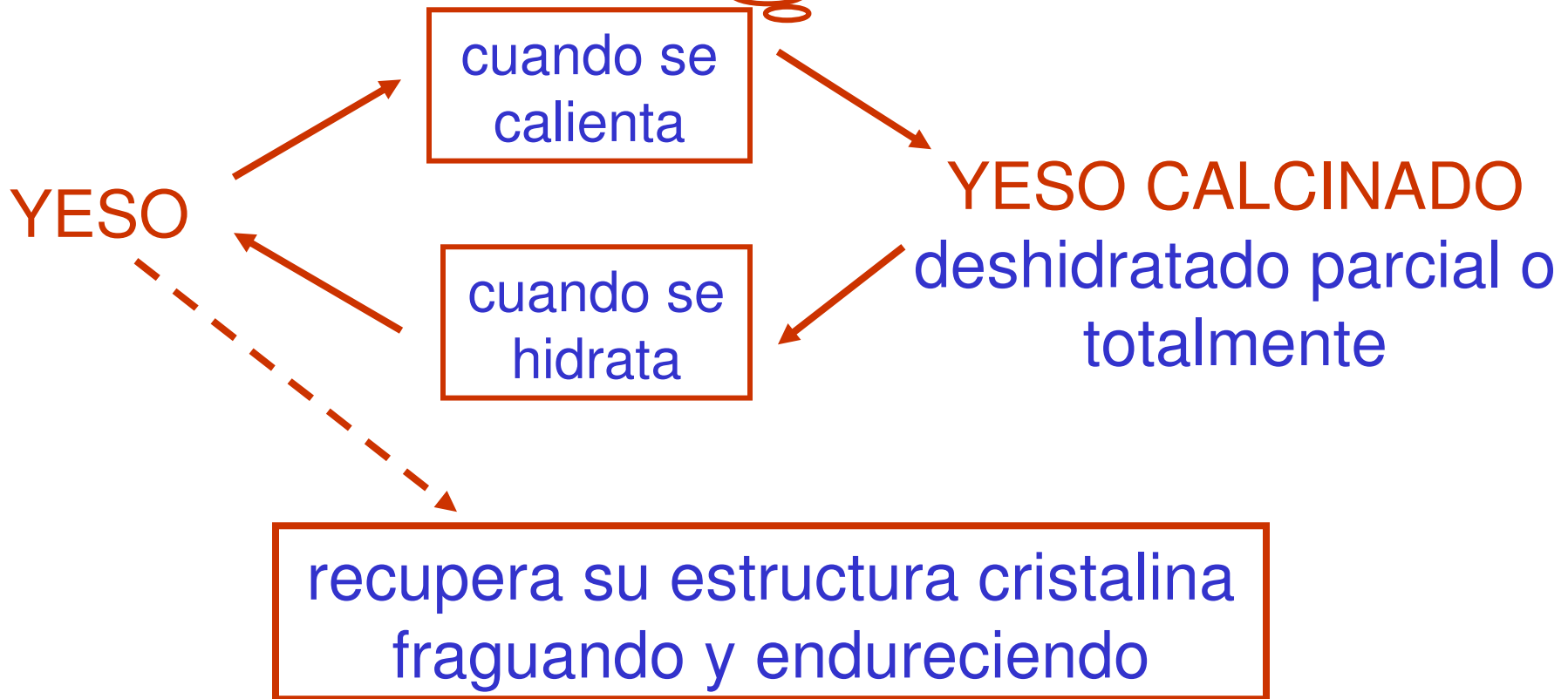


REHIDRATACIÓN



El yeso es un buen material de construcción

pierde rápidamente su agua de hidratación



Densidad

La densidad
aparente del sulfato
cálcico rehidratado
es (0.5 t/m³)

<<

La densidad de la
piedra de sulfato
de calcio
es (2,3 t/m³)

Ni el aljez ni la anhidrita natural son tóxicos



Las reacciones que tienen lugar en la rehidratación son:



el proceso de rehidratación es una reacción exotérmica

el calor que se suministró en el proceso de fabricación para producir la deshidratación

es ahora liberado en la reacción de formación del compuesto de partida



si la hidratación se realiza con la cantidad de agua adecuada

produce una mezcla homogénea

se solidifica y endurece

el sulfato de calcio dihidrato forma agujas que crecen y se entrelazan entre sí



EL AGUA

fija

variable

combinada en el dihidrato

da al producto acabado sus cualidades específicas

agua de amasado

muy importante ya que influye en propiedades tales como la porosidad, la dureza superficial, la resistencia mecánica, etc.



la cantidad de agua teórica para hidratar todo el yeso es del 18,6% del contenido en yeso

de la estequiometría de la reacción



relación A/Y de aproximadamente 0.2

en la práctica

es imposible amasar el yeso con una cantidad de agua tan pequeña

no se consigue una mezcla íntima

se produce un fraguado instantáneo

impide trabajar la pasta



el agua necesaria para el amasado depende del tipo de producto y su granulometría



En cualquier caso siempre se trabajará con un exceso de agua sobre la cantidad teórica, lo cual tendrá efectos importantes sobre las propiedades del yeso



Al aumentar la cantidad de agua de amasado del yeso

(al aumentar la relación A/Y)

- Se retrasa el fraguado del material
- Aumenta la porosidad del material una vez endurecido
- Se pierde resistencia mecánica, a compresión y a flexotracción
- Disminuye la adherencia
- Disminuye la dureza superficial

Por tanto, la reacción de hidratación deberá realizarse con
la cantidad de agua lo más ajustada posible



LA CAL



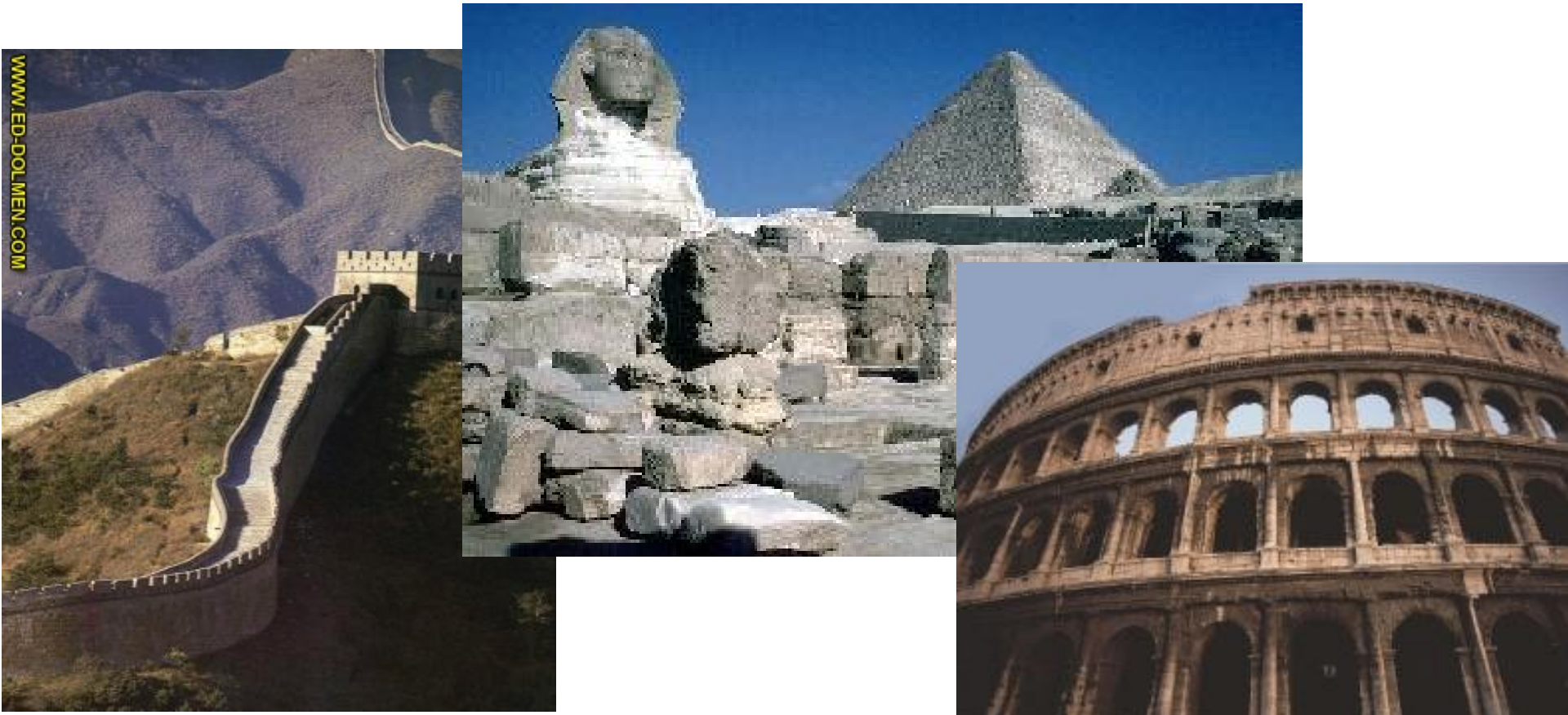
La cal probablemente es el primer producto de reacción química conocido por el hombre.

Es el cementante mas antiguo que se conoce y del cuál existen notables muestras.

La abundancia de piedra caliza en la corteza terrestre y su facilidad de transformación al óxido del calcio nos explica porqué la cal es uno de los productos más viejos de la química.



Con la cal se edificaron obras conocidas a nivel mundial, las cuales sorprenden por su resistencia al paso del tiempo, por ejemplo: Las Pirámides de Egipto, la Muralla China, El Coliseo Romano



WWW.ED-DOLMEN.COM



Los empleos de la cal han aumentado y cambiado con el pasar del tiempo.

Cuando la cal se mezcla con agua y arena

mortero

que se utiliza para diferentes funciones dentro de una construcción

pegar ladrillo, bloques, piedras, aplanados de techos y paredes, pisos para impermeabilizar, pintar...

El calcio ocupa el quinto lugar en abundancia entre los elementos de la corteza terrestre, pero no se encuentra en estado puro en la naturaleza.



La cal es un conglomerante que se fabrica por calentamiento de calizas.

La caliza fue ampliamente usada por los Romanos para la construcción de caminos.

Los beneficios de encalar suelos con mármoles y calcitas fue conocida por los Romanos en el primer siglo A.C. Plinio reportó que los Ubianos, al norte de Mainz, usaban "tierra blanca" (mármol calcáreo) para fertilizar sus campos.



3.- CALES AÉREAS.

es un conglomerante aéreo que se fabrica por calentamiento de calizas,
produciendo cal viva,
que después se apaga con agua.

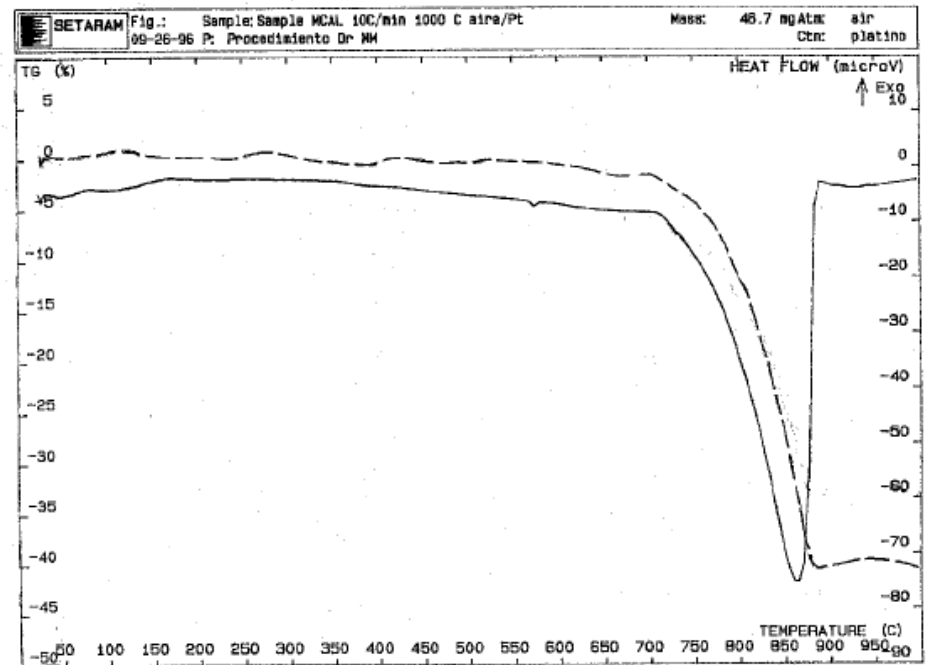
calcinación



hidratación



ATG y ATD de la calcinación de la caliza



Caliza: carbonato
cálcico



Cal viva: óxido de calcio

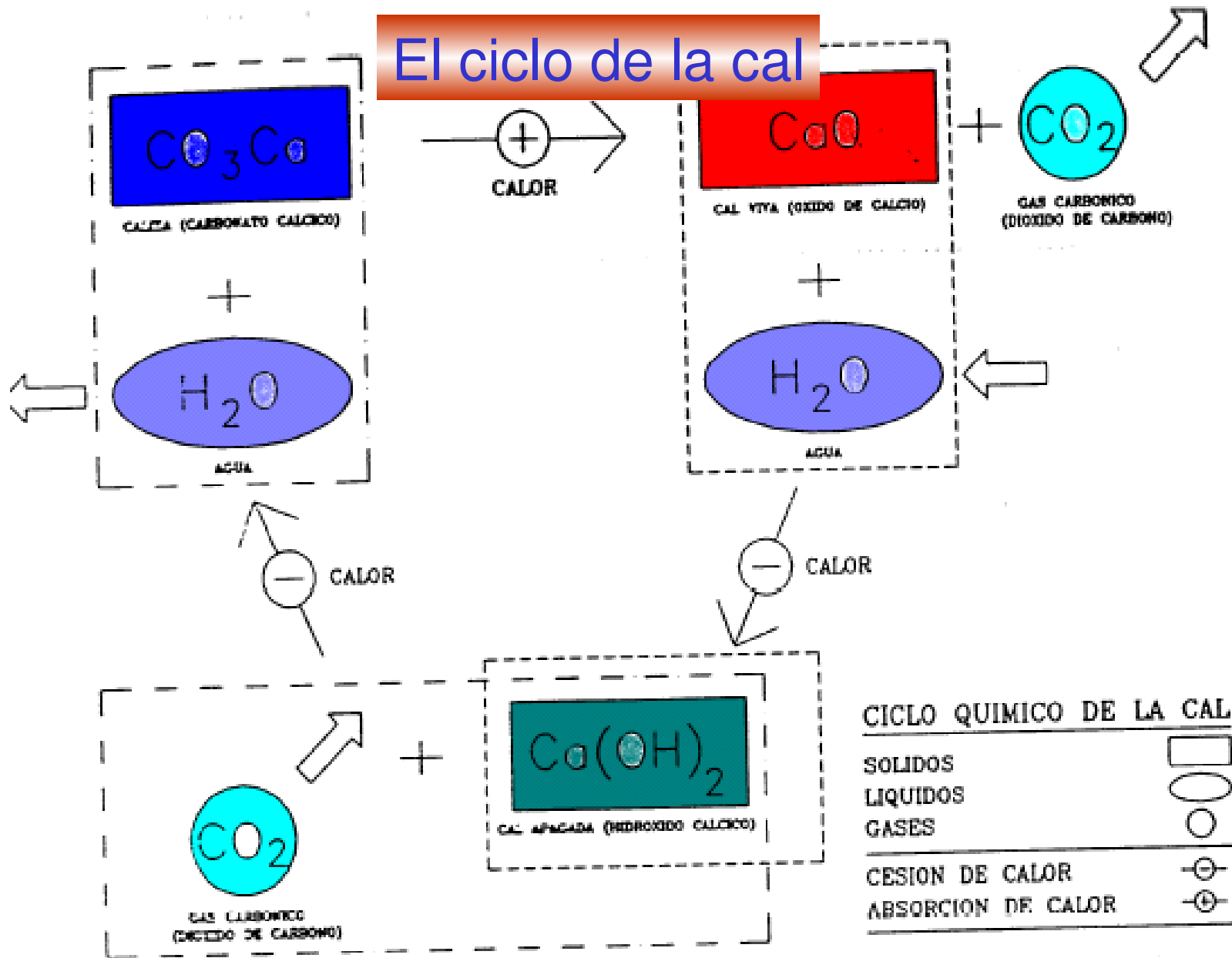


Cal apagada, hidratada: hidróxido de calcio

La cal apagada: Contiene un 24,32% H_2O /Ligeramente soluble en H_2O (1,4g/l a 15°C) / Color blanco.



El ciclo de la cal





El fraguado

ocurre en el aire, con el CO₂ atmosférico acompañado de desecación del agua que se libera en la reacción.



El fraguado tarda mucho en completarse por la baja proporción de CO₂ en la atmósfera

La cal aérea se utiliza como mortero, mezclada con arena para unir elementos de construcción.

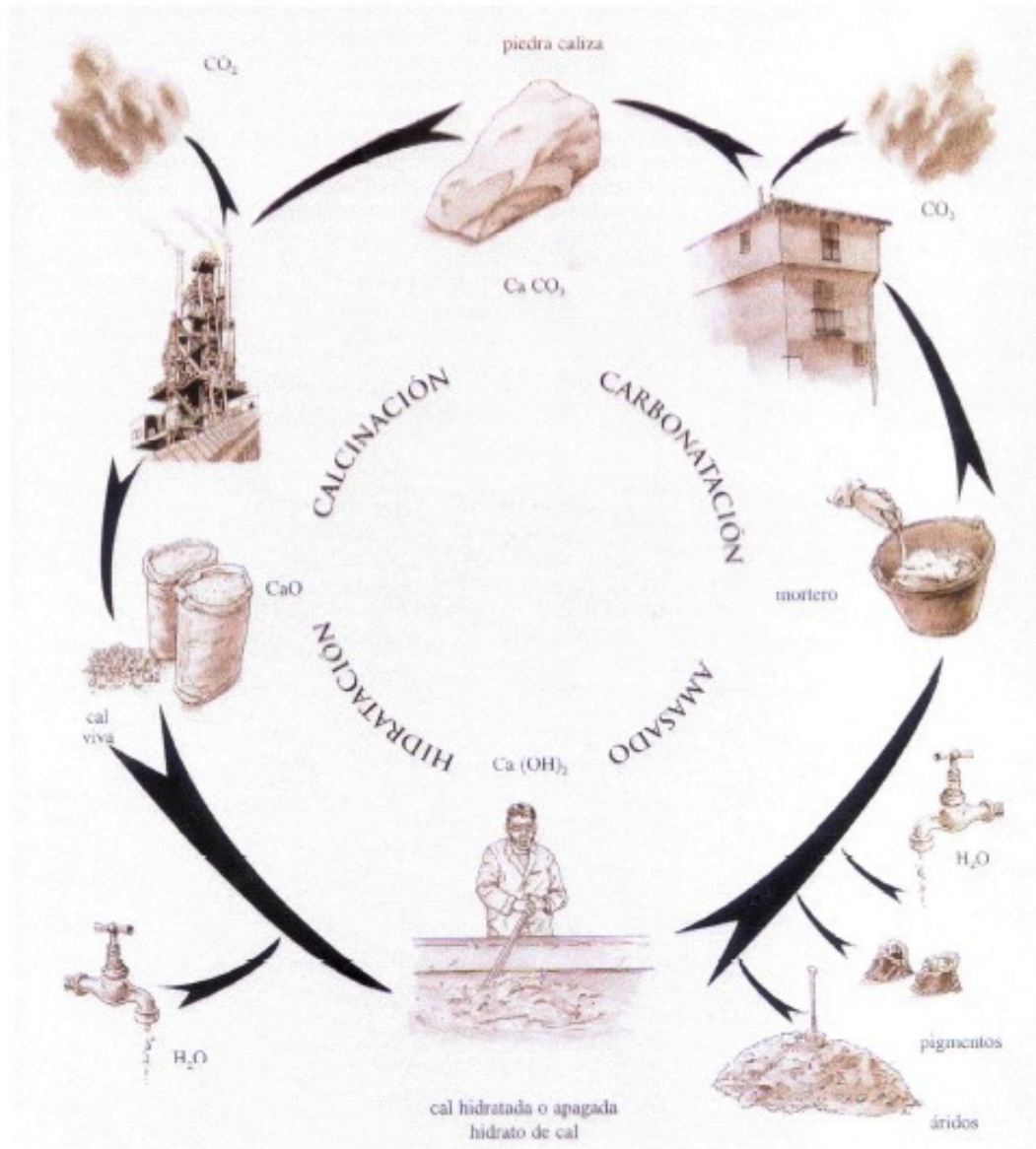
- Morteros de cal: Cal/Arena = 1/3
- Morteros mixtos: Cemento/Cal/Arena = 1/2/8.

Mejoran la resistencia mecánica y disminuyen la fisuración.



La palabra "mortero" viene del vocablo romano "mortarium" que significa sartén para mortero, dónde se preparaba por percusión el antiguo mortero





4.-CALES HIDRÁULICAS.

Si la caliza de partida para fabricar la cal

tiene impurezas arcillosas (de un 5 a un 22% de arcilla)

el producto de cocción (1000-1200°C) bien molido fragua bajo el agua

es decir: es un conglomerante hidráulico llamado cal hidráulica.

La cal hidráulica endurece con más rapidez y alcanza mayor solidez que la cal aérea.



Cocción de la cal hidráulica.

1200°C



Silicato calcico Aluminato cálcico

Según el contenido de arcilla de la caliza la cal es más o menos hidráulica.

(A mayor contenido de arcilla mayor hidraulicidad).

Tiene el inconveniente de que el apagado con H₂O se ha de hacer con más cuidado y añadir sólomente el H₂O necesaria, un exceso que podría hidratar a los silicatos



"índice de hidraulicidad" : se define un como un cociente de componentes ácidos y básicos.

$$I = \frac{\text{Componentes ácidos}}{\text{Componentes básicos}} = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}{\text{CaO} + \text{MgO}}$$

Propiedades:

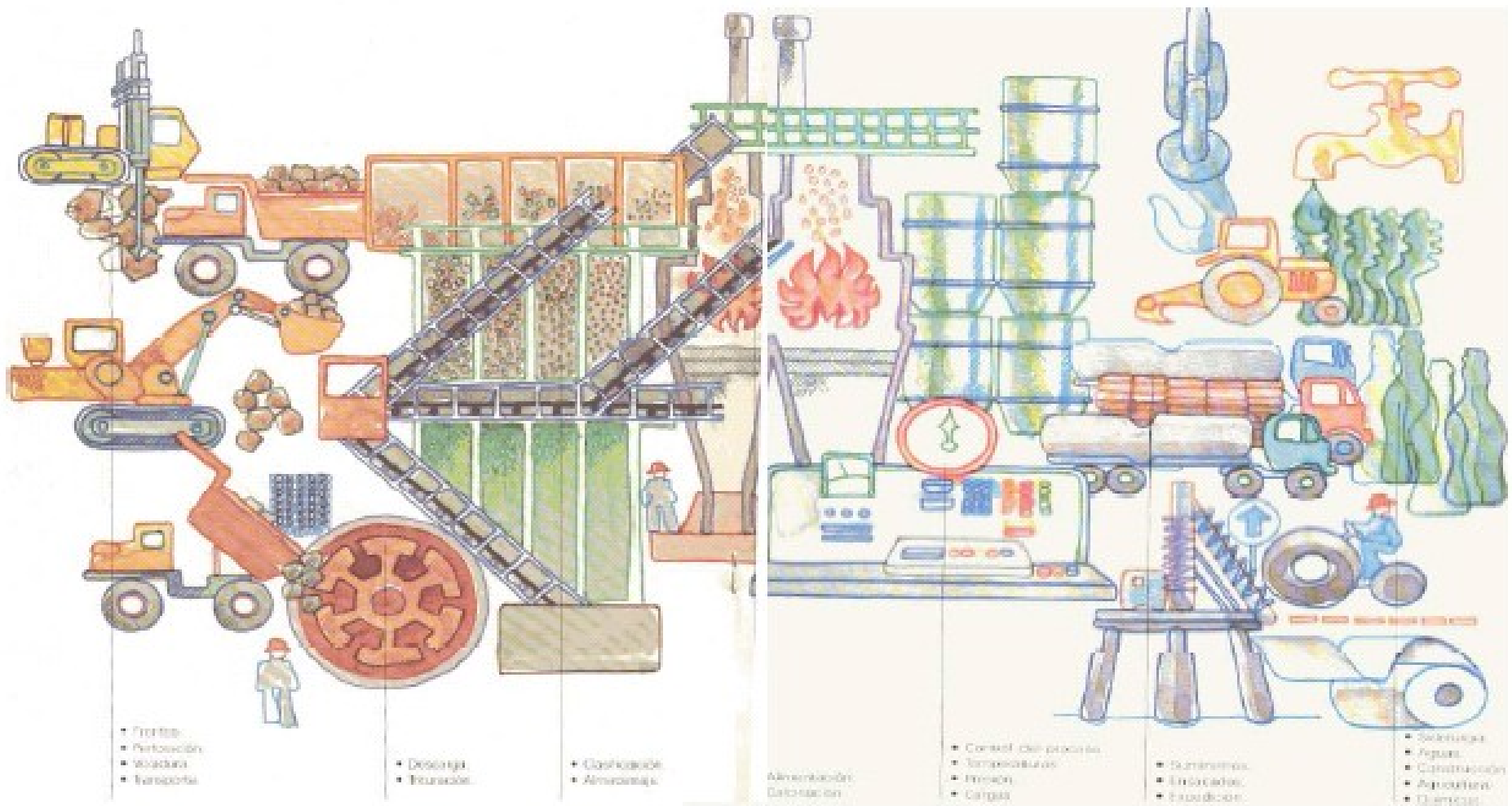
Hidraulicidad, mayores resistencias mecánicas, menores tiempos de fraguado, → color gris verdoso



Tipo de conglomerante	Hidraulicidad	I_H	% Arcilla	Duración del fraguado
Cal aérea	No hidráulica	0,00-0,10	0-5	6 meses
Cal hidráulica	Débilmente hidráulica	0,10-0,16	5-8	15-30 días
	Medianamente hidr.	0,16-0,30	8-14	10-15 días
	Normalmente hidr.	0,30-0,40	14-19	2-4 días
	Eminentemente hidr.	0,40-0,50	19-22	< 2 días
Cemento natural	Hidráulico	0,50-1,20	>22	<12 horas

<i>Material</i>	<i>Índice de hidraulicidad</i>
Cal aérea	< 0,10
Cal hidráulica	0,10 – 0,50
Cementos rápidos	0,50 – 0,65
Cementos lentos	0,65 – 1,20





1. Extracción de la materia prima
2. Trituración
3. Calcinación

4. Hidratación
5. Clasificación
6. Ensacado

5.- EL CEMENTO



Historia del Cemento

Hacia el año 700 antes J.C. los etruscos utilizan mezclas de puzolana y cal para hacer un mortero.

Ya en el año 100 antes J.C. los romanos utilizaban mezclas de puzolana y cal para hacer hormigón de resistencias a compresión de 5 Mpa.



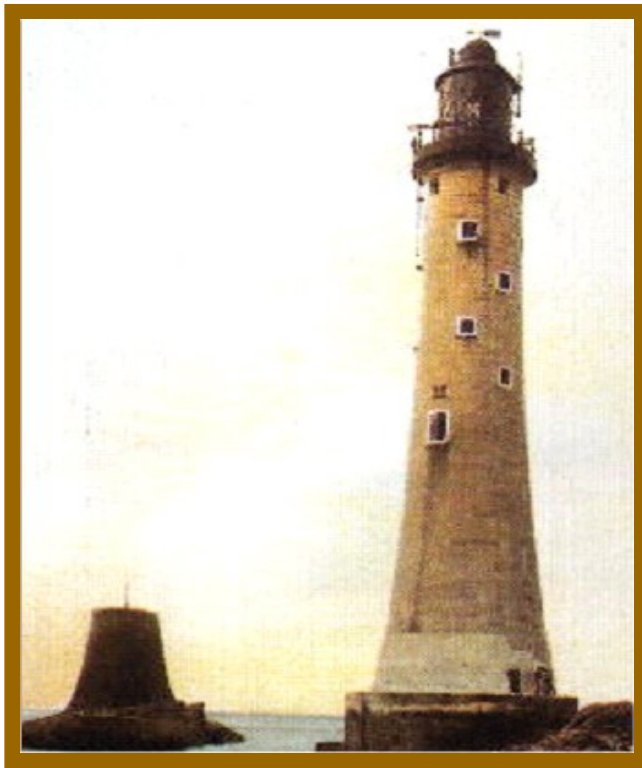
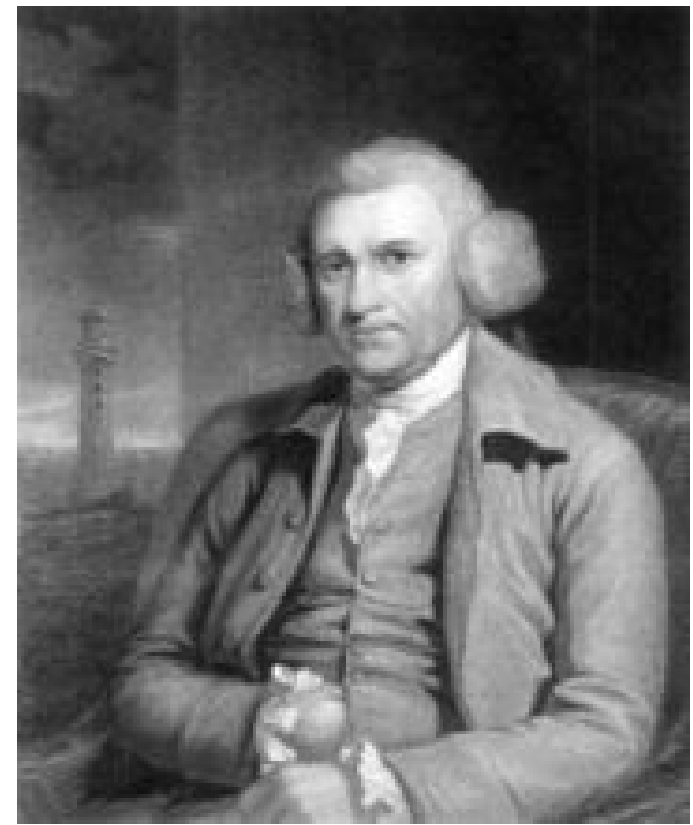
Hasta el año 1750 sólo se utilizan los morteros de cal y materiales puzolánicos (tierra de diatomeas, harina de ladrillos etc.).



Hacia 1750-1800 se investigan mezclas calcinadas de arcilla y caliza.



Smeaton compara en el año 1756 el aspecto y dureza, de las mezclas calcinadas de arcilla y caliza, con la piedra de Portland al sur de Inglaterra y descubre nuevamente el cemento romano.



Al hacer uso de su descubrimiento, reconstruye el faro Eddystone, en Cornwall, Gales, Reino Unido en 1759, que permanecería de pie por 126 años.



40 años más tarde, Parker fábrica cemento natural aplicándose entonces el vocablo ""cemento"" (anteriormente se interpretaba como ""caement"" a toda sustancia capaz de mejorar las propiedades de otras).



1812 Louis Vicat de Francia prepara una cal artificial al calcinar mezclas sintéticas de arcilla y cal.

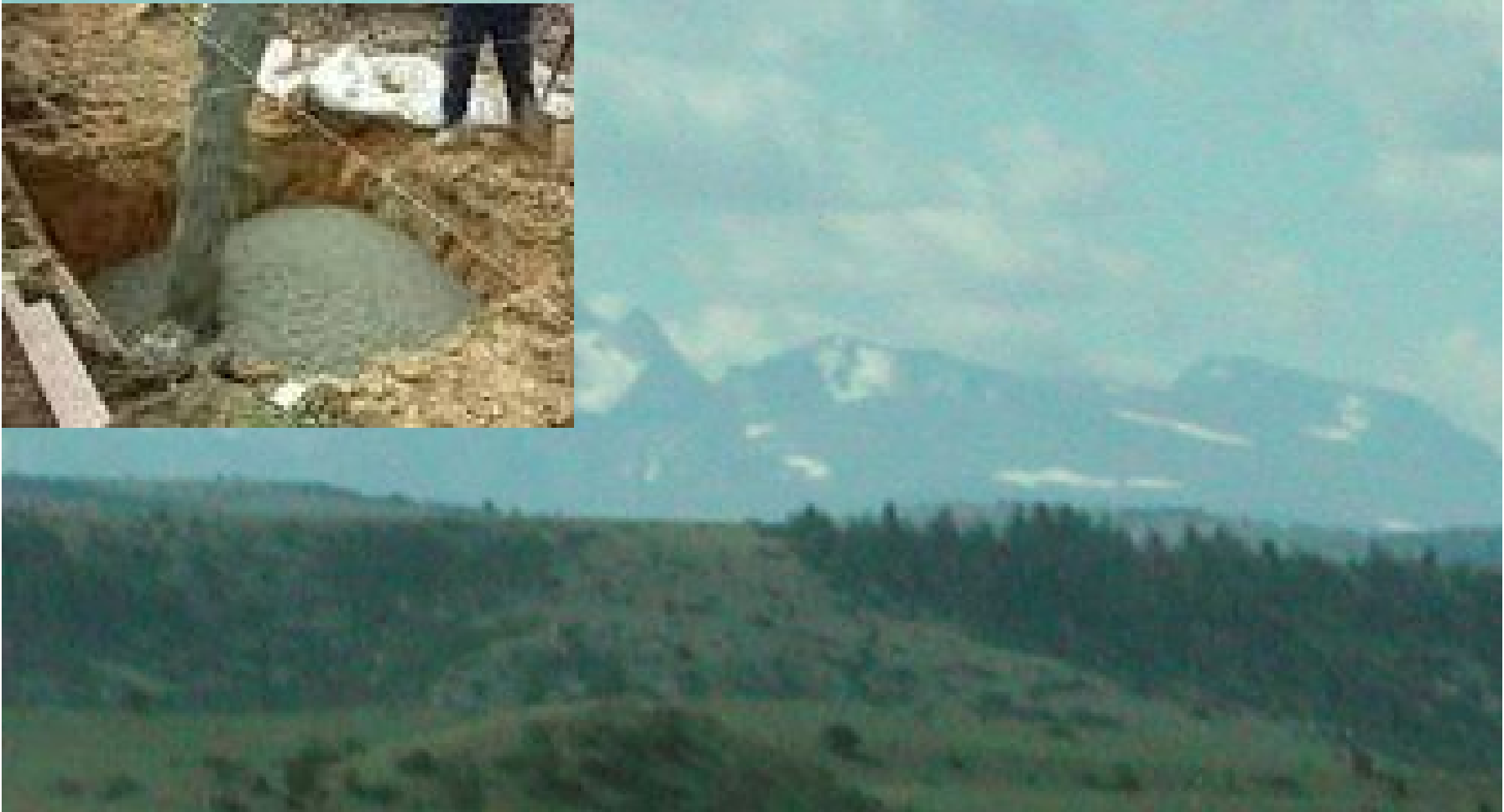
Y en 1818 explica de manera científica el comportamiento de estos ""conglomerantes"".



1824 El maestro de obras Joseph Aspdin patentó la fórmula de cemento, al quemar polvo fino de gis con arcilla en un horno de cal.



El producto obtenido fue denominado cemento Portland, ya que su color le recordaba el de la piedra de Portland.

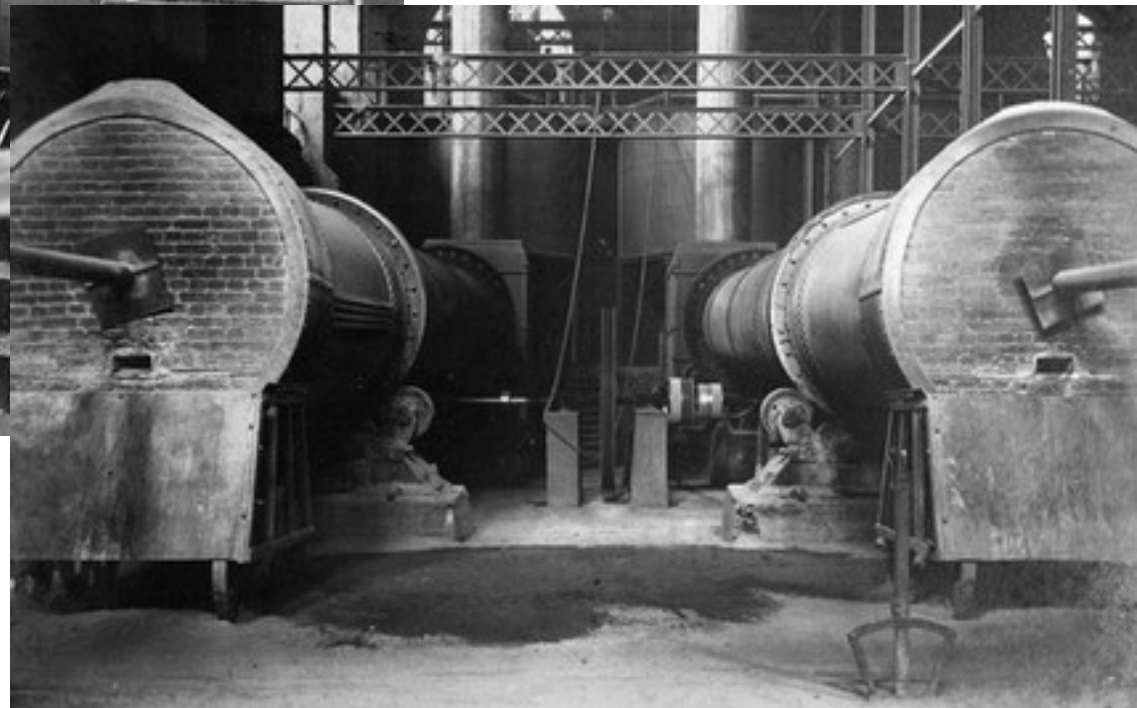
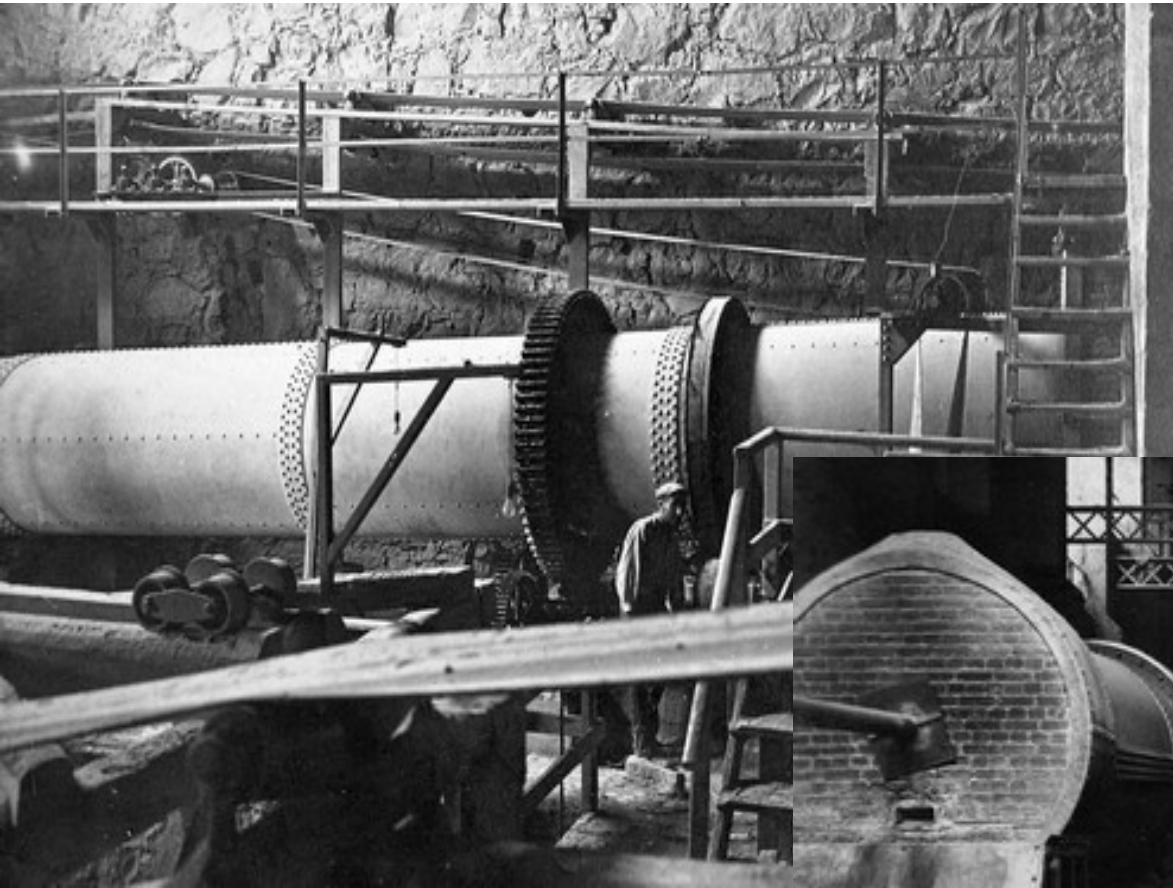


1840 El hijo de Joseph Aspdin funda con otros socios la empresa "Robins, Maude and Aspdin" en Northfleet Creek, en Kent, Reino Unido.

En la actualidad todavía se puede visitar el horno de cemento más viejo sobreviviente en el mundo



1886 Se construye el primer horno rotatorio en Inglaterra.



1883-1887: LE CHATELIER inicia en profundidad el estudio científico de la química de los silicatos y aluminatos de calcio hidráulicos.

Por primera vez, en 1882, cita los silicatos tricálcico y bicálcico, el aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico.

1897: TORNEBOHM propone los nombres de *Alita*, *Belita*, *Felita* y *Celita* para los compuestos citados por LE CHATELIER, a fin de simplificar la nomenclatura y asimilar los compuestos de los cementos a los productos puros.



1915: RANKIN Y WRIGHT proponen las abreviaturas:

C; S; A; F y M para denominar en forma abreviada
respectivamente al

CaO ; SiO_2 ; Al_2O_3 ; Fe_2O_3 y MgO

creando así una nomenclatura particular para la industria del
cemento.

En esta forma los componentes principales se denominarán,
en forma abreviada;

SC_3 : Silicato tricálcico o Alita;

SC_2 : Silicato bicálcico o Belita;

AC_3 : Aluminato tricálcico o Celita y

FAC_4 : Ferroaluminato tetracálcico o Felita

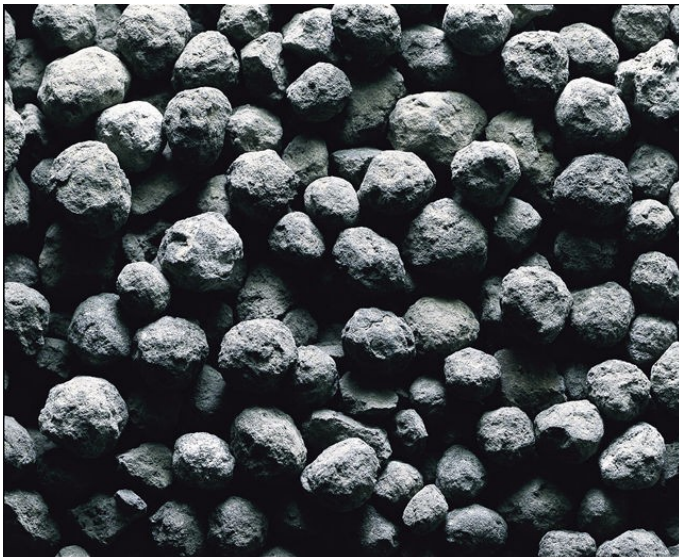
(C_3S) ; (C_2S) ; (C_3A) y (C_4FA)

(C3S) ; (C2S) ; (C3A) y (C4FA)



El vocablo "clinker" da nombre al producto intermedio en la fabricación del cemento, principal componente de este último.

Se trata del producto obtenido por calcinación a 1.500°C de una mezcla de caliza y arcilla.



Este producto producía al deslizarse por los hornos rotatorios un ruido "clink, clink,..." del que toma el nombre onomatopéyico de "clinker".



CEMENTO.

Se entiende por cemento al producto resultante de la cocción de caliza y arcilla (esta última en porcentaje superior al 22%) y posterior mezcla con yeso y molienda.



CLASIFICACIÓN:

a) Según el tiempo de fraguado.

-Cemento rápido:
Fragua en menos de 1 hora.

-Cemento lento:
Fragua en más de 1 hora.



b) Según su composición.



- Cementos Naturales:

Se obtienen por calcinación de calizas arcillosas (margas).

- Cementos Portland:

Se obtienen por calcinación de caliza y arcilla.

- Cementos Siderúrgicos:

Se obtienen mezclando clinker de Portland y escorias de altos hornos.

- Cementos Puzolánicos:

Se obtienen mezclando cemento Portland y puzolanas.

- Cementos Aluminosos:

Se obtienen por calcinación de caliza y bauxita.

Bauxita, mineral que contiene Al_2O_3



5.1.-Fabricación del cemento portland.



El "crudo"

Una mezcla rigurosamente homogénea y fina de caliza y arcilla

sinterización (1500°C) en un horno rotatorio

"clinker"

"cemento Portland"
conglomerante hidráulico

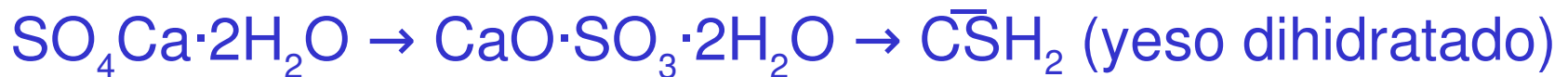
molido y mezclado con yeso en proporción menor del 3 %

Su nombre procede de su coloración gris-verdosa, muy similar a la piedra de un pueblo inglés llamado Portland.



5.2.-Abreviaturas utilizadas en la química del cemento

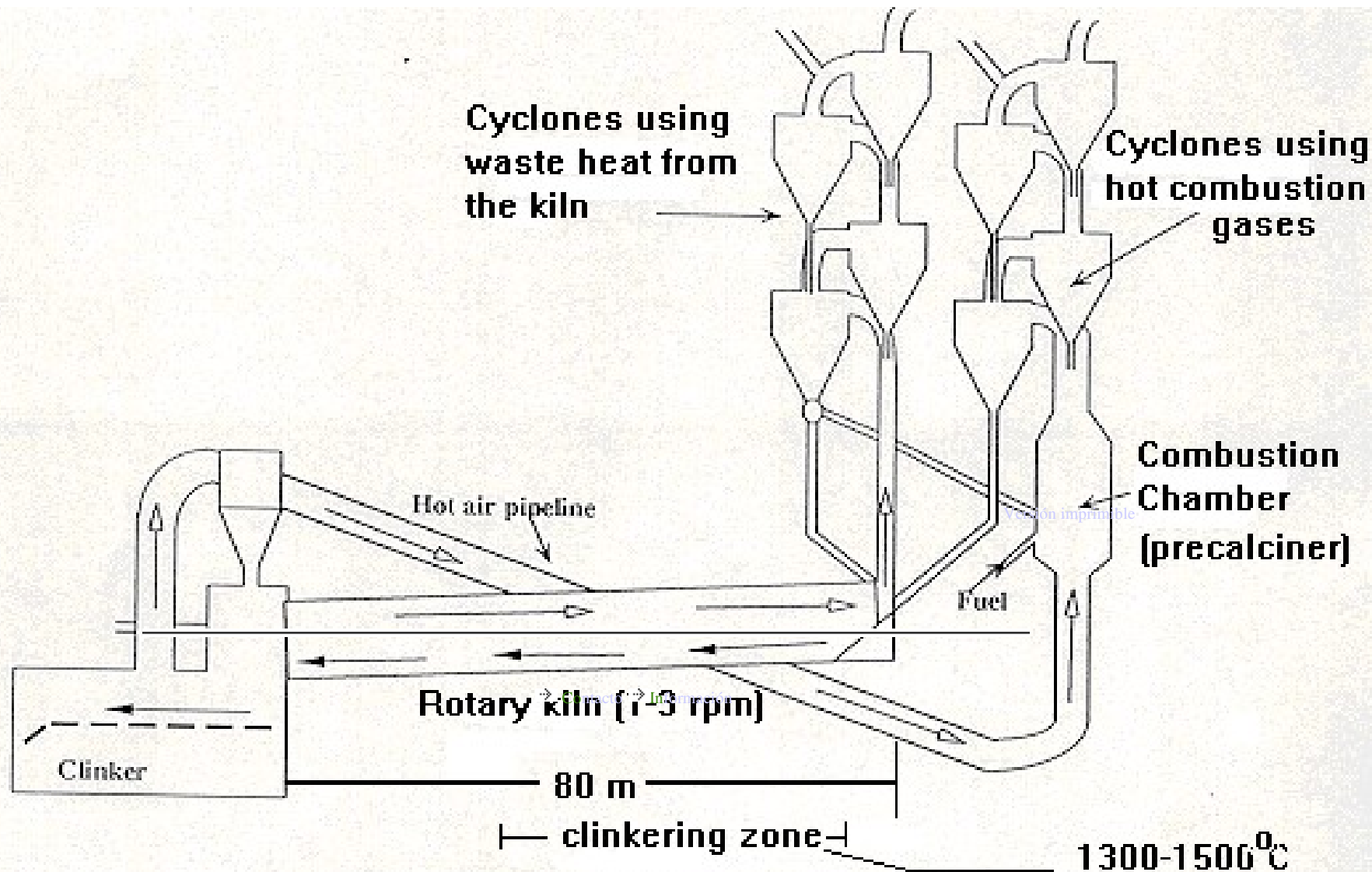
Óxido	Abrev.	Óxido	Abrev
CaO	C	Na ₂ O	N
SiO ₂	S	MgO	M
Al ₂ O ₃	A	H ₂ O	H
Fe ₂ O ₃	F	SO ₃	\bar{S}
K ₂ O	K	CO ₂	\bar{C}





La primera fábrica de cemento artificial se inauguró en España en 1898 en Tudela Veguín (Asturias). Fue la única cementera que se instaló en España antes del siglo XX, con unos 50 años de retraso respecto al resto de Europa.





Cyclone preheaters and precalciner



5.3.- Reacciones de formación del clinker.

Durante el proceso de cocción del crudo, que conduce al clinker como producto, ocurren estas reacciones:

A.- Pérdida del agua libre de los crudos (humedad).

$$T < 200^{\circ}\text{C}.$$

B.- Pérdida del agua absorbida en las arcillas, incluso el agua interlaminar.

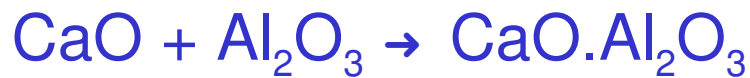
$$100 \leq T \leq 400^{\circ}\text{C}$$



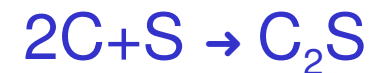
D.- Reacciones entre fases sólidas.

A T entre 500 y 600°C empiezan a producirse reacciones entre los productos sólidos de la descomposición de la caliza y la arcilla.

Se forman preferentemente compuestos de bajo contenido de cal: CA y C₂S



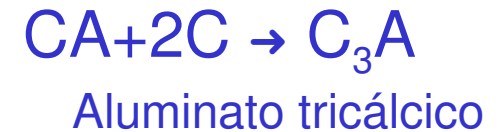
Aluminato cálcico



Silicato bicálcico



A partir de 800 °C ya se forman C₃A y C₄AF.



E.-Reacciones entre fases líquidas.

Entre 1260 y 1310°C comienza a formarse la fase líquida, es decir comienza el proceso de sinterización o fusión parcial.

La proporción de fase líquida aumenta al incrementarse la temperatura, alcanzando un 20-30% a 1450°C, aunque esto también depende de la composición química de la masa.

A estas temperaturas ya se puede formar el C_3S .



Silicatotricálcico



F.-Reacciones durante el enfriamiento.

Si el proceso de enfriamiento es lento podrían invertirse los equilibrios establecidos a temperaturas elevadas,

por ejemplo se podría descomponer el C_3S , hecho que sería desfavorable.

Por el contrario en un enfriamiento rápido se produce una "congelación" del equilibrio, de forma que la composición del clinker enfriado sería la misma que la que existía a la temperatura de sinterización.





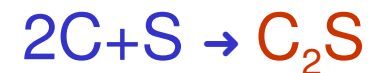
Resumiendo

Reacciones de inicio

- Ht 750°C pérdida de agua: libre, absorbida o interlaminar y combinada químicamente.
- $550 \leq T \leq 600^\circ\text{C}$ Descomposición de los carbonatos.

Reacciones entre fases sólidas

- entre 500 y 600°C



- A partir de 800°C



Reacciones entre fases líquidas

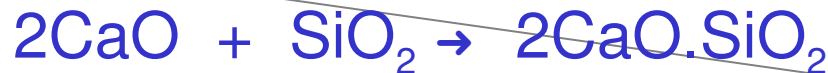
- Entre 1260 y 1310°C



Reacciones de inicio



Reacciones entre fases sólidas



Reacciones entre fases líquidas



crudo:
arcilla + caliza

clinker yeso

cemento



5.4.-Factores que influyen en el proceso de cocción del clinker

a.-Composición química de la masa.

Módulo silícico

$$MS = \frac{SiO_2}{Fe_2O_3 + Al_2O_3}$$

A mayor MS menor es la proporción de fase líquida que se forma.

Módulo fundentes

$$MF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

A mayor MF mayor es la viscosidad de la fase líquida.

Por tanto unos MS y MF elevados dificultan la formación de C_3S .



b.-Composición mineralógica de los crudos, especialmente de las arcillas.

Para obtener una tonelada de cemento portland se utilizan aproximadamente 1,5 toneladas de materia prima.

La dosificación del crudo se resuelve en un sistema de ecuaciones en el que intervienen como datos la composición de las materias disponibles.

Se plantean como condiciones de diseño:

- limite de saturación de cal
- módulo de silicatos
- módulo de fundentes.



El índice de saturación de cal
cal que puede combinarse con la sílice, alúmina y hierro en
condiciones ideales.

$$\left(SC = \frac{CaO}{2.8 SiO_2 + 1.1 Al_2O_3 + 0.7 Fe_2O_3} \right)$$

Módulo de silicato:

actúa en el comportamiento del crudo durante el proceso de cocción
y en las características del clinker.

modifica la fase líquida en el horno, alterando la facilidad de cocción
y la exigencia de una mayor o menor temperatura.

Módulo fundente:

expresa el incremento del contenido de hierro, destinado a facilitar la
fusión de los crudos más gruesos, eliminando el riesgo de cal libre,
si decrece el módulo de fundente disminuye la temperatura requerida
para la formación del clinker; se obtiene mayor fase líquida.



A la mezcla de materias primas principales se le añaden otros productos, llamados correctores.

ayudaran a ajustar la composición química del crudo

para regular la temperatura de sinterización de la mezcla

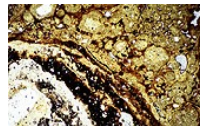
y la cristalización de los minerales del clinker

Por ejemplo,

se utilizan arenas para regular la cantidad de SiO_2 ,



bauxitas para el Al_2O_3 ,



óxidos de hierro o cenizas de pirita para el Fe_2O_3 , etc.



c.-Granulometría y homogeneidad de la mezcla de crudos.

Interesan tamaños de partículas pequeños y mezclas muy homogéneas, para que no queden fragmentos sin reaccionar (nidos de cal libre, etc.).

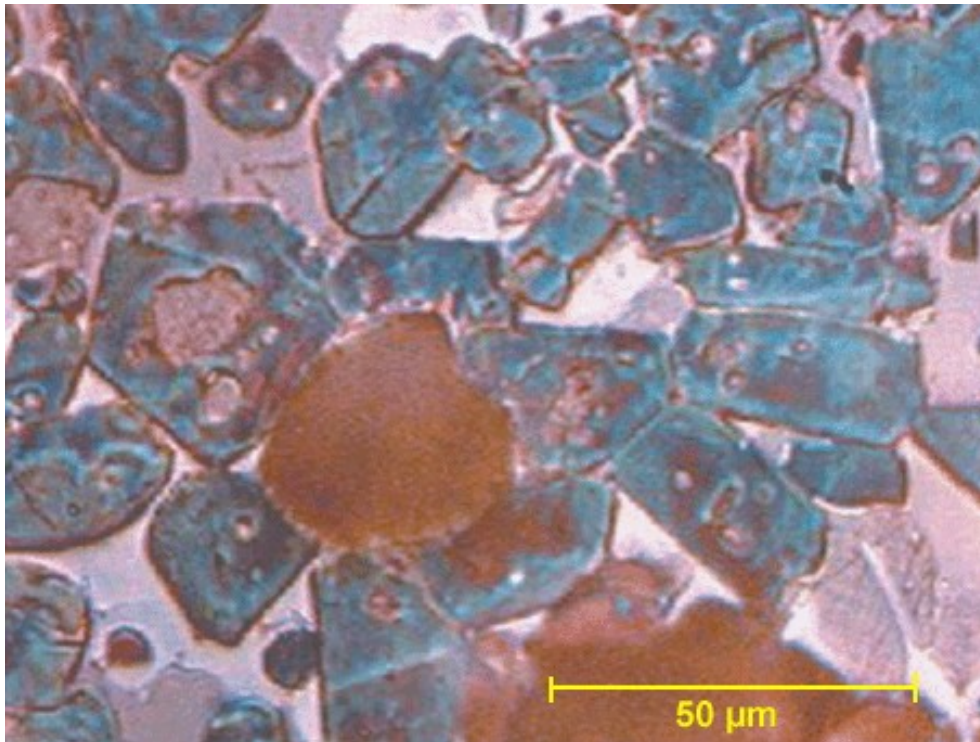


Preparación de las materias primas



d.-Condiciones de la cocción: Velocidad de calentamiento, tiempo de permanencia a la temperatura de sinterización.

Los compuestos generados tendrán una estructura más o menos cristalina o amorfa, dependiendo de la velocidad de enfriamiento del clinker resultante.



Fotomicrografia de amostra de clínquer, resfriada com velocidade de 6°C/minuto, mostrando os cristais azulados de alita, com núcleos de belita, na cor marrom. 600X.





Factores que influyen en el proceso de cocción del clinker.

a.-Composición química de la masa.

Módulo silícico

Módulo fundentes

b.-Composición mineralógica de los crudos, especialmente de las arcillas.

c.-Granulometría y homogeneidad de la mezcla de crudos.

d.-Condiciones de la cocción

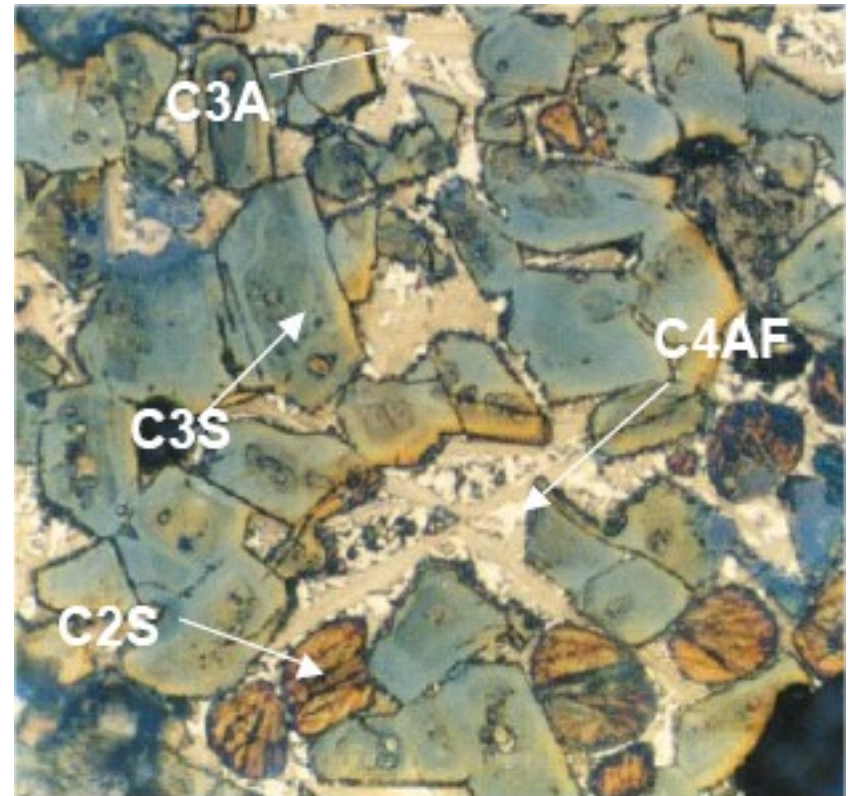
Composicion del Clinker de Cemento Portland.



5.5.- Composición del clinker de cemento portland.

Contiene fundamentalmente cuatro fases cristalinas:

- Silicato Tricálcico (C_3S)
- Silicato Bicálcico (C_2S)
- Aluminato Tricálcico (C_3A)
- Ferrito Aluminato Tetracálcico (C_4AF)



- (C_3S) Silicato Tricálcico



Los cementos ricos en C_3S

son de endurecimiento rápido

proporcionan al hormigón
una elevada resistencia
inicial

En otra época se les denominaba “supercementos”
o cementos ARI (alta resistencia inicial).

Esta propiedad es interesante

para hacer elementos
prefabricados de hormigón,
donde interesa desmoldear
rápidamente

o cuando interesa
anticipar el desencofrado
de las estructuras de
hormigón.



A) Silicato Tricálcico o Alita.

Fórmula: 3CaO SiO_2 (C_3S).

Su color es blanco y su proporción media en el clinker es del 60%.

No suele encontrarse puro en el clinker sino que incorpora en su estructura hasta un 2% de óxidos extraños (de magnesio, aluminio, hierro, etc.).

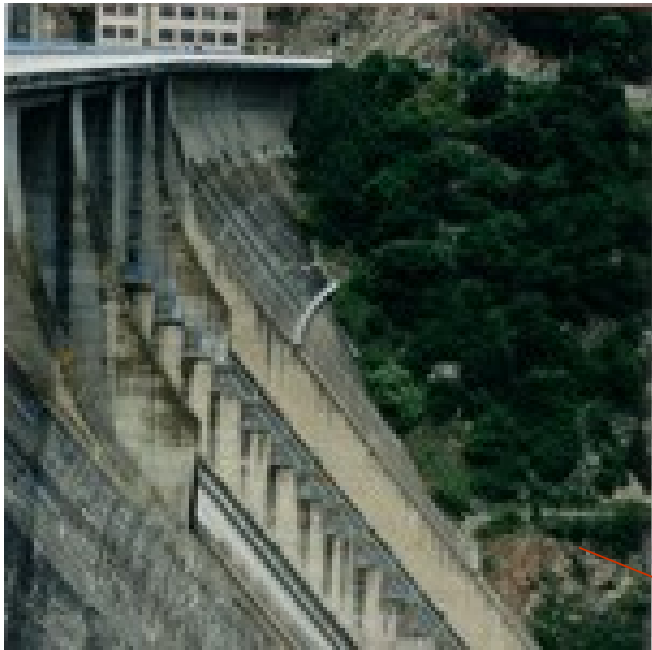
Características que confiere al cemento o al hormigón:

- Gran velocidad de hidratación.
- Calor de hidratación elevado.
- Resistencias mecánicas iniciales altas y finales buenas.
- Estabilidad química aceptable, aunque menor que la del C_2S .

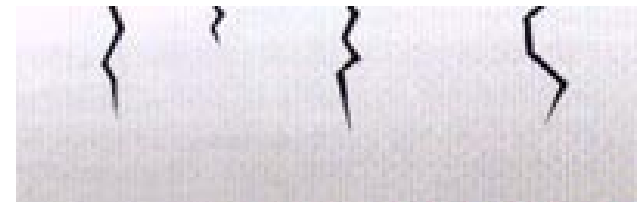


Por su elevado calor de hidratación

los cementos muy ricos en C_3S no son utilizables para fabricar grandes masas de hormigón



donde la gran liberación de calor y posterior enfriamiento producen dilataciones y contracciones que podrían fisurar el hormigón.



se utilizan cementos más "fríos" (mayor contenido en C_2S).



los cementos "calientes" (ricos en C_3S) son muy aptos para hormigonado de estructuras y pavimentación en tiempo frío.



La estabilidad química de los cementos ricos en C_3S es menor que la de los ricos en C_2S , porque el C_3S libera en su hidratación más $Ca(OH)_2$



B) (C_2S) Silicato Bicálcio o



C2S



B) Silicato Bicálcio o Belita.

Fórmula: $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S)

Su color es blanco y su proporción media en el clinker es del 15%.

Tampoco se encuentra puro en el clinker, sino que incorpora otros óxidos en su estructura.

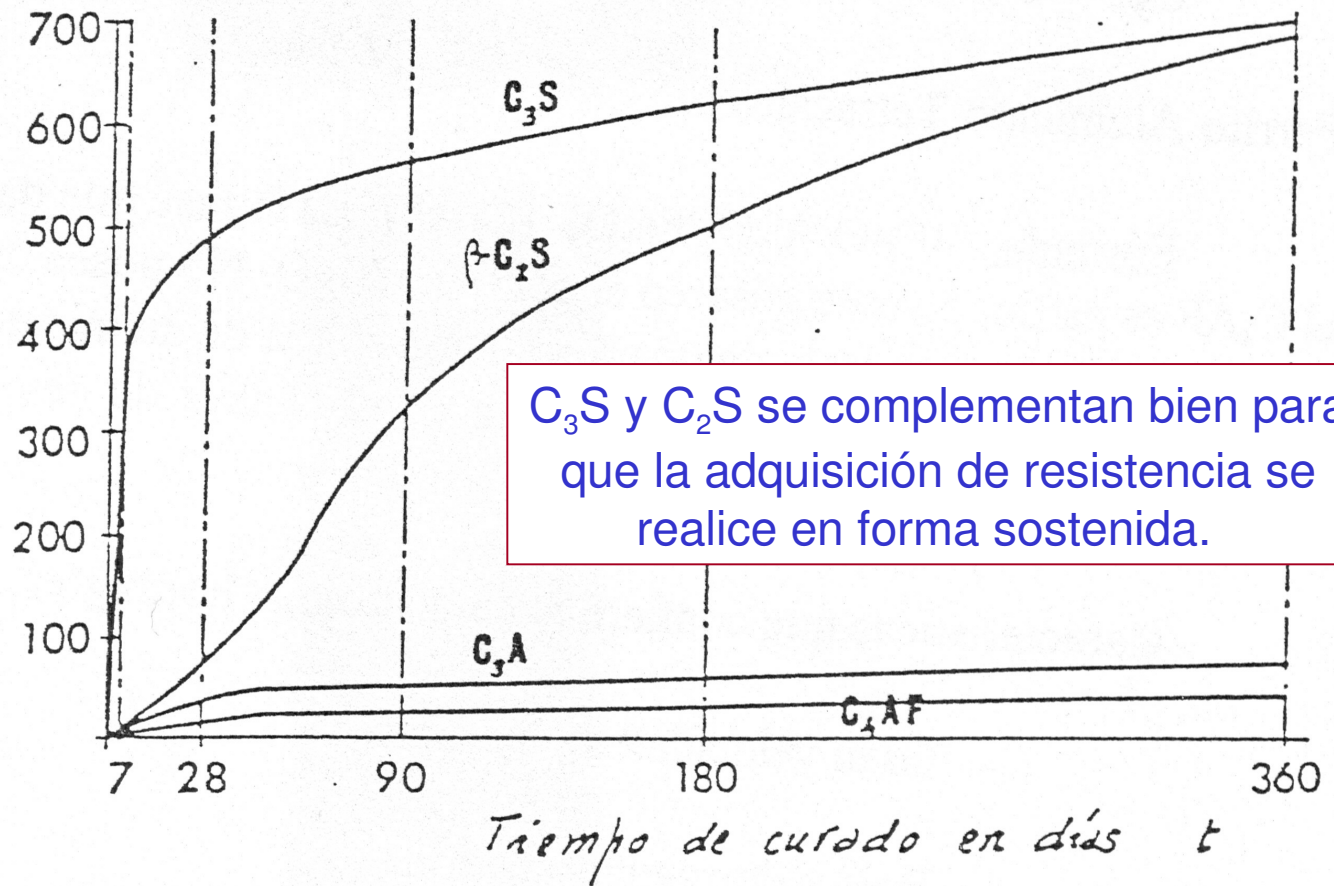
Características que confiere al cemento o al hormigón:

- Pequeña velocidad de hidratación.
- Bajo calor de hidratación.
- Resistencia mecánica buena a largo plazo.
- Estabilidad química buena, mejor que la del C_3S .



Los cementos ricos en C_2S son fríos (liberan poco calor), por lo que son útiles para hormigonar grandes masas.

Resistencia
a la
compresión
 Kp/cm^2
 R



C_3S y C_2S se complementan bien para que la adquisición de resistencia se realice en forma sostenida.

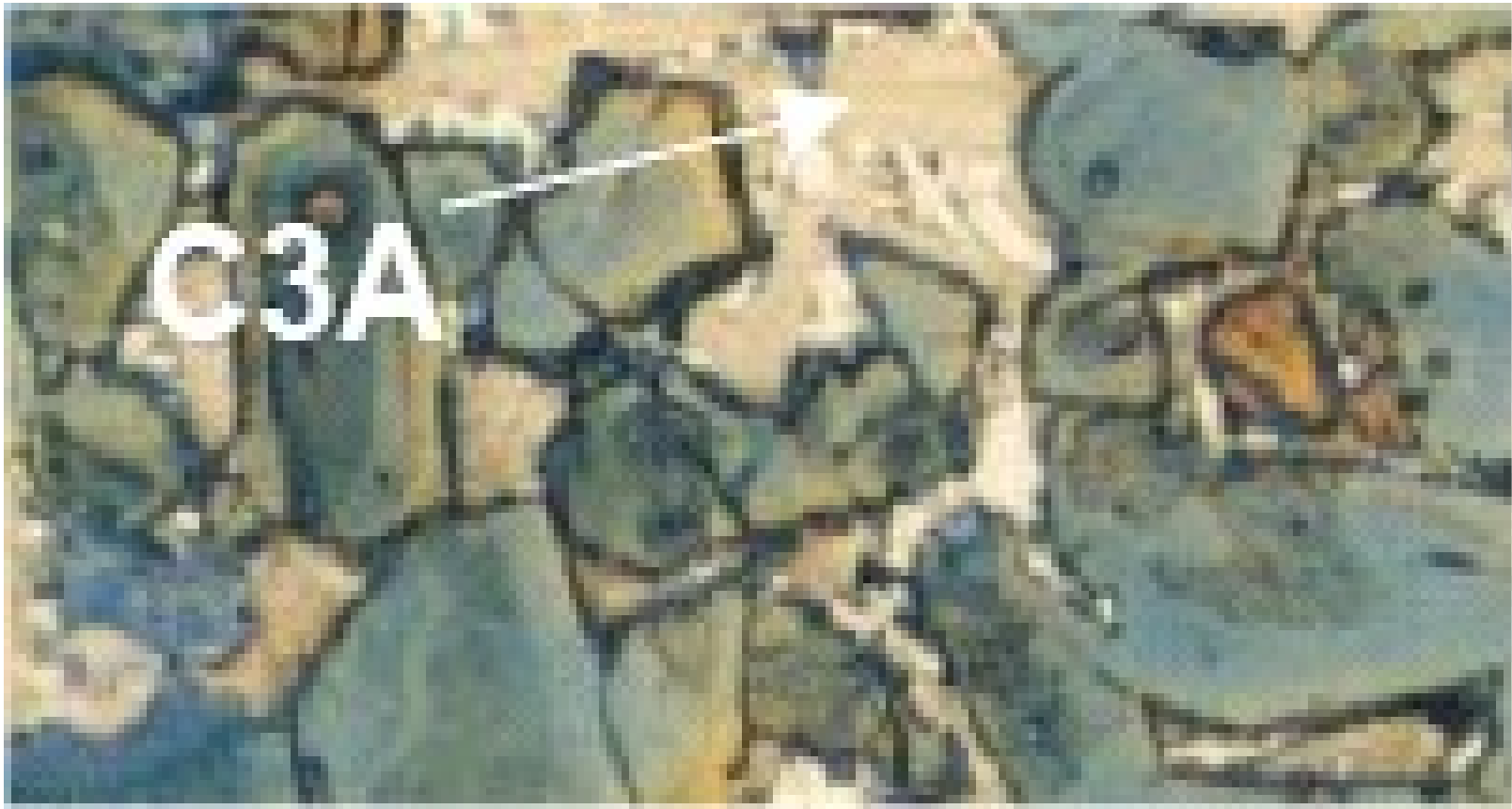
Proporcionan resistencia mecánica más lentamente que los ricos en C_3S .

Resistencia a compresión de los componentes del clinker de cemento Portland ensayados en las mismas

condiciones.



c) (C_3A) Aluminato Tricálcico.



C) Aluminato Tricálcico.

Fórmula: $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A).

Su color es blanco y su proporción media en el clinker es del 11 %.

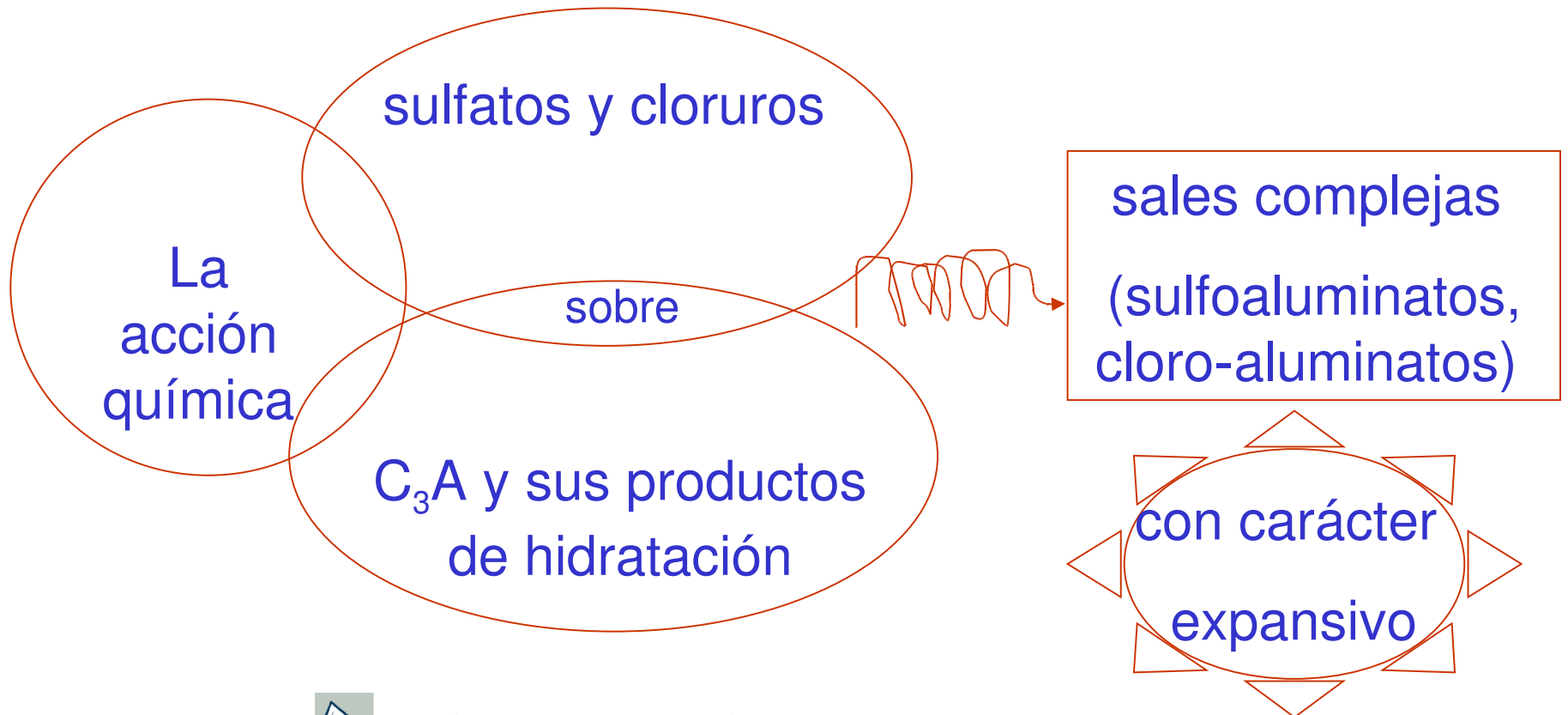
Contiene también óxidos extraños, incluyendo óxidos de metales alcalinos (Na_2O y K_2O).

Características que confiere al cemento o al hormigón:

- Muy elevada velocidad de hidratación.
- Muy elevado calor de hidratación.
- Proporciona escasa resistencia mecánica aunque lo hace bastante rápidamente.
- Produce retracción en la hidratación del cemento.
- Vulnerable a la acción química agresiva de aguas selenitosas (que contienen SO_4^{2-} ó Cl^-).



La velocidad de hidratación del C_3A es tan grande que es preciso añadir yeso al clinker en la fabricación del cemento Portland, para retrasar su fraguado:

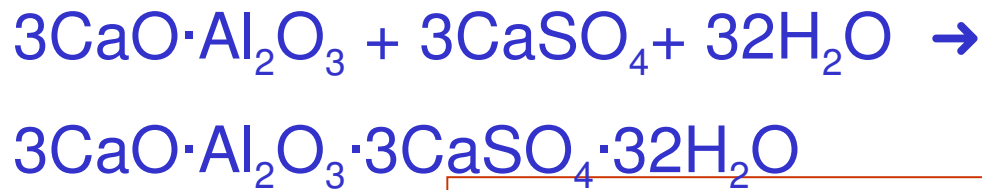
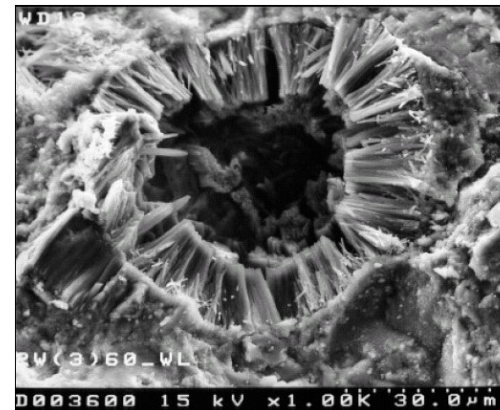
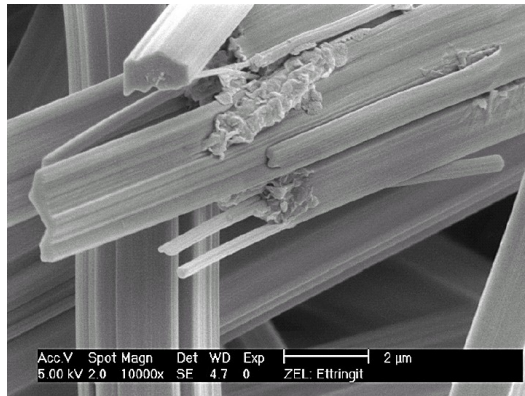


Por ejemplo

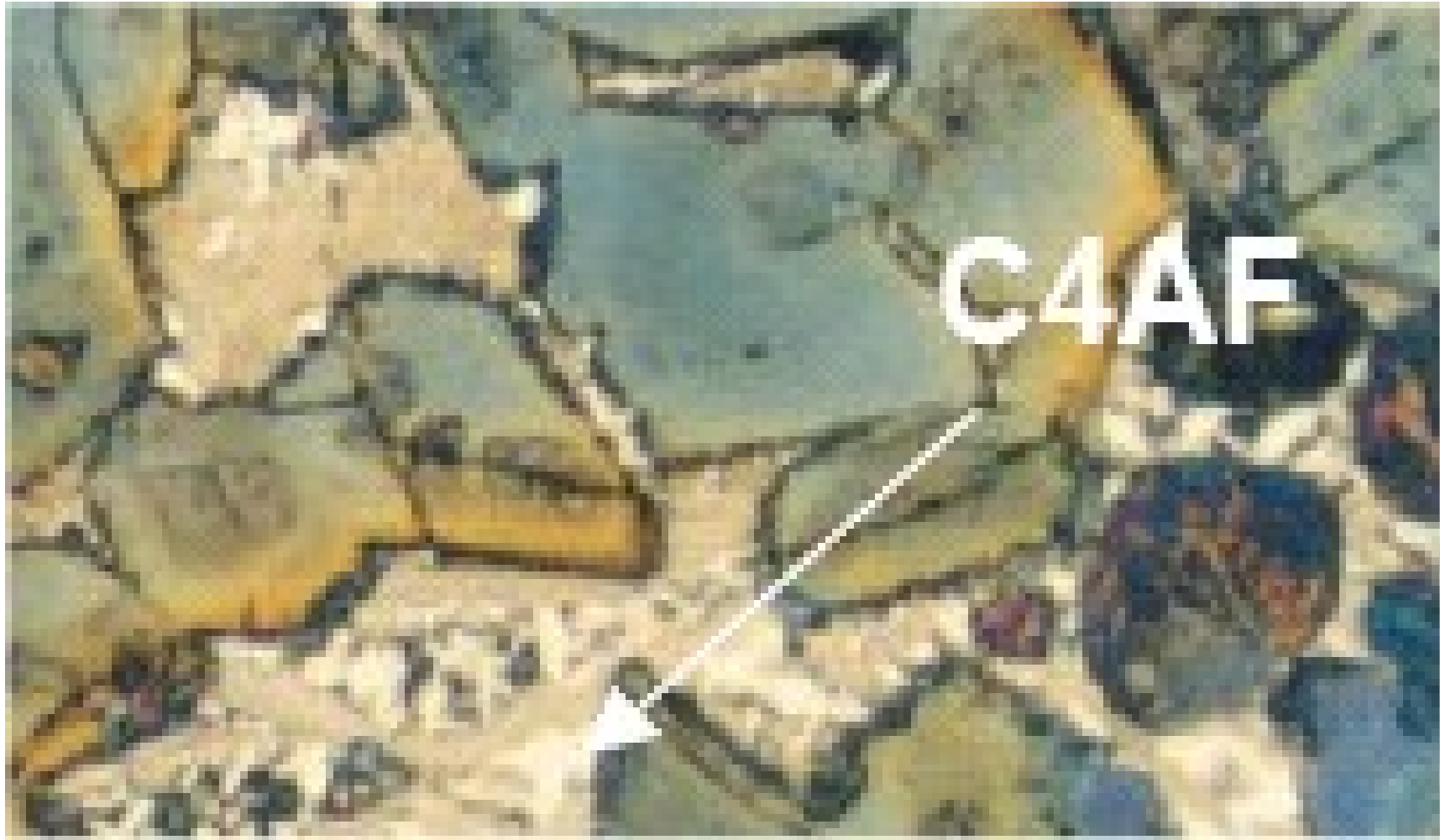


sulfato cálcico

Sal de Candlot o Ettringita
con un aumento de volumen del 227%.



D) (C_4AF) Ferrito Aluminato Tetracálcico (Celita).



D) Ferrito Aluminato Tetracálcico.

Fórmula: $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF)

Es la fase que da color al clinker, ya que el C_4AF es pardo, o verde grisáceo si contiene MgO .

No posee una composición química constante, sino que se trata de una disolución sólida de aluminato cálcico (C_2A) y ferrito cálcico (C_2F), cuya composición media en el clinker de cemento Portland C_4AF .

Contiene también óxidos extraños.



Características que confiere al cemento o al hormigón:

- Gran velocidad de hidratación.
- Bajo calor de hidratación.
- Confiere muy poca resistencia mecánica al hormigón.
- Estabilidad química buena frente a los sulfatos, siempre que el contenido de C_4AF no sea excesivo.



Fases cristalinas	Fórmula:	Color	Proporción media en el clínker	Impurezas	Velocidad de hidratación	Calor de hidratación	Resistencia s mecánicas	Estabilidad química
Silicato tricálcico (C3S)	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Blanco	60%	2% de óxidos extraños (magnesio, aluminio, hierro, etc.).	Alta	Elevado	Iniciales altas y finales buenas	Aceptable, aunque menor que la del C2S.
Silicato bicálcico (C2S)	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Blanco	15%		Pequeña	Bajo	Buena a largo plazo.	Buena, mejor que la del C3S.
Aluminato tricálcico (C3A).	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Blanco	11%	Óxidos extraños, incluyendo óxidos de metales alcalinos (Na_2O y K_2O).	Muy alta	Muy elevado	Escasa resistencia mecánica adquirida bastante rápido Produce retracción	Vulnerable a la acción química agresiva de agua selenitosas
Ferrito-aluminato tetracálcico (C4AF).	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	Pardo, o verde grisáceo si contiene MgO	Variable	Contiene óxidos extraños.	Alta	Bajo	Muy poca	Buena frente a sulfatos, si el contenido de C4AF no es excesivo.



E) Otras Fases del Clinker:

CaO y MgO libres.

En el clinker suele haber CaO libre en proporción menor o igual al 2%.

Es debido a una mala preparación de los crudos (muy gruesos o no homogéneos) en la fabricación del clinker; o a una cocción insuficiente (que no ha permitido su combinación total); o a un enfriamiento lento del clinker (que ha permitido la descomposición parcial del C_3S).



La cal libre es indeseable ya que puede causar expansiones en los morteros y hormigones endurecidos, debido a la siguiente reacción que transcurre con un aumento de volumen de aproximadamente un *100%*:



El MgO libre (periclasa) también da lugar a reacciones expansivas.

También pueden encontrarse en el clinker de cemento Portland pequeñas cantidades de sulfatos alcalinos (principalmente de *sodio* y *potasio*) y compuestos en estado amorfo o vítreo.



5.6.- Adiciones al clinker de cemento portland.

Los últimos pasos en la fabricación del cemento Portland consisten en la introducción de las adiciones y la molienda de la mezcla final a la finura adecuada.

Las adiciones son materiales naturales o artificiales que se mezclan con el clinker:

para disminuir la proporción de clinker en el cemento

para modificar algunas características físicas o químicas del cemento o del hormigón



Los diferentes tipos de adiciones son:

A) Adiciones activas.

A1) Puzolanas : naturales o artificiales.

A2) Puzolanas artificiales.

A21) Escorias de alto horno.

A22) Cenizas volantes.

A23) Humo de sílice.

B) Adiciones inactivas.

C) Yeso como retardante de fraguado.



A) Adiciones activas.

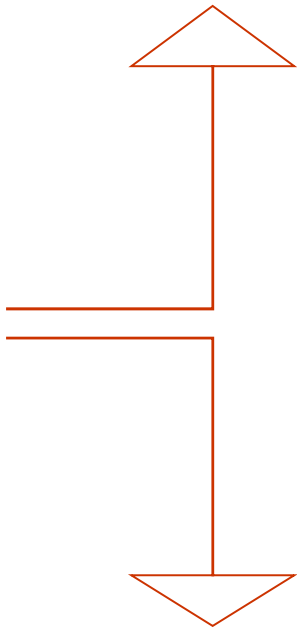


MEJORAN LAS CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO



M
E
J
O
R
A

Resistencia química
a los sulfatos



Abaratar su producción al disminuir las
cantidades de clinker necesarias

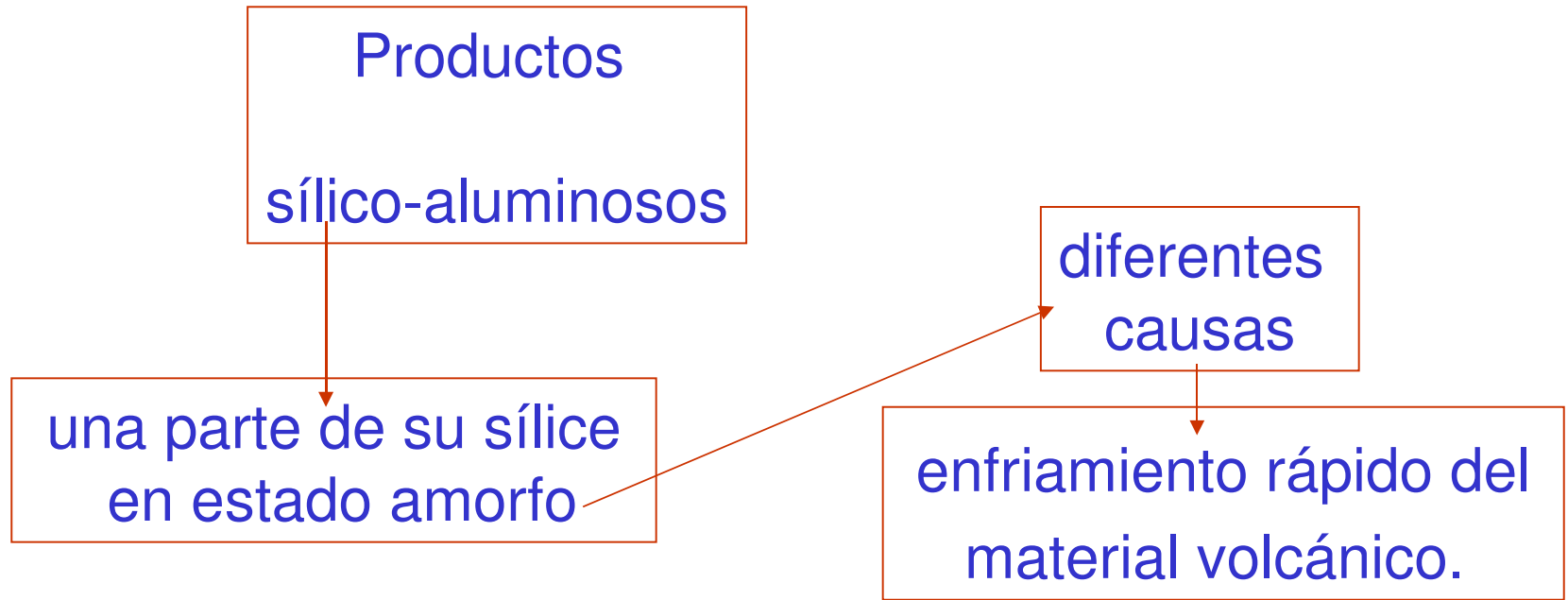
reduce el contenido de Ca(OH)_2
en el hormigón, con lo cual se
reduce la basicidad

C_3A y los iones sulfato forma
preferentemente
monosulfoaluminato cálcico

NO trisulfoaluminato (Ettringita),
efectos expansivos menores.



A1) puzolanas naturales o artificiales.



A su vez pueden clasificarse en:

Puzolanas naturales:



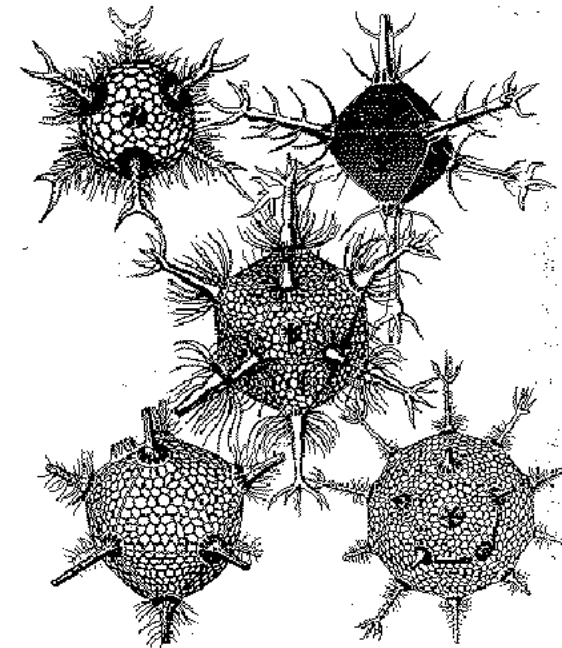
Puzolanas artificiales



-La lava de Pozzuoli fue usada como conglomerante por los romanos, mezcladas con cal



-También son puzolanas naturales ciertos materiales sedimentarios de origen animal o vegetal como depósitos de diatomeas, de radiolarios, etc.

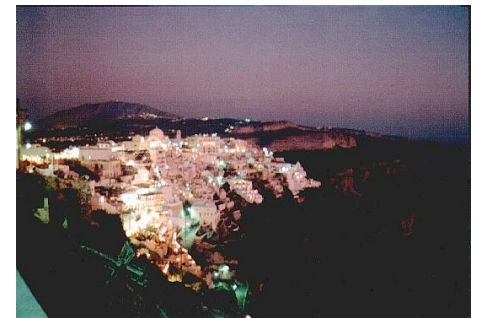


Puzolanas naturales:

de tipo volcánico como las presentes en Canarias, en la isla de Santorini en Grecia y en el subsuelo de Roma y en Pozzuoli (Italia).



Canarias



Santorini



Pozzuoli



-Puzolanas artificiales:

materiales inactivos en estado natural que pueden transformarse en activos por calcinación entre 500-1000°C y posterior molturación como cierto tipo de pizarras y arcillas.



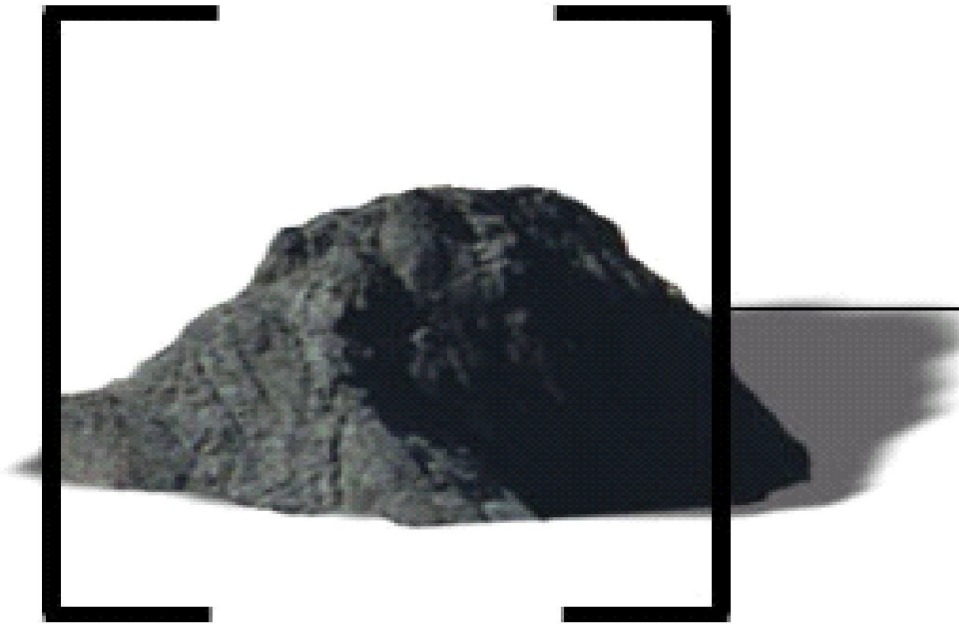
Pueden ser arcillas y pizarras calcinadas, así como los residuos de productos cerámicos;

y una serie de subproductos tanto industriales como agrícolas



A21) Escorias de alto horno.

Se producen en el enfriamiento rápido de la ganga de los minerales de hierro, en el alto horno, con lo que poseen SiO_2 vítrea



Escoria de Alto Horno

pueden reaccionar
con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$
produciendo
endurecimiento
hidráulico.

A22) Cenizas volantes.

Son partículas prácticamente amorfas, en cuya composición predominan SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , que se obtienen por precipitación del polvo que sale de los hornos de centrales hidroeléctricas donde se consume carbón.



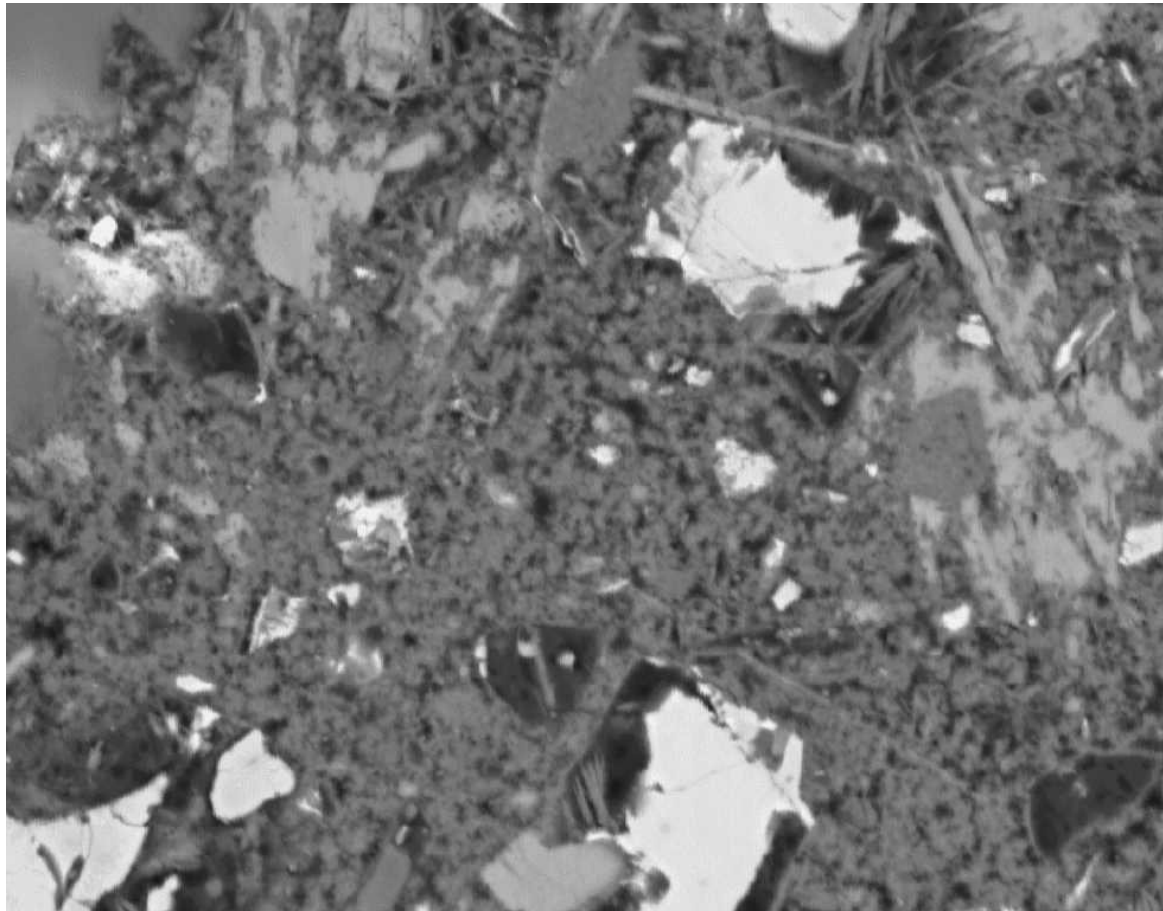
Contienen sílice vítrea.

Un problema que presentan es la presencia de partículas inquemadas de carbón, que afectan negativamente al comportamiento del cemento.



A23) Humo de sílice.

Es un subproducto de la fabricación de semiconductores a base de silicio. Contiene SiO_2 casi puro.



B) Adiciones inactivas.

No reaccionan con ninguno de los productos de hidratación del cemento, por lo que no proporcionan capacidad conglomerante.

Su única finalidad es mejorar algunas propiedades físicas del hormigón, por ejemplo disminuir la retracción.

La más importante es la caliza, aunque también se han usado cuarzo y areniscas.



C) Yeso como retardante de fraguado.

La adición de yeso es necesaria para retardar el fraguado del cemento Portland, en particular del C_3A que es el componente que se hidrata más rápidamente.

El yeso se añade en forma de dihidrato en una proporción tal que el contenido máximo de SO_4^{2-} en el cemento sea del 4% aproximadamente.

Esto consigue retrasar el fraguado en unos 45 minutos, tiempo necesario para situar el hormigón fresco en obra y darle forma antes de su endurecimiento.

El efecto retardante parece deberse a la formación de Ettringita (trisulfoaluminato cálcico hidratado), sal que precipita bloqueando temporalmente la hidratación de los gránulos de C_3A .



CURIOSIDAD

El azúcar es un material que retarda el fraguado del hormigón, por lo cual puede ser utilizado en los casos en que sea necesario detener el fraguado de éste.

Por ejemplo, cuando se presenta un problema mecánico en un camión de que transporta 6m^3 de hormigón, para no dañar su cuba mezcladora, es suficiente adicionar 7 kg de azúcar.

Los aditivos retardantes contienen azúcar en cantidades muy bajas.

<<Los conductores de las hormigoneras suelen llevar el "retardante eterno" en el camión: unos paquetes de azúcar de kilo porque el azúcar impide que el hormigón fragüe, cosa muy útil en caso de que la hormigonera "pinche" o se averíe, y si le fragua el hormigón en la cuba no veas que risa>>



5.7.-Molienda final del cemento.

La mezcla final de clinker, adiciones y yeso debe ser molida al grado de finura adecuado.

Cuanto más fina sea la granulometría del cemento (menor tamaño de las partículas)

la evolución de resistencias mecánicas en el hormigón es más rápida

La explicación →

la mayor superficie específica (cm^2/g) de las partículas de menor tamaño.

La finura de molido del cemento se mide por tamizado o bien mediante la permeabilidad al aire de un lecho de cemento (método Blaine).



5.8.-Hidratación del cemento portland.

Cuando se ponen en contacto el cemento, el agua y los áridos se producen las reacciones químicas de hidratación de los componentes del clinker, que son las responsables del fraguado y endurecimiento del hormigón o mortero.



Existen dos teorías o líneas que tratan de explicar estos procesos:

A.- Teoría de Le Chatelier o "cristalina" (1882).

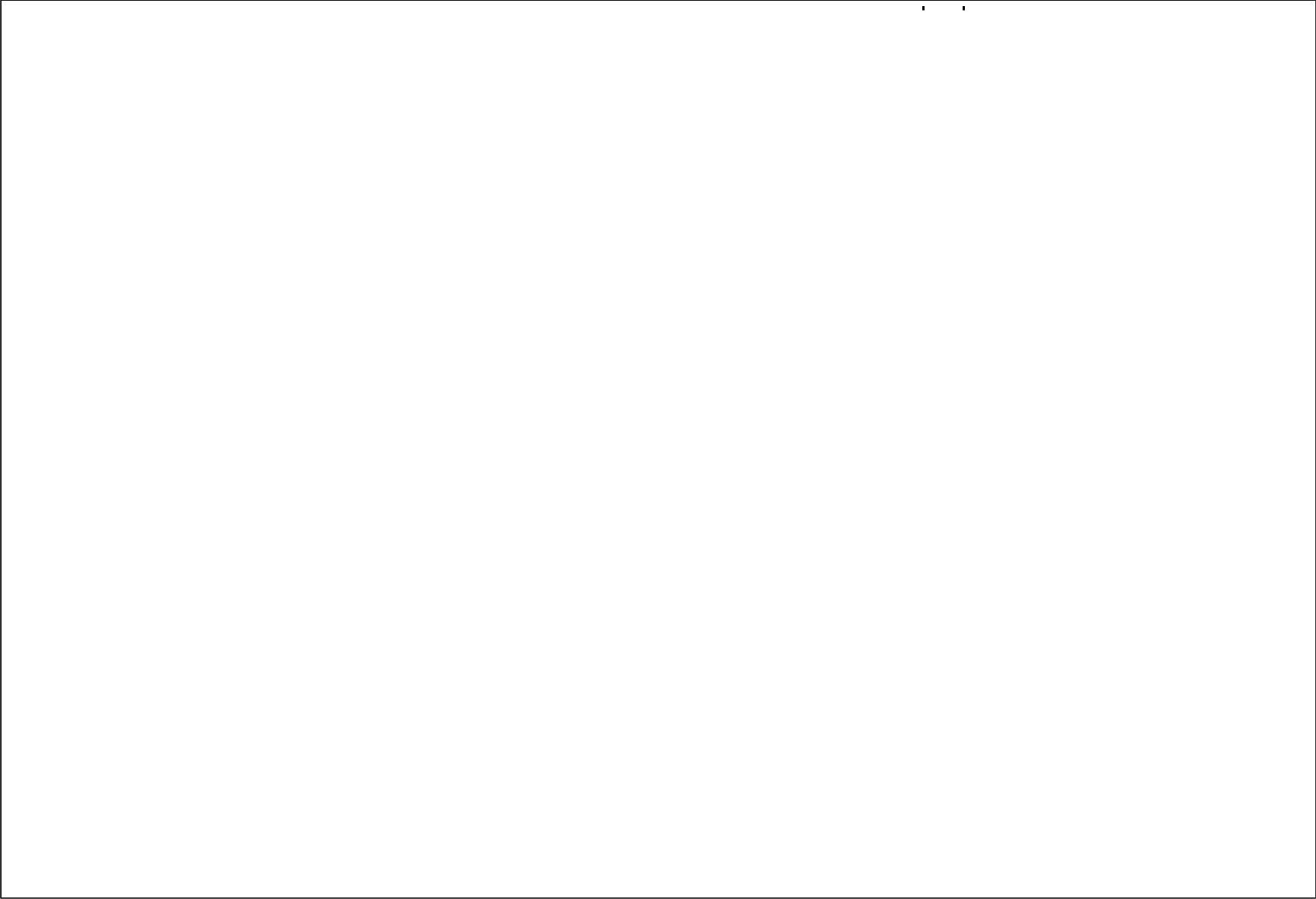
Al ponerse en contacto el cemento con el agua se disuelven los componentes del clinker.

En la disolución se forman sales hidratadas que son menos solubles que los compuestos anhidros del clinker.

Se produce una precipitación de estas sales hidratadas, lo que permite que se vayan disolviendo progresivamente los componentes del clinker.

El fraguado y endurecimiento se deberían a la adhesión ~ cohesión y entrecruzamiento de los cristales formados.







C/S hydratisiert, w/b-Wert=0.4, 4888x

3µm



C/S hydratisiert, w/b-Wert=0.52, 4888x

3µm



C/S hydratisiert, w/b-Wert=0.6, 4888x

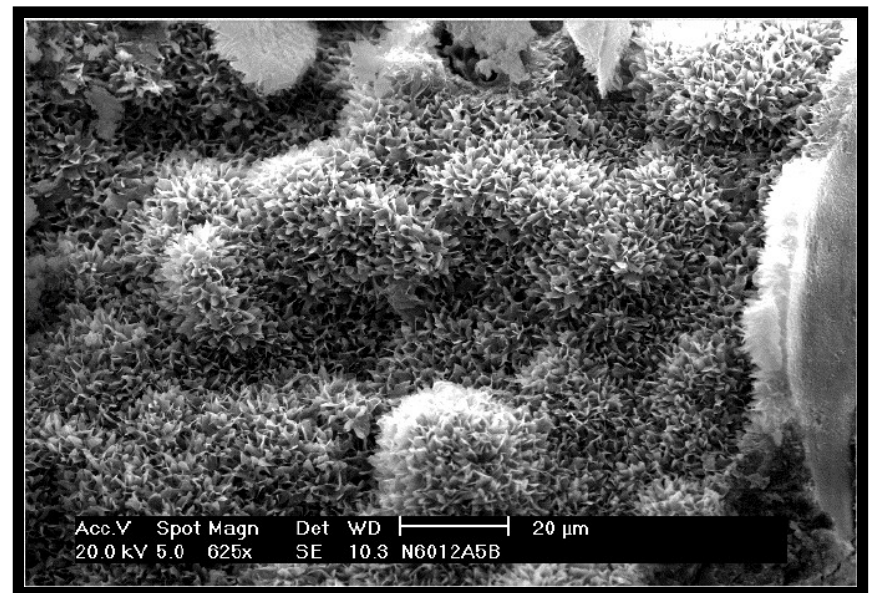
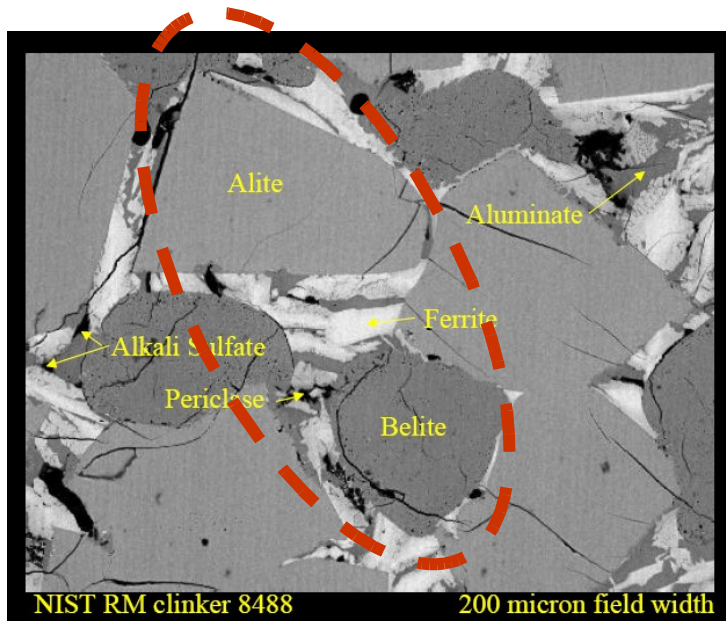
3µm

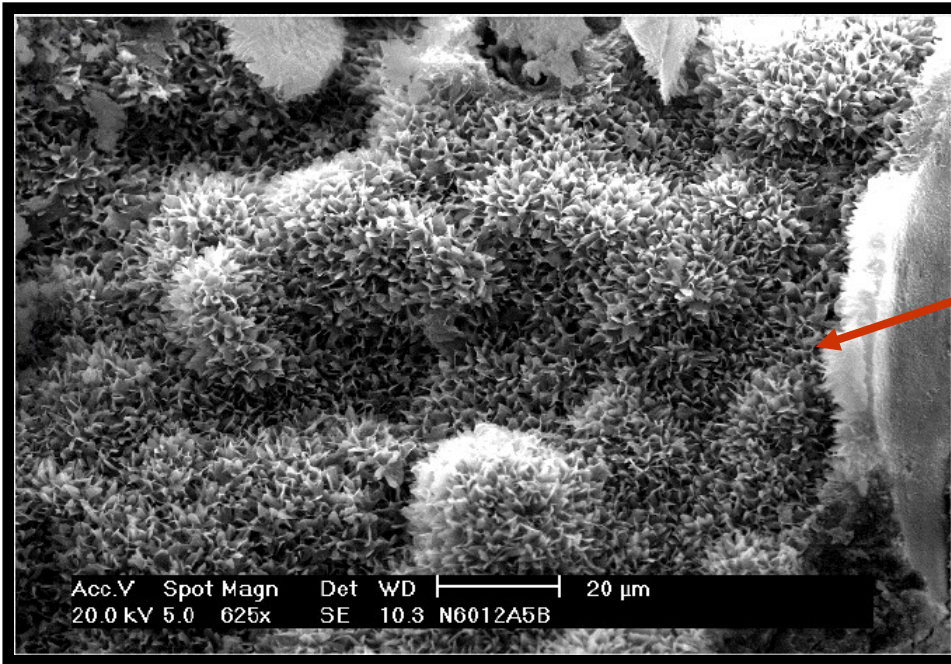


B.-Teoría de Michaelis o "coloidal" (1892).

En la hidratación del cemento se forman sustancias cristalinas.

Sin embargo los silicatos cálcicos, que son bastante insolubles, forman geles amorfos.





Estos geles tienen gran capacidad de absorción de agua y aumento de volumen.

El endurecimiento se debe a la deshidratación del gel.

Se ha podido demostrar que en la hidratación del cemento se forman sustancias cristalinas y coloidales (geles).

Actualmente se acepta una síntesis de ambas teorías, que se consideran complementarias.



Se sabe que la relación (A/C) juega un papel importante:

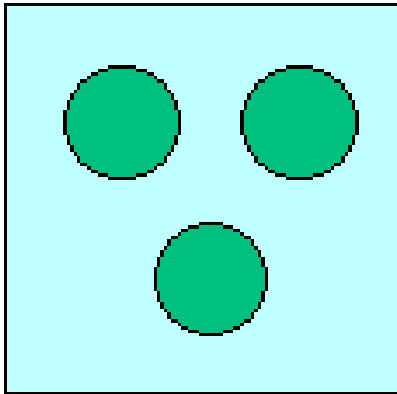
$$\frac{A}{C} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa cemento}}$$

Con $A/C \leq 0,25$ se forman fundamentalmente gel.

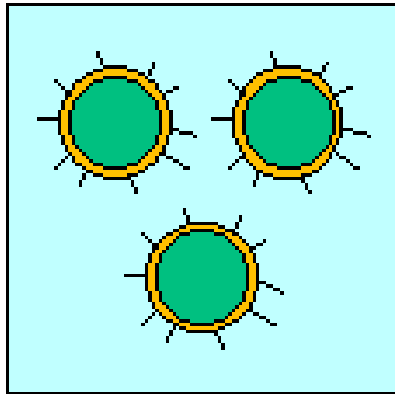
Con $A/C > 1$ se forman fundamentalmente sustancias cristalinas.



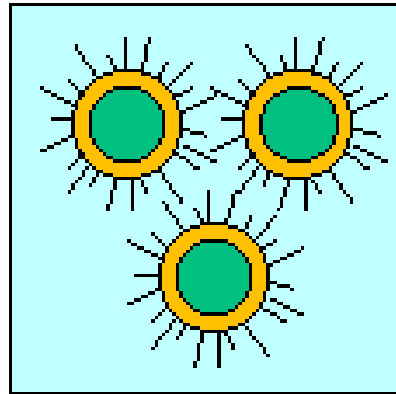
Alta a/c



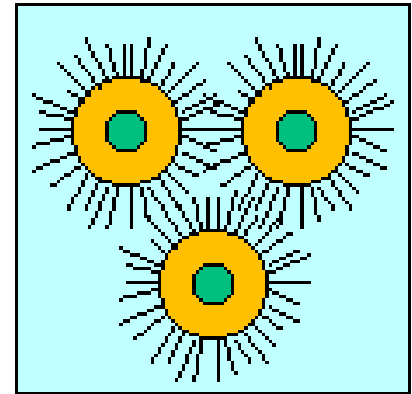
T = 0



T = minutos

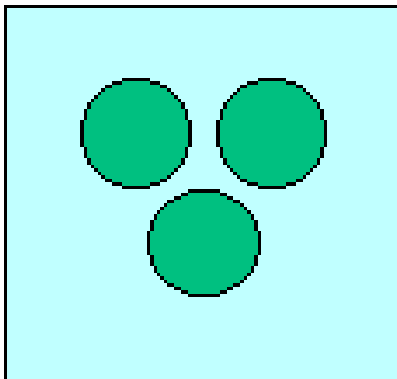


T = horas

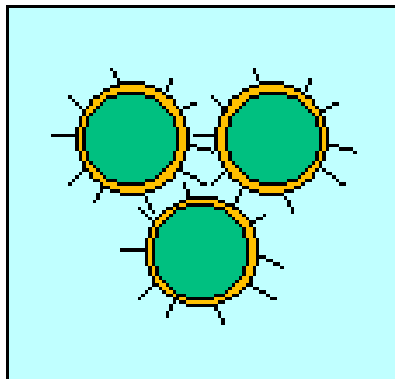


T = días

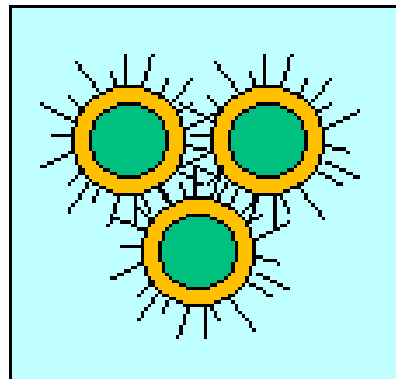
Baja a/c



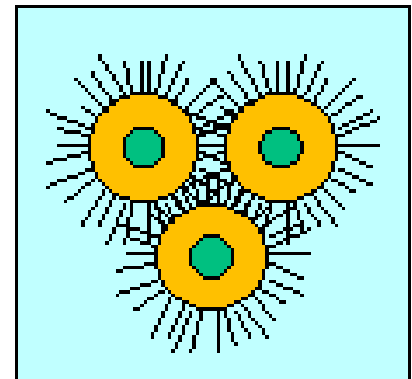
T = 0



T = minutos



T = horas



T = días



Parece que

la formación de
materia coloidal

contribuye más al aumento de la
resistencia mecánica de la pasta
endurecida

También se sabe
que el proceso de
hidratación puede
ser muy largo

En los hormigones,
incluso al cabo de muchos
años,
se encuentran partículas de
clinker sin reaccionar



Las reacciones de hidratación de los componentes del cemento son:



1.-El C_3S

produce silicatos cálcicos
hidratados que casi siempre
tienen carácter coloidal
(se les llama tobermoritas o
fases CSH)

hidróxido cálcico cristalino
(portlandita)



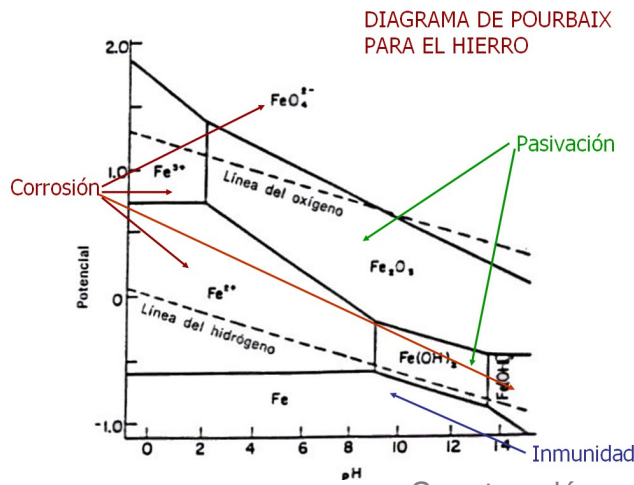
2.- El C_2S da los *mismos* productos, aunque menor cantidad de portlandita.



El gel CSH es el principal responsable del desarrollo de resistencia y de la durabilidad del hormigón

El $Ca(OH)_2$ (hidróxido de calcio) es muy poco resistente desde el punto de vista mecánico, es vulnerable a la presencia de aguas puras, sulfatos y otros agentes

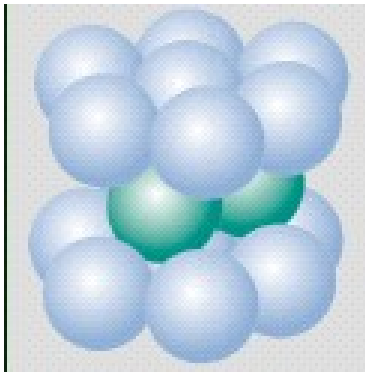
pero resulta fundamental en la protección de las armaduras frente a la corrosión debido al alto nivel alcalino que aporta al hormigón (aproximadamente un $pH = 12,5$).



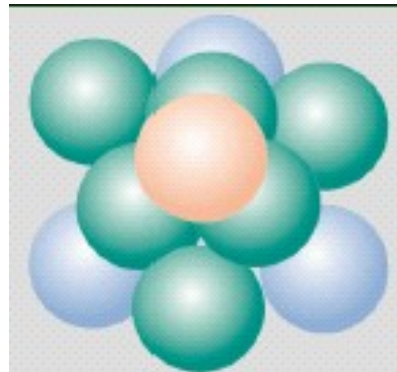
3.- El C_3A forma aluminatos cálcicos cristalinos, algunos son estables (los que cristalizan en el sistema cúbico) y otros metaestables (hexagonales).



C_3AH_6
(cúbico, estable)



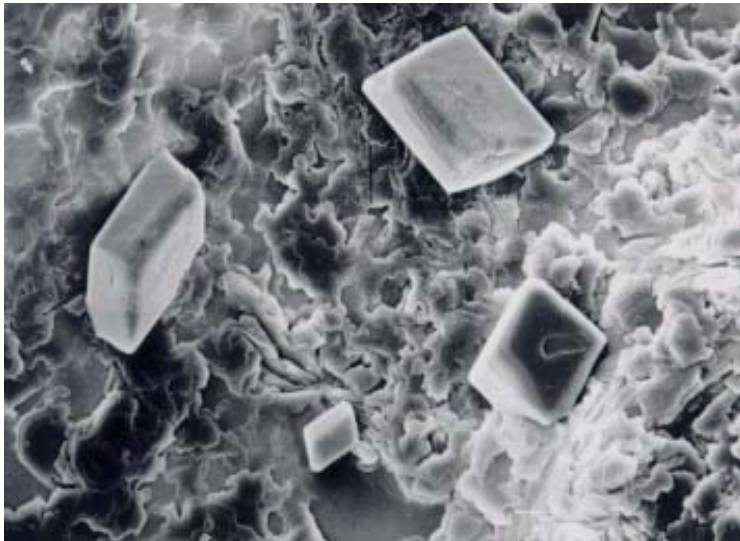
hexagonales



cúbico



Una relación (A/C) elevada favorece "la formación de aluminatos hexagonales y un valor bajo la formación de los cúbicos.



Los aluminatos hexagonales pueden experimentar a largo plazo una "conversión" en la que se transforman en cúbicos y liberan agua.



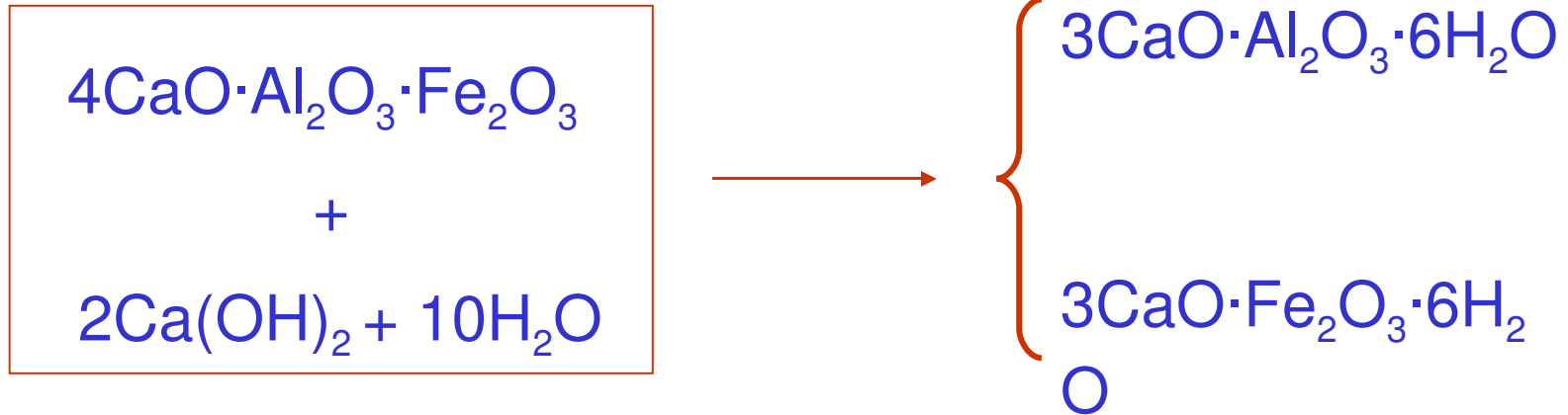
Los aluminatos cúbicos son menos voluminosos que los hexagonales debido a la pérdida de agua.

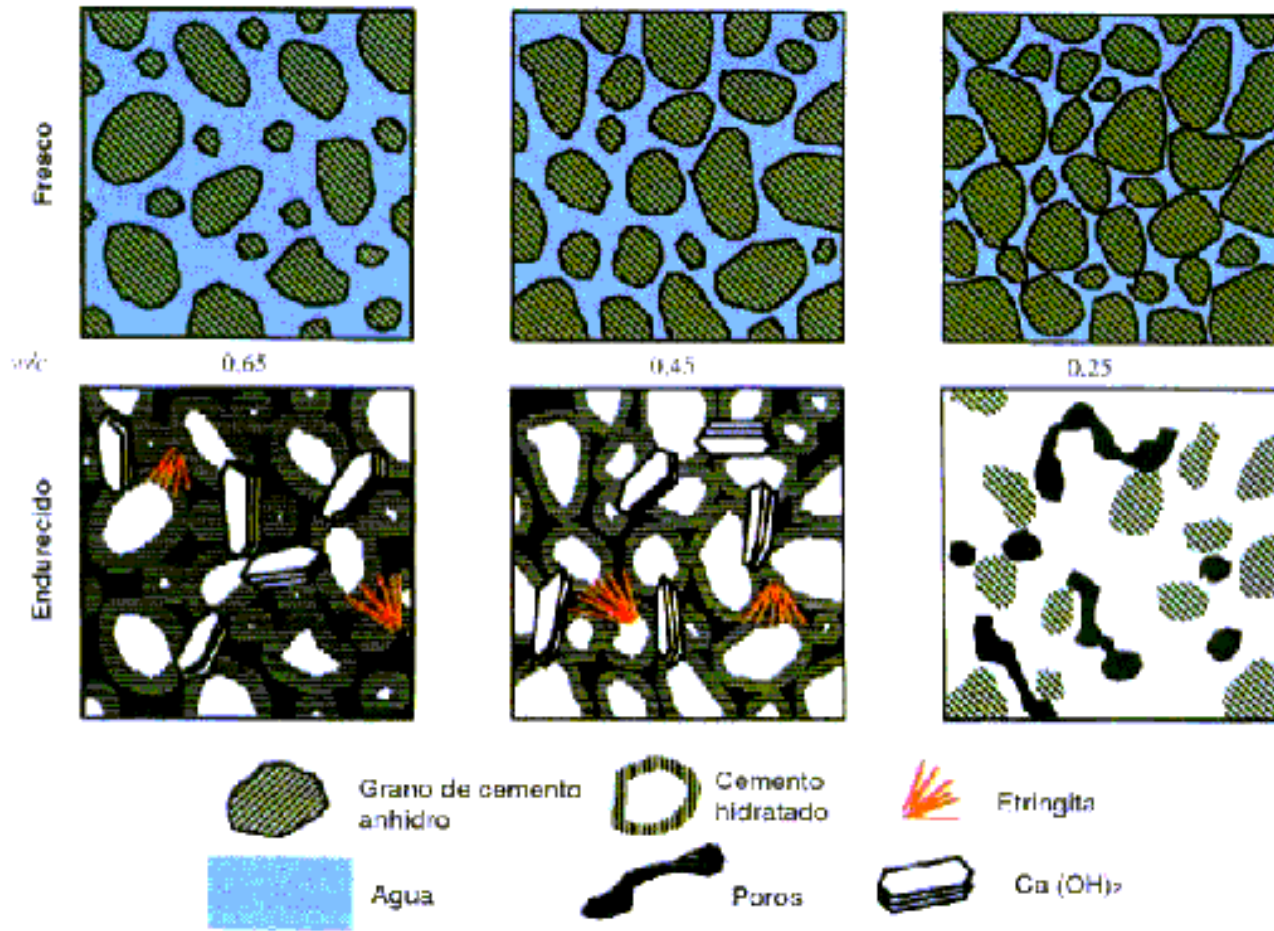
Esto hace que esta "conversión" vaya acompañada de una disminución del volumen ocupado por los sólidos en el hormigón y por tanto una pérdida de compacidad, aumento de la porosidad y disminución de las resistencias mecánicas.

En el hormigón de cemento aluminoso se puede producir también una "conversión" similar que es la causa principal del proceso de deterioro conocido como "aluminosis".



4.-El C₄AF produce aluminatos cálcicos y ferritos cálcicos.





cuando más baja es la relación a/c, más bajo será el volumen de poros de la pasta, por lo tanto si pensamos a que la resistencia del cemento u hormigón sigue las reglas de la resistencia de cualquier material sólido, es de esperar que la misma dependa de la relación entre "vacíos" y "llenos"



5.- El papel del yeso, como retardador de fraguado, consiste en disminuir la velocidad de hidratación, sobre todo del C_3A .

Se cree que el mecanismo responsable de este efecto es la formación de "Sal de Candlot" o "Ettringita" que bloquea superficialmente las partículas de C_3A impidiendo su hidratación a una velocidad excesiva.



Yeso
↓



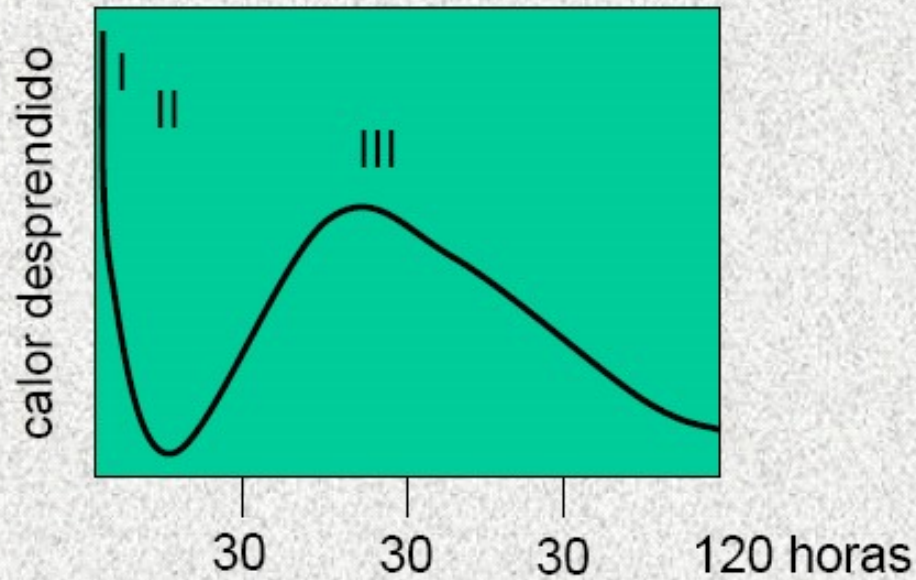
Sal de Candlot o Ettringita
 $C_3A \quad Cs_3H_{32}$



hidratación del cemento

hidratación:

- Conversión de agua libre en agua de combinación (*I*)
- Precipitación de compuestos insolubles (hidratos): *Fraguado (II)*
- Sustitución isomórfica de metales en las fases de la pasta de cemento hidratada (cristalización): *Endurecimiento (III)*



Las reacciones que se llevan a cabo son:

Componente		Productos de hidratación
$2(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2) + 6\text{H}_2\text{O}$ Silicato tricálcico + agua	\longrightarrow \longleftarrow	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{Ca}(\text{OH})_2$ Gel de tobermorita + hidróxido de Calcio
$2(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2) + 4\text{H}_2\text{O}$ Silicato dicálcico + agua	\longrightarrow \longleftarrow	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ Gel de tobermorita + hidróxido de Calcio
$4\text{Ca}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3 + 10\text{H}_2\text{O} + 2\text{Ca}(\text{OH})_2$ Ferrialuminato tetracálcico + agua + hidróxido de calcio	\longrightarrow \longleftarrow	$6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ $\text{Ca}(\text{OH})_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Ferrialuminato tetracálcico hidratado
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ Aluminato tricálcico + agua + hidróxido de Calcio	\longrightarrow \longleftarrow	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}(\text{OH})_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Aluminato tricálcico hidratado
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\text{H}_2\text{O} + \text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Aluminato tricálcico + agua + yeso	\longrightarrow \longleftarrow	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Monosulfoaluminato cálcico

Tabla No. 5 Productos de hidratación del cemento²³



La hidratación de los silicatos cálcicos del cemento forma moléculas voluminosas que consumen agua y liberan Ca(OH)_2 , mientras que los aluminatos consumen el hidróxido en su reacción de hidratación.

Debido a la generación de Ca(OH)_2 y la presencia de álcalis como NaOH y KOH la composición de los poros en el cemento/hormigón alcanza valores de alcalinidad entre 12.5 y 13.5.

La pasta de cemento pasa por dos etapas: el fraguado y el curado, que es donde se lleva a cabo la hidratación, la cual es de vital importancia en una estructura de concreto, ya que le ayuda a alcanzar mejores propiedades mecánicas.



El hormigón para fraguar y endurecer necesita una cierta cantidad de agua que reacciona químicamente con el cemento.

En las superficies expuestas al **SOL** y principalmente al **VIENTO**, el agua del hormigón se pierde rápidamente por evaporación, lo cual puede producir fisuras y grietas e impedir que el hormigón alcance la resistencia esperada.

Mantener el hormigón húmedo se denomina: "**CURADO DEL HORMIGON**".

Este **CURADO** deberá comenzar inmediatamente después de efectuadas las operaciones de terminación de las superficies expuestas.

El agua para el **CURADO** debe ser potable.

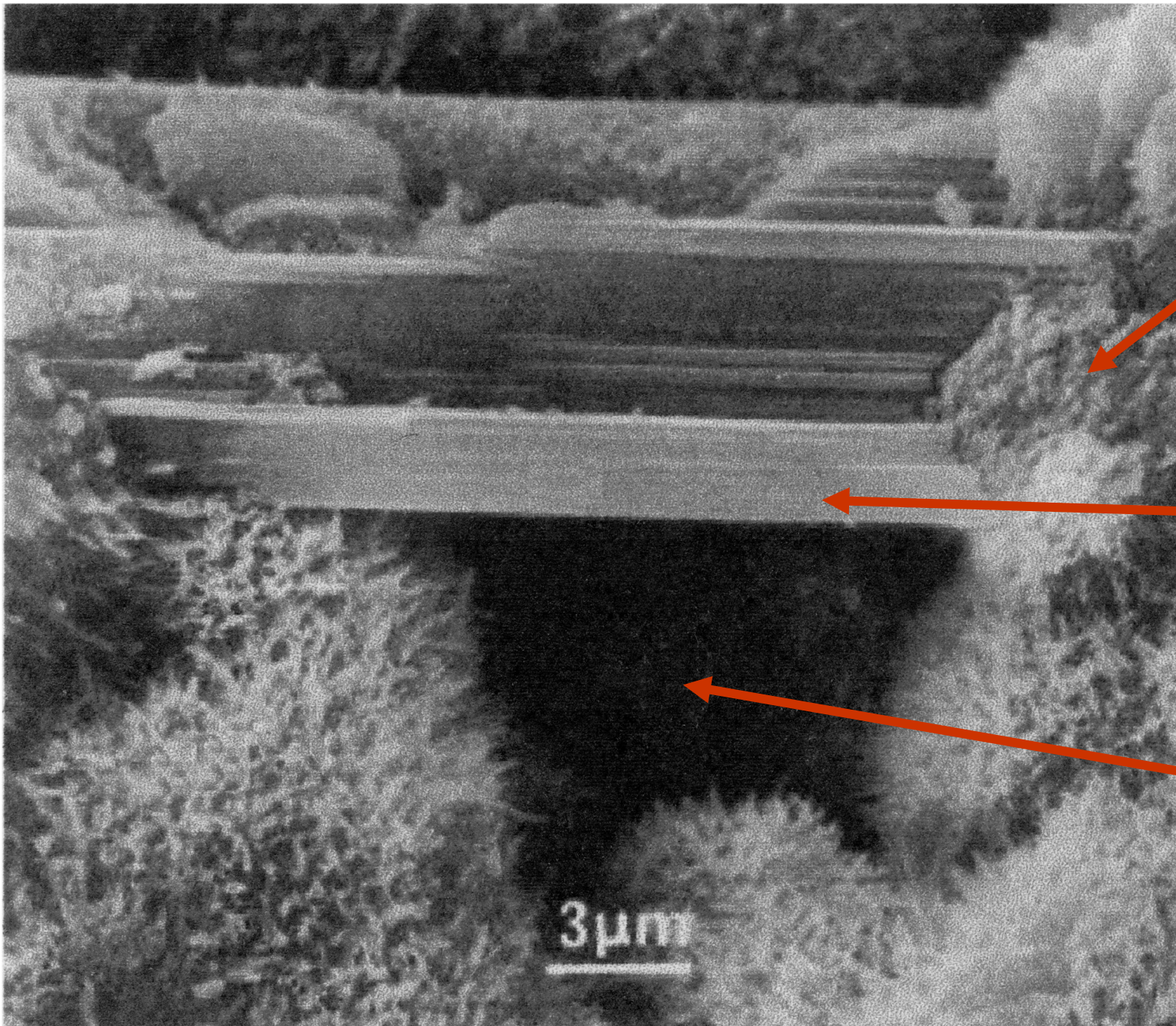


El **CURADO** deberá durar entre 7 y 10 días para hormigones. En clima muy seco y caluroso, aumentar en un 50% los plazos.

El viento y el calor del sol evaporan rápidamente el agua en las superficies expuestas del hormigón.

EVITE QUE ESTO OCURRA.





CSH

Ca(OH)₂

Huecos

3 μm

