

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

" CEMENTO PUZOLANICO "  
( Trabajo monográfico )

FERNANDO HERRERA PEREZ

QUIMICO

1 9 8 2



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## I N D I C E

INTRODUCCION.	2
1.- CONCRETO.	6
1.1 Cemento. . . . .	7
2.- TIPOS DE CEMENTO	
2.1 Clasificación. . . . .	9
3.- CEMENTO PORTLAND	10
3.1 Componentes	
3.1.1 Silicato tricálcico. . . . .	14
3.1.2 Silicato dicálcico . . . . .	15
3.1.3 Aluminato tricálcico . . . . .	16
3.1.4 Ferrito-aluminato tetracálcico . . . . .	17
3.1.5 Cal libre y magnesia . . . . .	19
3.1.6 Compuestos alcalinos . . . . .	20
3.2 Yeso. . . . .	21
3.3 Finura . . . . .	23
3.4 Características del concreto. . . . .	25
4.- HIDRATACION DEL CEMENTO.	26
4.1 Silicatos. . . . .	28
4.2 Aluminatos . . . . .	29
4.3 Oxido de calcio y óxido de magnesio. . . . .	30
5.-ADITIVOS	32
5.1 Definición . . . . .	33
5.2 Usos. . . . .	34
5.3 Clasificación. . . . .	36
6.- PUZOLANAS	
6.1 Antecedentes históricos. . . . .	38
6.2 Definición. . . . .	40
6.3 Clasificación. . . . .	41
6.4 Pozolanas naturales. . . . .	41
6.5 Pozolanas artificiales . . . . .	43
6.6 Clasificación A.S.T.M. . . . .	45

PUZOLANAS	
6.7 Composición química. . . . .	46
6.8 Propiedades químicas . . . . .	48
6.9 Propiedades físicas. . . . .	51
7.- ACTIVIDAD PUZOLANICA	
7.1 Primer criterio. . . . .	52
7.2 Segundo criterio . . . . .	53
7.3 Tercer criterio . . . . .	55
7.4 Cuarto criterio . . . . .	55
7.5 Efectos de la temperatura. . . . .	56
7.5.1 Tierras diatoméas . . . . .	56
7.5.2 Silícitos. . . . .	57
7.5.3 Arcillas coloidales. . . . .	57
7.5.4 Arcillas caolínicas. . . . .	58
7.5.5 Arcillas de cenizas volcánicas . . . . .	58
7.6 Diagrama en la hidratación del cemento . . . . .	60
7.7 Medida de la actividad. . . . .	61
7.7.1 Algunos criterios de evaluación . . . . .	62
8.- CEMENTO PUZOLANICO	
8.1 Combinación cemento portland-puzolana. . . . .	71
8.2 Propiedades de la puzolana en el concreto. . . . .	72
8.2.1 Trabajabilidad. . . . .	72
8.2.2 Resistencia a aguas agresivas . . . . .	73
8.2.3 Calor de hidratación. . . . .	73
8.2.4 Permeabilidad. . . . .	73
8.2.5 Reacción álcali-agregado . . . . .	73
8.2.6 Resistencia mecánica a la tensión. . . . .	74
8.2.7 Resistencia mecánica a la compresión , . . . .	74
8.2.8 Rendimiento. . . . .	74
8.2.9 Temperatura. . . . .	75
8.3 Pruebas, efectos y resultados. . . . .	76
9.- REACCION ALCALI-AGREGADO.	
	77

<b>10.- RESISTENCIA A LOS SULFATOS.</b>	
10.1 Sulfato de sodio. . . . .	79
10.2 Sulfato de magnesio . . . . .	81
10.3 Sulfato de calcio . . . . .	82
<b>11.- CORROSION DEL CONCRETO</b>	
11.1 Aspectos generales. . . . .	85
11.2 Corrosión Tipo I. . . . .	85
11.3 Corrosión Tipo II . . . . .	87
11.4 Corrosión Tipo III. . . . .	88
11.5 Otros agentes de agresión . . . . .	88
11.6 Una solución. . . . .	89
<b>12.- CONCLUSIONES.</b>	<b>90</b>
<b>13.- BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>94</b>

## I N T R O D U C C I O N

Cuando contemplamos las modernas y espectaculares construcciones que continuamente se erigen a nuestro alrededor, reconocemos en ellas el ingenio del hombre. Percibimos su claro dominio sobre la técnica y la materia. Ante nuestros ojos se eleva la vasta imaginación de su mente creativa, y advertimos la inquebrantable fuerza realizadora que lo anima en sus obras.

Pero al admirar esas extraordinarias construcciones vértices de ciencia y tecnología no olvidemos ese elemento que utilizaron los realizadores para la ejecución de tan audaces proyectos sin el cual no hubiera sido posible su edificación. Me refiero al concreto y particularmente, a su elemento fundamental: el cemento.

En México la industria del cemento representa una de las actividades de mayor importancia dentro de la economía del país, como una industria básica que ha coadyuvado a su desarrollo económico, tecnológico y social.

La trayectoria de la industria cementera ha sido paralela al desenvolvimiento de la industria mexicana de la construcción, y participa en el mismo proceso por medio del cual la capacidad técnica y creativa de los constructores mexicanos ha hecho posible la realización de importantes obras de infraestructura, a través de los programas de vivienda, electrificación, carreteras, irrigación, urbanismo, etc.

En lo que respecta al panorama económico y social de nuestro país, como ya apuntamos, el papel que desempeña la industria del cemento es básico para su desarrollo, por lo que esta industria debe continuar creciendo con el mismo dinamismo que la ha caracterizado desde sus inicios.

En cuanto a su futuro, debido al ritmo de crecimiento en el consumo de cemento así como a la programación de obras, se espera una fuerte demanda de este producto para los próximos años.

Con el fin de tener una idea de la magnitud del incremento, se efectuó un estudio, con proyección hasta el año 2000. Que en base a la demanda , producción y de acuerdo al crecimiento del producto interno bruto y al futuro desarrollo de la industria de la construcción propone que, para 1982 deberán de producirse más de 20,000,000 de toneladas de cemento.(59)

Tomando en cuenta la amplia demanda que este producto tendrá en los años venideros es necesario dar mayor importancia a su elaboración, y en especial a tres aspectos (no por ello el resto es menos importante) que son:

-La materia prima (caliza, barro, sílice, mineral). Es una ventaja que las reservas de materia prima en nuestro país para la fabricación de cemento sean enormes. Pero, aunque actualmente todos los materiales de la corteza terrestre, e incluso residuos y subproductos industriales puedan emplearse para diferentes usos, no todos esos materiales son aprovechables para fabricar cemento. Es por ello que la explotación de las canteras requiere de minuciosos estudios geológicos previos, para de esta manera tener una distribución adecuada del material y poder evitar así males posteriores. Un estudio mineralógico y análisis químico de la materia prima, permitira determinar la calidad del crudo para obtener así una óptima eficiencia en el proceso y mejorar la calidad del producto terminado.

-Calidad del cemento. Mejorar las propiedades del cemento es siempre un reto para el fabricante:

- trabajabilidad.
- resistencia mecánica.
- estabilidad de volumen.

-calor de hidratación.

-permeabilidad

-resistencia química.

y al lograr esto se tiene una forma de extender su campo de acción.

-Costo. La energía en todas sus formas, es uno de los aspectos principales que en la fabricación de cemento eleva su costo. Antes de la crisis energética, se estimaba que esta partida insumía el 25% del precio del cemento, ahora insume un 35% (1) (11). Es evidente la gran importancia que tiene el posible ahorro de energía, tanto para la economía nacional como para los propios cementeros.

Durante estos últimos años se han logrado notables progresos en la técnica de elaboración del cemento, sobre todo en el empleo de dispositivos de combustión o cocción más modernos y de mayores dimensiones, esto es debido a que la cocción del clinker sigue siendo sin duda alguna la parte del proceso más costosa; de esta etapa depende en gran manera la economía y rentabilidad de la empresa.

El costo del combustible se ha elevado considerablemente en los últimos años. Esto ha inclinado la balanza del lado de los sistemas de vía seca, salvo en aquellos casos en que por la naturaleza y composición de la materia prima, el proceso húmedo o semihúmedo pueda ser interesante u obligatorio.

La preocupación por el ahorro de energía en esta industria no es nueva, ni una consecuencia de la crisis energética actual. Desde hace muchos años se viene produciendo; prueba de ello es la búsqueda continua de soluciones (2) (11).

En muchos países (como el nuestro) existe la tendencia a contrarrestar la elevación de los costos (debida al precio del combustible) reemplazando parte del clinker por aditivos, lo cual da lugar a los llamados "Cementos Mezclados".

Otra solución ha sido fabricar el llamado "Cemento Puzolánico" (65% clinker y 35% puzolana), sin descuidar la calidad, propiedades y categorías preficadas por el cemento portland, logrando en algunos casos mejorar algunas de esas propiedades.

Como un ejemplo; tenemos que: la fabricación de una tonelada de cemento portland consume un promedio 100 Kg. de combustible, la sustitución de clinker por puzolana en proporciones de 25%, 30%, 35% y hasta 40% (un promedio de 32.5%), supone un ahorro de otros tantos kilogramos de combustible en cada caso. Si se supone una producción anual de 20,000,000 de toneladas de clinker, de la cual el 10% sea destinado a la fabricación de cemento puzolánico, el ahorro anual de combustible sería de aproximadamente 68,000 toneladas, que podrían destinarse a otras necesidades.

La importancia de la fabricación de cemento puzolánico no solo estriba en el ahorro de energético, sino en sus propiedades y utilidad, de las cuales el cemento portland carece.

Es por eso que el cemento puzolánico es utilizado con ventaja sobre el portland en muchos casos específicos.

## CAPITULO 1

## C O N C R E T O

El concreto es un material tecnológico de construcción, del que se esperan, y al que se exigen, unas características determinadas. Se puede decir, en virtud de lo expuesto, que esas mismas características le son igual y necesariamente exigibles al cemento con el cual se va a hacer el concreto.

Al concreto se le pueden y se le deben imponer condiciones previas en cuanto a resistencia mecánica, estabilidad dimensional y durabilidad.

La resistencia mecánica a la tracción o a la compresión - y generalmente estas últimas - suelen constituir el criterio principal y a veces el único para juzgar acerca de la calidad de un concreto. Esta idea, mantenida a ultranza, es errónea, ya que, por el contrario, la resistencia es sólo una característica del material, aunque no la única, ni siempre la más importante.

La estabilidad dimensional del concreto se establece en términos de su variación de volumen - positiva, aumentando o negativa, disminuyendo - por efecto de una expansión o de una retracción, según los casos. La estabilidad de volumen es una característica del concreto que sigue en importancia - y a veces precede - a las propias resistencias. La falta de estabilidad puede ser causa de hinchamientos, o de la aparición de fisuras y grietas, e incluso de la ruptura y desintegración del concreto. Por otra parte, la fisuración y el agrietamiento son circunstancias propicias para la corrosión y ruptura de las armaduras, en el caso de los concretos armados y pretensados.

La durabilidad del concreto reside en un conjunto de circunstancias y de previsiones que hacen que el material conserve, en el medio en que se encuentre y al final de su vida útil pre

vista, un coeficiente de seguridad aún aceptable. Se puede definir también la durabilidad del concreto como su capacidad de resistencia, a lo largo del tiempo, frente a agentes, ambientales y medios destructores. La durabilidad depende, de la interacción entre el medio ambiente y el propio concreto. Esta interacción puede ser de naturaleza más bien física, como el efecto disruptor por expansión del agua, al convertirse en hielo en el interior del concreto; o más bien química, como el efecto del agua de mar o de los terrenos yesíferos sobre los diques o cimentaciones; o incluso electroquímica, como los efectos de las corrientes vagabundas o de los electrólitos en cuanto a la corrosión de las armaduras. En general, la interacción suele ser de carácter mixto y puede calificarse de fisicoquímica.

En conclusión, el concreto en masa, armado o pretensado, fabricado =in situ= o prefabricado en taller, es un material estructural cuya misión es resistir y durar -se podría decir que resistir durando o durar resistiendo-; así, resistencia mecánica y durabilidad (incluyendo como factor de esta última la estabilidad dimensional) o durabilidad y resistencia mecánica son, en plano de igualdad cuando menos, las dos características más destacadas del concreto. De donde se deduce que para obtener concretos resistentes y durables se deben emplear materiales primarios o componentes que a su vez lo sean en la medida necesaria. Esta condición la debe cumplir, en particular, el cemento. También es preciso que las proporciones de los materiales en el concreto -esto es- la dosificación, así como la ejecución, sean las más adecuadas en todos los aspectos (3).

## 1.1 CEMENTO

En este caso llamamos cemento a un conglomerante hidráulico que cumple con la propiedad de que al ser amasado con agua, tanto si se conserva al aire, como sumergido en agua, se endurece como una piedra y permanece en tal condición. Por lo tanto, cabe aclarar que no son hidráulicas las sales para la

construcción en obra al aire libre, ni la totalidad de los tipos de yeso para construcción, puesto que no son estables de modo permanente en el seno del agua. Como conglomerante se exige al cemento que a los 7 días de edad, supere una determinada resistencia mecánica y ofrezca, además estabilidad de volumen muy alta y fraguado suficientemente retardado, diferido por lo menos una hora después de su amasado. Por consiguiente, un conglomerado hidráulico a base de cal, aunque sea estable no es un cemento (3).

## CAPITULO 2

## TIPOS DE CEMENTO

Debe considerarse como cemento portland el material que proviene de la pulverización fina del producto obtenido por calcinación a fusión incipiente de una mezcla íntima y debidamente proporcionada de materiales arcillosos y calizas (clinker), sin más adición posterior a la calcinación que yeso natural.

Para los efectos de estas recomendaciones, el cemento portland debe clasificarse en cinco tipos:

- Tipo I. Normal o común llamado Portland. Destinado a usos generales.
- Tipo II. Modificado. Destinado a construcciones generales de concreto expuestas a una acción moderada de los sulfatos o cuando se requiera un calor de hidratación moderado.
- Tipo III. Rápida alta resistencia. Cuando se requiera que el concreto adquiriera resistencia rápidamente.
- Tipo IV. De bajo calor. Cuando se requiera un calor de hidratación reducido.
- Tipo V. De alta resistencia a los sulfatos. Cuando se requiera una alta resistencia a la acción de los sulfatos.

Cemento Blanco

Portland -escoria de alto horno-

Cemento de albañilería

Portland-puzolana.

Todos estos cementos, con características especialmente adecuadas para satisfacer las necesidades peculiares de las distintas clases de construcción, se fabrican bajo especificaciones de diversas normas oficiales de calidad. (7)

CAPITULO 3

C E M E N T O P O R T L A N D

Hasta el hallazgo del cemento portland con auto-endurecimiento, el mortero hidráulico era preparado según la vieja receta romana en un mortarium (sartén para mortero), y no como hoy, por mezcla, sino por percusión y rotura, como lo hacen los químicos. Por semejanza formal, los cañones de gran calibre del siglo XV recibieron igual nombre morser (alemán), mortar (inglés), mortier (francés), mortero (español).

Los cementos portland, constituidos exclusivamente a base de clinker (con una pequeña proporción de retardador, que generalmente es una de las formas de sulfato de calcio, o una mezcla de ellas), deben sus propiedades y su comportamiento, tanto **r e s i s t e n c i a** como en cuanto a estabilidad y a durabilidad, a la constitución química del clinker y a la finura de molido.

Los constituyentes del clinker, creados en los hornos de las fábricas de cemento a partir de los componentes de las materias primas calizas y arcillas (sílice, alúmina, óxido férrico, cal, magnesia, y álcalis, principalmente), son los silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, la cal libre (no combinada) y los compuestos magnésicos y alcalinos (4).

En el cemento portland pueden surgir las siguientes combinaciones químicas:

	<u>Fórmula</u>	<u>Forma- abreviada</u>
(5) Silicatos .....	3CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
	2CaO SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
	3CaO.2SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S <sub>2</sub>
Aluminatos.....	3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
	5CaO.3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>5</sub> A <sub>3</sub>

	$\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_2\text{A}$
	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Ferritos.....	$2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_2\text{F}$
	$\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{F}$
Aluminoferritos.....	$4\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Sin embargo, es necesario aclarar que estos componentes mencionados son solamente una muestra esquemática y no pueden representar toda la variedad de los componentes que contiene el clinker del cemento. Además, posee yeso (aproximadamente de 3-5%) presentando también eventualmente  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$  (álcalis), cal y la magnesia libre (5).

Es conveniente conocer la composición mineralógica del clinker ya que esto nos permite entender más precisamente el desarrollo del cemento durante el fraguado y el endurecimiento.

Los constituyentes más comunes en el clinker son los siguientes:

Los silicatos que son dos, el tricálcico y el dicálcico, que se designan respectivamente, por  $\text{C}_3\text{S}$  y  $\text{C}_2\text{S}$ ; el aluminato es sólo uno en general: el tricálcico, que se designa por  $\text{C}_3\text{A}$ ; y el ferrito es también uno solo, en general, aunque en realidad es un ferrito-aluminato: el tetracálcico, que se designa por  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Las proporciones medias relativas de estos constituyentes del clinker suelen ser las señaladas en el cuadro 1.

C U A D R O No. 1

CLINKER	%		%
Silicatos . . . . .	75	Tricálcico $C_3S$ . . . . .	50
		Dicálcico $C_2S$ . . . . .	25
Aluminatos y Ferritos . . . . .	20	Aluminatos $C_3A$ . . . . .	10
		Ferrito $C_4AF$ . . . . .	10
Resto . . . . .	5	Resto . . . . .	5
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>		<b>100</b>

En el resto se incluyen la cal libre, la magnesia y los compuestos alcalinos, principalmente, en proporciones que suelen ser las indicadas en el cuadro No. 2.

C U A D R O No. 2

CLINKER	%
Cal libre	1
Magnesia	2
Resto Compuestos alcalinos	2
<b>TOTAL</b>	<b>5 %</b>

Los campos de variación de estos constituyentes suelen ser los dados en el cuadro No. 3.

C U A D R O No. 3

CLINKER	% por ciento
Silicato tricálcico	de 30 a 60
Silicato dicálcico	de 20 a 40
Aluminato tricálcico	de 0 a 15
Ferrito-aluminato tetracálcico	de 0 a 20
Cal libre	de 0 a 2
Magnesia	de 1 a 4
Compuestos alcalinos	de 0.5 a 2.5

El cemento portland está formado, en promedio, por 95% de clinker y 5% de retardador (yeso dihidratado) del tal manera que su constitución se puede definir como la indica el cuadro No. 4.

C U A D R O No. 4

CEMENTO PORTLAND		%		%	
Clínker	95%	Silicatos	71.25	Tricálcico	47.50
				Dicálcico	23.75
		Aluminatos y Ferritos	19.00	Aluminatos Ferritos	9.50 9.50
		Resto	4.75	Cal libre	0.95
				Magnesia	1.90
				Alcalis	1.90
Sulfato cálcico	5%		5.00		5.00
TOTAL	100		100.00		100.00

### 3.1 COMPONENTES

#### 3.1.1 Silicato tricálcico $C_3S$ .

Desarrolla gran cantidad de calor (calor de hidratación) así como elevadas resistencias a corto plazo, y libera abundante cantidad de cal (cal de hidrólisis).

Por la primera circunstancia, los cementos ricos en silicato tricálcico -del orden del 45% al 60%- desprenden gran cantidad de calor. En consecuencia, particularmente cuando se emplean en dosificaciones altas -superiores a  $300 \text{ Kg/m}^3$ -, o en grandes masas de concreto con pequeña relación de superficie a volumen, esas masas de concreto se calientan demasiado y, sometidas a un choque térmico por enfriamiento, por ejemplo, -durante el transcurso de una noche fría-, se pueden contraer dando lugar a fisuraciones y agrietamiento por causa de una retracción térmica. Por otra parte, el fuerte calentamiento de los concretos provoca en ellos una autodesecación, si no se evita con un curado húmedo adecuado. La desecación puede producir una retracción hidráulica, que, sumada a la térmica, puede intensificar la fisuración y el agrietamiento. Por estas razones los cementos ricos en silicato tricálcico no se suelen emplear en el hormigón de presas. Por el contrario, las normas de cemento suelen limitar el contenido de silicato tricálcico de los cementos portland destinados a tal empleo. (6)

En cuanto a las resistencias elevadas a corto plazo, los cementos con alto contenido de  $C_3S$  -del orden del 50 al 60%- forman parte de los llamados de endurecimiento rápido o de altas resistencias iniciales los cuales son aptos para la prefabricación en concreto, y para aquellas obras y estructuras que requieren un descimbrado o desencofrado rápido.

En lo relativo a la abundante cal liberada en la hidratación del silicato tricálcico, esta cal es sensible al ataque y disolución por aguas ácidas, puras ó carbónicas agresivas. Por

este motivo, la durabilidad en este caso resistencia química de los concretos hechos con cementos ricos en silicato tricálcico y que hayan de encontrarse en ambientes sumergidos, o en contacto intermitente con tales aguas, máxime si influyen y se renuevan, ha de ser lógicamente menor que la de los mismos concretos hechos con cementos de contenido de silicato tricálcico menor. En contrapartida, esa abundante cal liberada en la hidratación confiere a los concretos un alto grado de basicidad (pH 12-13) o alcalinidad, así como una gran reserva alcalina, circunstancias que son favorables para evitar o retardar la corrosión de las armaduras en el caso de los concretos armados y pretensados. En consecuencia, para estos últimos es aconsejable utilizar cementos de alto contenido de silicato tricálcico, además de las razones de índole resistente.

Como se ve por lo expuesto, hay una especie de incompatibilidad entre las resistencias elevadas -particularmente a plazos cortos- y la acción protectora sobre las armaduras, por una parte, y la retracción -fisuración y agrietamiento- y la durabilidad frente a aguas puras, carbónicas ó ácidas, por otra parte. En cada caso habrá que elegir cementos de alto o de bajo contenido de silicato tricálcico, según la circunstancia predominante.

El  $C_3S$  durante la reacción con el agua da diferentes hidrosilicatos de calcio en función de la temperatura del medio y la concentración de  $Ca(OH)_2$  en la fase líquida.

Este  $Ca(OH)_2$  proviene de la hidratación de la cal libre del cemento y del  $Ca(OH)_2$  que se desprende, en las reacciones de los diferentes constituyentes del cemento (8).

### 3.1.2 Silicato dicálcico . $C_2S$

Desarrolla mucho menos calor de hidratación que el tricálcico, libera bastante menor cantidad de cal, y da menor resistencia mecánica a corto plazo, aun cuando las resistencias a plazos

más largos son casi tan elevadas como las que proporciona el silicato tricálcico. Es el constituyente principal de los cementos portland llamados de endurecimiento lento.

Por otra parte, en el cemento portland los silicatos tricálcico y dicálcico se pueden considerar como valores o parámetros conjugados cuya suma es constante- aproximadamente el 70% de la composición del cemento- de tal manera que el aumento de uno implica la correspondiente disminución del otro.

Así se comprende que las indicaciones y contradicciones de empleo de los cementos ricos en  $C_3S$  (60%) -o pobres en  $C_2S$  (20%)- y pobres en  $C_3S$  (30%) o ricos en  $C_2S$  (40%) se entrecrucen, deduciendose de ello las correspondientes consecuencias prácticas en cada caso (cuadro 5)

C U A D R O 5 (8)

CEMENTOS PORTLAND	
Ricos en $C_3S$ : 60% (Pobres en $C_2S$ :20%)	Pobres en $C_3S$ : 30% (Ricos en $C_2S$ : 40%)
más resistentes	menos protectores (de armaduras)
mas fisurables	menos atacables
mas atacables	menos fisurables
más protectores (de armaduras)	menos resistentes

3.1.3 Aluminato tricálcico  $C_3A$ . (8)

Posee una gran velocidad de hidratación, en la cual desarrolla mucho calor -es el constituyente que más calor desprende- colabora moderadamente a las resistencias a muy corto plazo, y no libera cal en su hidratación, sino que por el contrario, fija en una cierta proporción la cal liberada por los dos silicatos. Es muy sensible a los sulfatos en general -aguas se

lenitosas y terrenos yesíferos- con los que reacciona dando lugar a productos expansivos que provocan la destrucción del concreto. Es el constituyente causante del fraguado rápido del cemento, y el que exige, por lo tanto, que se añada yeso -en general una o varias formas de sulfato cálcico- al cemento, para retardar, regular y normalizar el fraguado.

El aluminato tricálcico abunda más en los cementos portland blancos que en los grises, y su hidratación normal, o en presencia de insuficiente cantidad de yeso, tiene carácter re-tractivo; por el contrario, con exceso de yeso puede tener carácter expansivo diferido.

En resumen las características más destacadas del  $C_3A$  son su gran calor de hidratación, su tendencia a la retracción -en parte de tipo térmico- o a la expansión, según las circunstancias, y su debilidad frente a eventuales ataques químicos por sulfatos en general y por los medios y ambientes que los contienen (aguas y terrenos selenitosos, agua de mar, etc.).

Por lo tanto, los cementos ricos en  $C_3A$  no se deberán emplear en obras, estructuras o elementos de concreto que hayan de estar en contacto con estos medios. Por el contrario en semejantes casos se deben emplear cementos de bajo contenido de  $C_3A$ , llamados resistentes a aguas selenitosas (8).

#### 3.1.4 Ferrito-aluminato tetracálcico. $C_4AF$

Se caracteriza por una lenta velocidad de hidratación, en la que desarrolla poco calor, por una escasísima contribución a las resistencias a cualquier edad, y por una buena durabilidad frente a los ataques químicos de los sulfatos.

Sus características se contraponen, en cierto modo, a las del aluminato tricálcico. El  $C_4AF$  escasea o prácticamente no existe en los cementos portland blancos y, por el contrario, abunda en los cementos portland llamados de tipo férrico, en los

llamados cementos de moderado o de bajo calor de hidratación, en los cementos resistentes o moderadamente resistentes a sulfatos y en los cementos fríos, si al mismo tiempo son ricos en  $C_2S$  y pobres en  $C_3S$ .

Así como los dos silicatos eran constituyentes conjugados, cuya suma de tantos por ciento se puede considerar como aproximadamente constante, lo mismo sucede con el  $C_3A$  y el  $C_4AF$  -cuya suma asciende aproximadamente al 20% de la composición total del cemento-, de modo que un alto valor de uno de ellos lleva aparejado un valor bajo del otro.

Esto explica el hecho de que las indicaciones y contradicciones de empleo de los cementos ricos en  $C_3A$  (15%) -o pobres en  $C_4AF$  (5%)- y pobres en  $C_3A$  (5%) -o ricos en  $C_4AF$  (15%)- también se entrecrucen, de lo cual se derivan conclusiones de tipo práctico, según los casos.

C U A D R O 6

CEMENTOS PORTLAND	
Ricos en $C_3A$ : 15%	Pobres en $C_3A$ : 5%
Pobres en $C_4AF$ : 5%	Ricos en $C_4AF$ : 15%
más atacables	menor calor de hidratación.
mayor retracción	menor retracción.
mayor calor de hidratación.	menos atacables.

Los cementos ricos en  $C_4AF$  y simultáneamente en  $C_2S$  son aptos para el uso de concretos en épocas o en climas muy cálidos, o para ejecutar obras con grandes masas de concreto, tales como presas (8).

### 3.1.5 Cal libre ( 9 )

La cal libre es un constituyente frecuente pero no normal del cemento portland. Su existencia es debida a un defecto de fabricación que puede atribuirse a diversas causas.

La hidratación de la cal libre es expansiva, pudiendo dar lugar a cuarteamientos superficiales del concreto, e incluso al debilitamiento y destrucción de éste.

Como la cal liberada en la hidratación de los silicatos, la cal libre hidratada es atacable por las aguas puras, ácidas y carbonatadas.

Aparte del  $\text{C}_2\text{SH}$ , el hidróxido de calcio es el componente principal del cemento hidratado. El hidróxido de calcio se encuentra entremezclado con la estructura fibrosa del gel de  $\text{C}_2\text{SH}$ . Se cree que el hidróxido de calcio no contribuye a la formación de la resistencia. (10)

El hidróxido de calcio es una base bastante fuerte, en el sentido químico de la palabra, y produce un alto pH de la pasta de cemento alrededor de 12.5. De este modo, pasiva el acero contra la corrosión electroquímica.

El hidróxido de calcio es ligeramente soluble en agua (cerca de 1g por litro de agua pura a temperatura ambiente). Puede ser sacado de las estructuras de concreto mediante lixiviación manteniendo al concreto en contacto permanente con agua corriente. Esto aumenta la porosidad del concreto y reduce la resistencia.

El hidróxido de calcio reacciona lentamente con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para formar  $\text{CaCO}_3$ . De este modo se reduce el nivel de pH hasta alrededor de 7 y se destruye el efecto protector de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  contra la corrosión del acero de refuerzo. Este fenómeno se llama carbonatación y su importancia depende de:

- contenido de cemento
- relación agua-cemento
- condiciones climatológicas.

En términos generales puede decirse que la carbonatación procede a razón de aproximadamente 0.5 mm anuales al principio, para disminuir posteriormente.

### Magnesia (9)

La magnesia como la cal libre, puede ser expansiva, aunque a muy largo plazo. En tales condiciones la expansión del concreto debida a la magnesia es muy nociva por su efecto.

Tanto el hidróxido de calcio, como la magnesia pueden reaccionar dentro del concreto con silicios finos dispersos, formando compuestos insolubles que contribuyen a la formación de la resistencia "Acción puzolanica" .

### 3.1.6 Compuestos alcalinos. (9)

Los álcalis del cemento se encuentran, o bien combinados con el  $C_2S$  y el  $C_3A$  o bien en forma de sulfatos (sulfato potásico y sulfato sódico).

Con la lixiviación el agua produce una cantidad considerable de compuestos alcalinos solubles que influyen sobre la composición de la solución en la pasta seca del cemento.

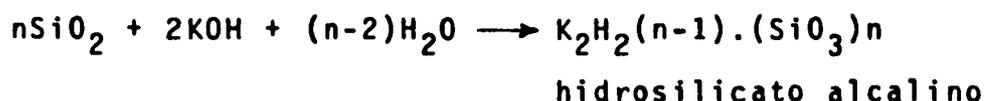
Los álcalis reducen la solubilidad de la cal libre e incrementan la de los aluminios y de los silicios aumentando de este modo el ritmo de la hidratación de los principales constituyentes del cemento.

"La presencia de los álcalis solubles en agua acelera la hidratación del cemento y mejora de este modo la resistencia a edad temprana, mientras que disminuya la resistencia después de 28 días".

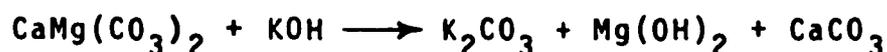
Los álcalis pueden reaccionar en concreto endurecido con algunos tipos de agregados reactivos que forman el gel voluminoso. Las reacciones químicas involucradas en este proceso hasta ahora no se han determinado completamente.

En forma simplificada normalmente se acepta lo siguiente:

- En el caso de silicios reactivos:



- En el caso de dolomita.



Los agregados reactivos pueden ser:

- Opalo, pedernal, calcedonia, silicios criptocristalinos o amorfos.
- Roca volcánica, eruptiva, mal cristalizada.
- Dolomita esquistada.

El aumento del volumen vinculado con la formación de la gel de hidrosilicato alcalino o con la dolomita genera expansión y un serio deterioro del concreto.

Para evitar cualquier reacción dañina entre alcalis (no mas de 0.6% equivalente a  $\text{Na}_2\text{O}$ ), otra alternativa sería añadir puzolana a la mezcla del concreto .

### 3.2 El yeso del cemento portland.

Al tratar el  $\text{C}_3\text{A}$  del clínker se ha indicado que su rápida velocidad de hidratación obliga a añadir al clínker una o varias formas de sulfato cálcico que actúa como regulador del fraguado, retardándolo.

La variedad de sulfato cálcico que generalmente se añade es piedra de yeso natural, yeso crudo, y la forma en que se hace es incorporándolo a los molinos del clínker en las fábricas

de cemento.

Cada clínker, según su composición -particularmente según sus contenidos de  $C_3A$  y de álcalis- y según la finura que se le quiera dar al cemento resultante, requiere un óptimo de yeso para que este cemento presente las mejores características en cuanto a resistencia, estabilidad y durabilidad. Ese óptimo es tanto mayor cuanto mayor es el contenido de  $C_3A$  y de álcalis, y mayor la finura.

Sucede con frecuencia que durante la molienda del clínker con el yeso se eleva la temperatura en los molinos de cemento, de modo que el yeso crudo añadido se deshidrata en parte y se convierte en yeso cocido.

Cuando esto sucede y el cemento se amasa, se observa un entumecimiento o rigidización pasajera de la pasta, que desaparece al seguir amasando. Este hecho se conoce con el nombre de falso fraguado, y nada tiene que ver con el fraguado rápido del cemento, sino que es debido al propio fraguado del yeso cocido que se ha formado en el molino a partir del yeso crudo.

El falso fraguado no influye, en general, en las resistencias a cualquier plazo, ni en las demás características del cemento tan solo exige un amasado más prolongado o enérgico para romper la momentánea rigidez adquirida por la pasta.

Pero cuando el falso fraguado se produce en una masa de concreto, la tendencia del que la elabora es a deshacer los efectos añadiendo más agua a la masa para aumentar su fluidez. Y como quiera que sea se recupera después casi en su totalidad sin más que batir más la masa y sin necesidad de añadir más agua, resulta al final un concreto mucho más fluido, pero en todo caso con una relación agua/cemento bastante más elevada que la prevista; es decir un concreto de peor calidad: menos resistente, más heterogéneo, menos compacto y por lo tanto, más poroso y permeable, y menos duradero (13).

El falso fraguado y sus efectos son particularmente perniciosos cuando se trata de concreto preparado en la central y transportado a distancia en camiones-cuba, en especial en estaciones y climas calurosos donde la desecación es más intensa y rápida. También entonces es mayor el peligro de abuso de añadir agua en exceso al concreto.

### 3.3 La finura del cemento.

La disolución de un sólido en un líquido es tanto más rápida, y tanto más completa, cuanto más fino es el sólido. Lo mismo sucede con la hidratación del cemento. La finura de éste se suele expresar por los residuos por ciento sobre tamices de luz de malla dada, o en función de la superficie específica  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

Cuanto mayor es la finura, mayores son las resistencias alcanzadas a cualquier edad del concreto, mayor es la velocidad de desprendimiento del calor de hidratación y mayor, por lo tanto, la temperatura que puede alcanzar el concreto. También es mayor la retracción, tanto térmica como hidráulica, y con ella el peligro de fisuración y de consiguiente corrosión de armaduras, en el caso de concretos armados y pretensados.

Por este motivo se limita la superficie específica máxima, pues todo aumento de resistencias logrado a base de finura y no a base de silicato tricálcico, lleva consigo una gran retracción, máxime si las dosificaciones de cemento en el concreto son elevadas, como sucede en prefabricación de pretensados.

Cuanto más fino haya de ser el cemento tanto más yeso requiere para la adecuada regulación de su fraguado, sobre todo si el clínker es rico en aluminato tricálcico y en álcalis, y tanto más delicada es dicha regulación.

Las anomalías de finura de los cementos dan lugar a veces a

dificultades de fraguado, las cuales repercuten en el amasado, en el transporte, en el vertido, en la puesta en obra y en la compactación del concreto. Si por un defecto o dificultad técnica de fabricación del cemento y concretamente en la sección de molienda de clínker en las fábricas, el cemento resultante tiene una curva de distribución granulométrica distinta de lo usual, con excesiva abundancia o escasez de elementos finos respecto de gruesos, puede haber una parte del conglomerante que frague antes que la otra e impida el fraguado normal de esta última. Esto, que es distinto del fraguado rápido o del falso fraguado, produce los mismos o parecidos efectos en el concreto fresco, e iguales o peores en cuanto al concreto en durecido.

La excesiva finura o las anomalías granulométricas del cemento dan lugar, sobre todo en concretos de relación agua/cemento más bien alta a efectos de segregación por exudación o rezumado, los cuales provocan la formación en la superficie del concreto fresco de una capa más fluida rica en elementos finos. Al fraguar y endurecer, esta capa se convierte en una corteza distinta del resto de la masa, mal adherida a ésta, y con una retracción mucho mayor. Esto hace que la corteza se fisure, se agriete y descascarille, perjudicando el aspecto superficial del concreto.

El siguiente cuadro No.7 resume, en forma cualitativa, las características del concreto en función de las características del cemento portland. (13).

CUADRO No. 7

CONSTITUYENTE DEL CEMENTO PORTLAND	CARACTERISTICAS DEL CONCRETO						
	RESISTENCIA	EXPANSION	RETRACCION	FISURACION	DURABILIDAD	CORROSION DE ARMADURAS	CALOR DE HIDRATAACION
	( + )	( - )	( - )	( - )	( + )	( - )	( ± )
C <sub>3</sub> S	>	-	>	>	<	<	>
C <sub>2</sub> S	<	-	<	<	>	>	<
C <sub>3</sub> A	>	>	>	>	<	-	>
C <sub>4</sub> AF	<	<	<	<	>	-	<
CaO libre	<	>	<	<	<	<	>
MgO	<	>	<	<	<	-	<
Alcalis	<	>	-	-	<	∧	<
Yeso	>	>	<	<	∞	-	<
FINURA	>	<	>	>	<	>	>

(15)

## CAPITULO 4

## H I D R A T A C I Ó N D E L C E M E N T O

El fraguado y el endurecimiento del cemento se basan en la reacción de los compuestos anhidros del cemento con el agua. En el cemento, el agente coagulante no es el cemento en sí, sino la mezcla de cemento y agua. Cuando se pone en contacto el cemento portland con agua, los componentes individuales del cemento son atacados o se descomponen formando componentes hidratados.

Hay diferentes maneras en las que los compuestos presentes en el cemento pueden reaccionar con el agua, pero es conveniente, de acuerdo a la costumbre, aplicar el término hidratación a todas las reacciones que se llevan a cabo dentro del sistema.

La hidratación del cemento portland es principalmente una hidrólisis de los componentes de silicato, que produce un hidrato de silicato de calcio de menor basicidad soltando cal que se separa bajo la forma de hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}_2$ ).



la reacción de hidratación ya se lleva a cabo, en menor medida, durante el almacenamiento del clinker, durante la molienda del clinker con yeso y durante el almacenamiento del cemento. Inclusive esta hidratación de superficie reducida puede causar cambios importantes de las características físicas del cemento.

Una hidratación a gran escala y cambios substanciales en las características físicas del cemento se llevan a cabo durante la reacción del cemento con agua en la mezcla del cemento.

Etapas en la hidratación del cemento.	Porcentaje de hidratación
Almacenamiento de clinker	0 - 10%
Molienda del cemento	0 - 1%
Almacenamiento del cemento	0 - 4%
Mezcla de concreto	0 100%

En cuanto a la hidratación de cemento, como en cualquier reacción química, los aspectos más interesantes son los cambios de sustancia, la energía y la velocidad de la reacción. Estos tres aspectos de la hidratación tienen una gran importancia práctica para la fabricación y la utilización del cemento.

Cambio de sustancia	$\text{CS} \xrightarrow{\text{H}_2\text{O}} \text{CSH gel} + \text{Ca(OH)}_2$ $(\text{C.A.F})(\text{S}) \longrightarrow (\text{C.A.F.S.H})$			
	Porcentaje de hidratación ( <u>velocidad de la reacción</u> )			
	0 %	5 % (6 h)	70 % (28 d)	100 % (1 año)
Calor de hidratación. (cambio de energía)		+ 30	+ 350	+ 500 J/g
Área de superficie específica.	3'000	150'000	2'100'000	3'000'000 cm <sup>2</sup> /g
Volumen de sólidos	1.0	1.05	1.7	2.0 cm <sup>3</sup>
Resistencia a la compresión.	0	1	70	100 N/mm <sup>2</sup>

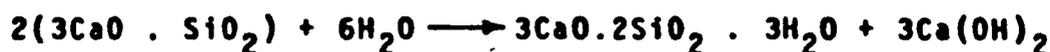
El conocimiento de las sustancias que se forman cuando el cemento reacciona con agua es importante, porque es decisivo en cuanto a las características mecánicas del concreto endurecido.

## Hidratación de los minerales individuales del clinker

### 4.1 Silicatos

El producto de hidratación de los dos silicatos de calcio en el clinker - $C_3S$  y  $C_2S$ - son químicamente idénticos: un hidrato de silicato de calcio en forma de gel o microcristalino e hidróxido de calcio cristalino. La composición del hidrato de calcio es aproximadamente  $C_3S_2H_3$  y se le suele llamar Tobermorita o gel de tobermorita, debido a que estructuralmente es similar a un mineral natural de este nombre. Otra designación común para el hidrato de silicato es fase CSH o gel CSH.

Ya que los dos silicatos anhidros del cemento ( $C_3S$  y  $C_2S$ ) tienen diferentes contenidos de caliza, las reacciones que conducen a la formación de la fase CSH son distintas:



Fracción de peso      100 + 24  $\longrightarrow$  75 + 49

(en símbolos de química de cemento:  $2C_3S + 6H \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$ )



Fracción de peso      100 + 21  $\longrightarrow$  99 + 22



De esta manera, ambos silicatos requieren más o menos la misma cantidad de agua para su hidratación, pero  $C_3S$  produce más de dos veces la cantidad de hidróxido de calcio de  $C_2S$ .

Con hidratación completa, el cemento portland hidratado contiene aproximadamente 60% de fase CSH y 30% de hidróxido de calcio

En la fase CSH ni la proporción C/S ni la proporción CS/H son estequiométricas. La Tobermorita natural, tiene la composición  $C_4S_5H_5$ , mientras que la fase CSH de cemento tiene un mayor contenido de caliza. La relación molar de C/S en la fase CSH varía

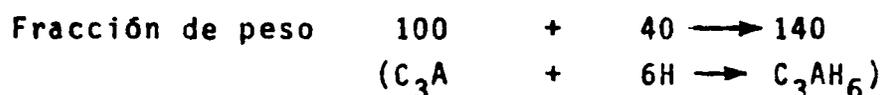
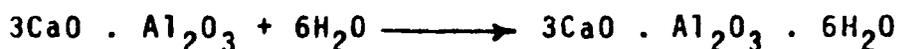
entre 1.0 - 2.0 y depende de la relación a/c, de la temperatura de hidratación, de la edad de la pasta de cemento y del tipo de silicato anhidro. ( a= agua, c= cemento)

#### 4.2 Aluminatos

La hidratación de aluminatos depende en gran medida de la presencia de yeso.

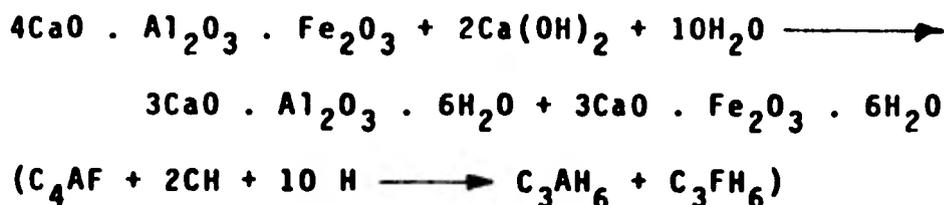
En ausencia de yeso, la reacción  $C_3A$  con agua es muy violenta y conduce a un endurecimiento inmediato de la pasta, que se conoce bajo el nombre de fraguado instantáneo. Cuando hay yeso, sin embargo, se produce una reacción de hidratación distinta y se evita el fraguado instantáneo.

La forma estable del hidrato de aluminato de calcio que existe en último término en la pasta del cemento hidratado es el cristal cúbico  $C_3AH_6$ . El  $C_4AH_{14}$  de forma hexagonal y rico en agua y caliza se cristaliza primero y después, según la temperatura de hidratación, cambia hasta adoptar su forma cúbica. La forma final de reacción puede, escribirse de la siguiente manera:



La capacidad teórica de  $C_3A$  para combinarse con agua es tal que 100 partes de  $C_3A$ , en cuanto a peso, combinan con 40 partes de peso de  $H_2O$ , o sea: cerca del doble de la capacidad teórica de los silicatos.

De manera similar a lo que pasa con  $C_3A$ , el producto final de la hidratación de  $C_4AF$  podría ser presentado como  $C_3AH_6$  y  $C_3FH_6$ :



El yeso y  $\text{C}_3\text{A}$  reaccionan primero formando el trisulfato de calcio hidrato de aluminato - Etringita :

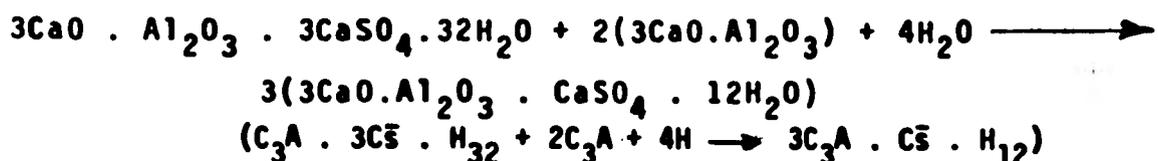


Fracción  
de peso

$$66 + 100 + 137 \longrightarrow 203$$



Esta reacción continúa hasta que se agote todo el yeso disponible. Una vez terminado el yeso, el etringita se convierte en el monosulfato de doble sal y de bajo sulfato:



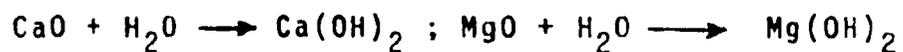
$\text{C}_4\text{AF}$  tiene, con el yeso, una reacción similar, pero más lenta.

Las reacciones de hidratación de los aluminatos tienen una gran importancia práctica ya que afectan las características de fraguado del cemento. Las reacciones de hidratación en edad temprana de los aluminatos también influyen en la fluidez del cemento y la formación de bloques coagulados dentro de los silos.

#### 4.3 Óxido de calcio y óxido de magnesio

La caliza no combinada (óxido de calcio) y la periclasa no combinada (óxido de magnesio), cuando se encuentra en grandes can-

tidades dentro del cemento, pueden causar expansión, debido a una lenta reacción de hidratación después del fraguado del concreto o de la mezcla:



El grado real de expansión depende del estado y de la distribución de los óxidos dentro del cemento. Más específicamente, los cristales grandes de periclasa o la caliza libre dura y cocida producen inestabilidad. (14)

## CAPITULO 5

## A D I T I V O S

Paralelamente a la historia del concreto, se conoce la historia de los aditivos. Desde el principio se pensó que no solamente con agregados, cementante y agua, se podrían dar al concreto determinadas características. Por eso desde época inmemorial se mataban toros para utilizar la hemoglobina de la sangre y adiccionarla a los componentes de los concretos hechos con cales o cementos naturales y darles mayor plasticidad. También sabemos de ciertas costumbres, como las de utilizar claras de huevo en la mezcla, que se seguían en la construcción de los muros de cal y canto durante la colonia; y aun de los primeros concretos de cemento artificial tenemos noticia de que se les agregaba sal común, alumbre y jabón, con objeto de darles mayor plasticidad e impermeabilidad.

**Aceptación de los aditivos.**

Hace algunos años el Instituto Americano del Concreto (A.C.I) publicó el primer reporte del Comité 212, sobre los estudios e investigaciones de miles de muestras de productos que se encontraban en el mercado de los E.E.U.U., e hizo un primer intento de agruparlos según las propiedades que se les atribúan. Diez años después, es decir en 1954, ese Instituto publicó un nuevo informe del comité mencionado, donde ya se precisaba la composición de los diferentes tipos de aditivos, con lo que se redujo considerablemente la variedad de productos que se ofrecían en venta o de los que utilizaban algunos constructores, fabricados por ellos mismos, siguiendo recetas tradicionales; por último, en noviembre de 1963, el mismo organismo A.C.I., publicó ya un tercer reporte, mucho más completo, donde los aditivos se clasificaron según el tipo de sustancias que los constituyen o los efectos característicos que producen en el concreto.

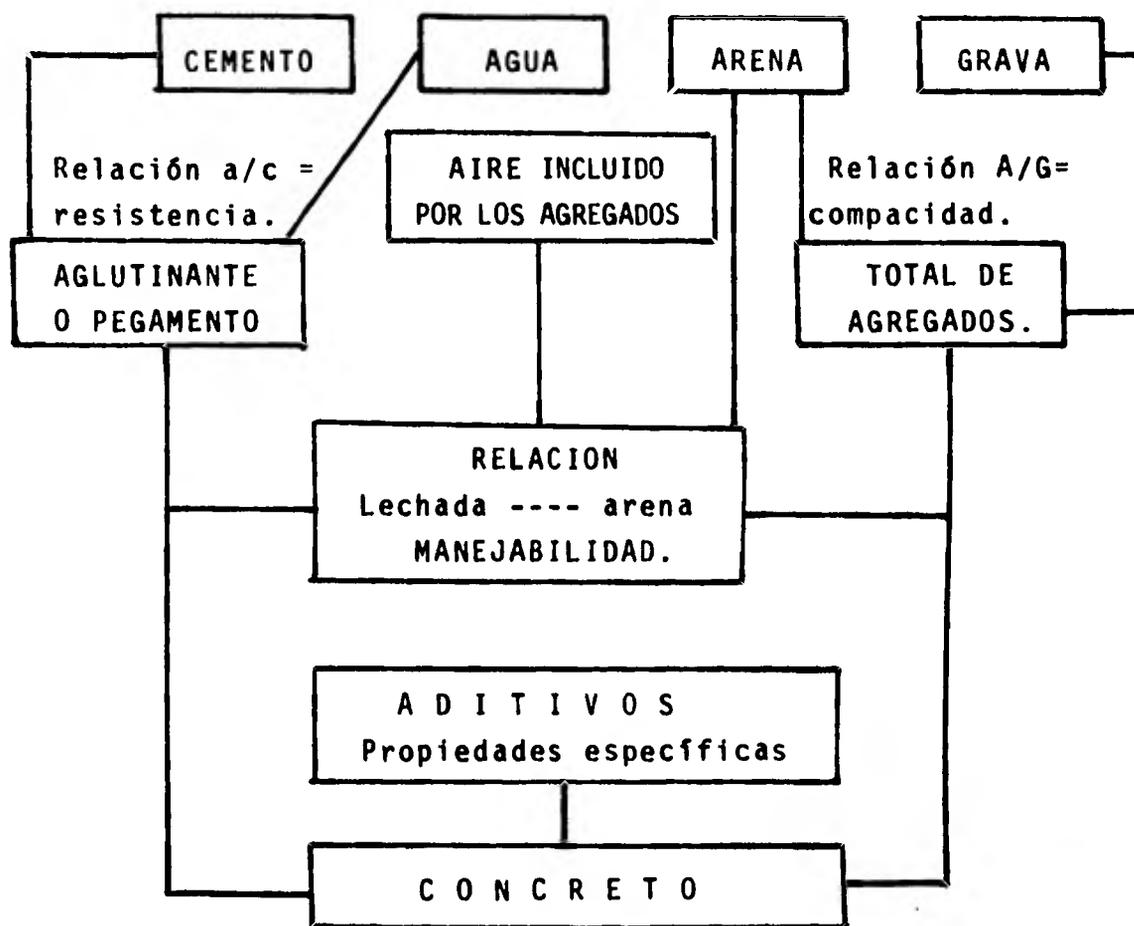
En el año de 1962 tanto la ASTM y el "Bureau of Reclamation" dieron su aprobación para el uso de aditivos en el concreto y han establecido normas e instructivos para ese objeto.

#### 5.1 Definición.

Un aditivo según la definición del ACI y la ASTM, es una sustancia química, distinta de los agregados, del cemento y del agua, que interviene en una forma directa en la manufactura del concreto y sirve para modificar alguna de sus propiedades y cualidades particulares.

Hay que tener en cuenta, no obstante, que un aditivo no es un simple estimulante para lograr un efecto pasajero, aunque hay algunos aditivos que tienen esa función, además de producir efectos completamente estables.

Un aditivo tampoco es un simple sustituyente de algunos de los elementos fundamentales del concreto.



Principio y fin.

De las características principales que debe tener un buen concreto unas son necesarias al fabricarlo y colarlo en los moldes, y otras son propias del concreto endurecido. De las primeras, la más importante es la manejabilidad, y en seguida las que puedan oponerse al sangrado y a la clasificación o segregación de los materiales. De las últimas o del concreto endurecido, son: resistencia a la compresión, a la abrasión, al ataque de sales y ácidos, y al paso del agua a través de la estructura; y además la dureza, la ligereza o el mayor peso, la durabilidad y el menor costo. Entre ambos extremos está el proceso de fraguado y de endurecimiento (16).

5.2 Uso de los aditivos.

Los aditivos pueden usarse para los siguientes fines:

1. Aumentar la trabajabilidad sin aumentar el contenido de agua o para reducir el contenido de agua, logrando la misma trabajabilidad.
2. Acelerar la velocidad de desarrollo de resistencia a edades tempranas .
3. Aumentar la resistencia.
4. Retardar o acelerar el fraguado inicial.
5. Retardar o reducir el desarrollo del calor.
6. Modificar la velocidad o la aptitud de sangrado o ambos.
7. Aumentar la durabilidad o la resistencia a condiciones severas de exposición incluyendo la aplicación de sales para quitar el hielo.
8. Controlar la expansión causada por la reacción de los álcalis con ciertos constituyentes de los agregados.
9. Reducir el flujo capilar del agua.
10. Reducir la permeabilidad a los líquidos.
11. Para producir concreto celular.
12. Mejorar la penetración y el bombeo.
13. Reducir el asentamiento, especialmente en mezclas para rellenos.
14. Reducir o evitar el asentamiento o para originar una leve expansión en el concreto o mortero, usados para rellenar huecos y otras aberturas en estructuras de concreto y en rellenos para cimentación de maquinaria, columnas o trabes, o para rellenar ductos de cables de concreto postensionado o vacíos en agregado precolado.
15. Aumentar la adherencia del concreto y el acero.
16. Aumentar la adherencia entre el concreto viejo y nuevo.
17. Producir concreto o mortero de color.

18. Obtener concretos o morteros con propiedades fungicidas, germicidas o insecticidas.
19. Inhibir la corrosión de metales sujetos a corrosión embebidos en el concreto.
20. Reducir el costo unitario del concreto.

### 5.3 Clasificación

A pesar de las diversas propiedades de los innumerables productos que se conocen como aditivos, se han podido establecer grupos de ellos bien definidos, atendiendo al efecto que causan en el concreto más bien que a su composición química.

1. Mejoradores de la manejabilidad del concreto o plastificantes:
  - Inclusores de aire.
  - Dispersantes o fluidizadores
  - Densificadores.
  - Otros plastificantes.
2. Modificadores de los tiempos de fraguado y de endurecimiento:
  - Retardantes.
  - Acelerantes.
3. Impermeabilizantes integrales:
  - Repelentes a la absorción capilar.
  - Reductores de la permeabilidad.
4. Agentes de expansibilidad:
  - Generadores de gas.
  - Estabilizadores de volumen
  - Concreto celular.
5. Materiales pulverizados:
  - Inertes.
  - Cementantes.
  - Puzolanas
  - Agentes de cristalización.

6. Agentes de adherencia:

Resinas.

Hule sintético "latex" reemulsionables.

Polímeros no reemulsionables.

Emulsiones.

7. Anticorrosivos del concreto y del fierro.

8. Colorantes, fungicidas, germicidas e insecticidas.

Fuera de la clasificación de los aditivos se tienen productos protectores de concreto ya sea en la primera etapa de su manufactura como los "agentes de curado" o en la etapa final, como endurecedores metálicos; y por último los repelentes superficiales, como los silicones (18).

## CAPITULO 6

## P U Z O L A N A S

## 6.1 Antecedentes históricos.

Los grandes constructores de la antigüedad han dominado, de modo seguro, no sólo la fabricación de obras de albañilería, sino también la de concretos a partir de cantos rodados o de detritos rocosos para las grandes obras al aire libre y las hidráulicas, como lo demuestran sus baños, sus acueductos, puentes y muelles. Distinguan entre un concreto apisonado, moldeado en encofrado, de otro de relleno, a disponer para obra de ladrillo, también del concreto muy blando para obra sumergida, y para fines particulares, en obra al aire libre; por ejemplo, la cúpula del Partenón, subdividida en nichos y resuelta con nervaduras. También aprendieron a estructurar adecuadamente la granulometría de los áridos y a disminuir el peso del concreto mediante la utilización de cuerpos cerámicos huecos. Es evidente que agregaban a los morteros seroalbúmina o de otros tipos, gracias a lo cual introducían burbujas de aire de 0.1 a 1 mm de diámetro, las cuales son parecidas por su acción y tamaño a las que hoy se incorporan en el concreto aireado. También se sabe empleaban la sangre hidrolizada de los animales como productor de espuma para el concreto celular. En un horno romano, de cal, exhumado en Iversheim, del siglo III, antes de Cristo, es posible que se hayan calcinado trozos de cal dolomítica según el informe de W. Solter en 1969, ha afirmado que los silicatos de calcio hidratados, presentes en forma de agrupaciones submicroscópicas, hallados en los trozos de ladrillo del citado horno eran los mismos que los que se producen en el tratamiento del concreto al autoclave; concluye que hace 1700 años, ya se realizaba algo como el endurecimiento por el vapor y que los concretos antiguos de los romanos debían su resistencia mecánica a aquellas formaciones cristalinas.

El conglomerante propiamente dicho, en todos los concretos y morteros de los romanos para las obras hidráulicas era un mortero de cal con adición de "tierra puzolánica", aquel "polvo que, por naturaleza realiza cosas asombrosas", como se expresaba P. Vitruvio en el siglo III, antes de Cristo y también hace firmes a las presas bajo el agua de mar. Las puzolanas de la antigüedad eran, ante todo, cenizas volcánicas de la isla griega de Santorin, del grupo de las Cícladas, y las de Pozzuoli en el viejo puerto de Nápoles, del que se deriva su nombre .

En tierra alemana los romanos utilizaron, como puzolana, el polvo de ladrillo y quizás también el trass. Este forma en el grupo de las cenizas volcánicas y que en el caso de trass del Rin, en el cuenco de Neuwied, es lava del volcán del lago Laach (Eiffel), el trass de Baviera probablemente es el producto resultante de un meteorito proyectado en la falla de Nordlingen. La palabra trass se deriva de terras=tierra, vocablo al que también hay que referir terrazo.

Alrededor de 1750, las puzolanas eran el "cemento" para la cal blanca, única conocida en aquel tiempo.

En la actualidad se aplica el nombre de puzolanas a todo grupo de materias o sustancias con propiedades hidráulicas tanto naturales como artificiales (19).

## 6.2 Definición.

Las puzolanas \* son materiales silicosos o silicoaluminosos que, por si mismos, no tienen propiedades cementantes, pero que, cuando se encuentran finamente pulverizados en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio, a la temperatura ordinaria, para formar compuestos que sí tienen propiedades cementantes o hidráulicas. (20)

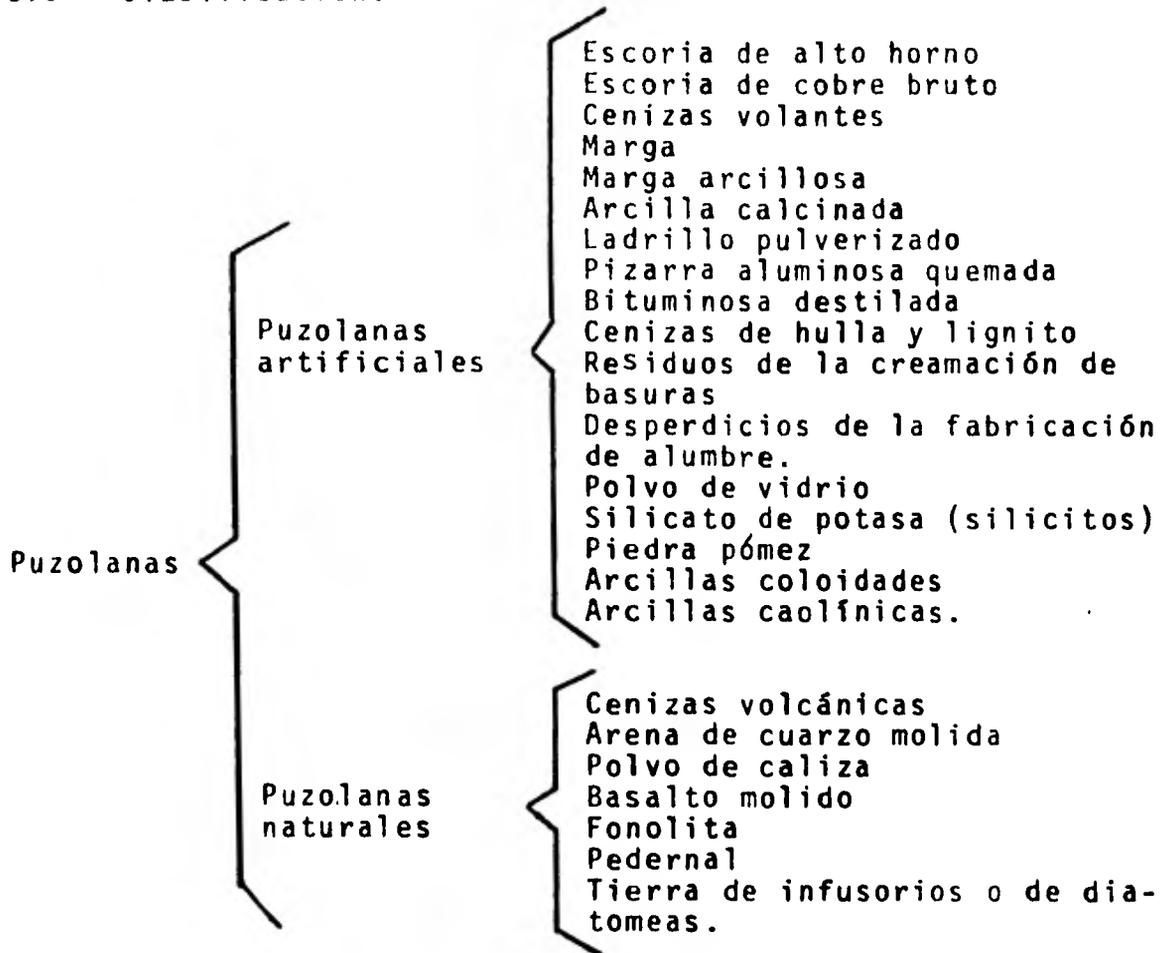
Las puzolanas pueden ser naturales o artificiales.

Puzolanas naturales son aquellas sustancias de origen natural que por si mismas (sin ninguna acción externa) cumplen con la definición dada anteriormente (\*).

Puzolanas artificiales son aquellas sustancias que:

- Siendo de origen natural es necesario un tratamiento térmico previo para que cumplan con la definición dada. (\*)
- Siendo de origen artificial (residuos, subproductos o desechos de otras industrias), por sí mismas, sin ninguna acción externa cumplen con la definición dada. (\*)

## 6.3 Clasificación.



## 6.4 Puzolanas Naturales.

Las puzolanas naturales, preponderantemente, son cenizas volcánicas que aparecen como masas sólidas o sueltas de estructura granulosa y son muy diferentes entre si en cuanto a sus propiedades hidráulicas. Las mejores son las puzolanas procedentes de cenizas, las cuales durante las erupciones volcánicas han sido granuladas por el agua del vapor condensando o de la lluvia, cuando todavía se encontraban en estado de fluidez ígnea, solidificándose en masas resistentes. Las cenizas volcánicas mezcladas con cantos de pómez y con materiales lávicos de gran tamaño y productos originados por presión de la rocas, se hallan dispuestas en las zonas que bordean a un volcán y que por cementación se han convertido en bancos compactos, rocas tobáceas. (21)

A las puzolanas más ricas en sílice, de origen principalmente orgánico, pertenecen el Kieselgur, harina fósil o tierra de infusorios que es un polvo extraordinariamente fino, constituido por esqueletos de diatomeas, algas microscópicas, unicelulares, con esqueleto eminentemente silíceo.

Mezclado, en medida más o menos reducida, con fósiles de radiolarios, substancias orgánicas, arcillosas, etc., forman masas blancas o, según el grado de pureza que con frecuencia presentan, pueden ser: grises, pardas, verdosas oscuras, de una densidad aparente extremadamente baja (en relación con el hecho de que unos 2500 millones de células de diatomeas ocupan apenas un volumen de  $1\text{cm}^3$ ); con una densidad absoluta que varía entre 1.9 y 2.3 y una densidad aparente comprendida entre 0.60 y 1.20, con el fortísimo contenido de sílice de 60 a 98%, de extremadura finura y por consiguiente, como puzolana, extremadamente energética (22).

El basalto pulverizado, es una roca volcánica que se extiende en mantos o corrientes lávidas, por lo común de color negro o verdoso, de grano fino, muy dura compuesta principalmente de feldespato del tipo de las plagioclasas con feldespatoídes como la leucita o nefelita, augita con o sin olivino, magnetita o ilmenita que al solidificarse y enfriarse se descompone en columnas prismáticas que le dan un aspecto muy típico (23).

La fonolita, pertenece al grupo de las rocas eruptivas en la que los elementos blancos son el sanidino y la nefelina. En las fonolitas leucíticas la nefelina está sustituida por la leucita (23).

El pedernal, es una variedad criptocristalina de sílice con lustre céreo, de fractura concoidea, translúcido en los bordes de color gris amarillento más o menos oscuro, con muy pequeñas cantidades de agua y alúmina (23).

La calcedonia es sílice cristocristalina que se supone formada por una mezcla de fibras de calcedonita y cuarcita; también se le considera como una variedad del cuarzo; es traslúcida, concrecionada o gutular con brillo céreo, normalmente se encuentra en forma de granulos o pequeñas masas esféricas. Se encuentra sobre productos bituminosos.(23).

El basalto pulverizado, la fonolita, el pedernal y la calcedonia son por su riqueza un ácido silícico de propiedades hidráulicas muy débiles.

La arena de cuarzo molida y el polvo de caliza las cuales de todas las substancias mencionadas son las que obran principalmente por la finura de grano. Sin embargo, la harina de cuarzo llega a reaccionar con las disoluciones alcalinas, aunque de manera muy lenta (22).

Las puzolanas naturales deben su alta capacidad de reacción hidráulica, ante todo, a su estructura física, a su entramado poroso, de gran superficie interna; en el caso de tierras diatomeas como consecuencia de la microestructura del esqueleto cristalino de seres vivos organizados.

#### 6.5 Puzolanas Artificiales

Las puzolanas artificiales son, en parte, más marcadamente hidráulicas que las naturales de mejor calidad.

Las cenizas volantes que son recogidas como residuo de la combustión, muy fino en las cámaras de deposición y en los filtros de las centrales térmicas. En las cámaras de fusión de los hogares de las actuales calderas de vapor, las cenizas volantes caen fundidas y lo mismo que ocurre con las escorias de horno alto, son enfriadas por vertido directo sobre agua, obteniendo así los llamados fundidos granulados. Estos son específicamente más densos que las cenizas volantes, hacen más

fácil su transporte y elaboración ulterior y contienen poco o nada de partículas de carbón o de coque. Las cenizas volantes y los granulados fundidos son empleados como materiales de asiento en su aplicación a obra subterránea, como arena fina de los áridos para el concreto.

La escoria de alto horno, es con mucha diferencia, la puzolana que más importancia ha adquirido. Se obtiene como producto secundario de la siderurgia. Este producto se denomina también escoria de hierro bruto para diferenciarlo de las escorias que se obtienen al transformar el hierro bruto en hierro especial (hierro maleable).

Las escorias de alto horno se obtienen en la siderurgia añadiendo a los minerales de hierro substancias productoras de escoria tales como piedra caliza, y a veces, dolomitas, las cuales forman en la masa en fusión, silicatos de calcio, de alúminas y de magnesia respectivamente con el ácido silícico y la alúmina de los minerales del coque. (24)

Las escorias se clasifican además, de acuerdo con su composición química, en básicas y ácidas. De gran valor hidráulico son las básicas, es decir, aquellas en que predominan las bases; a este tipo pertenecen las escorias de alto horno. También se clasifican las escorias en largas y cortas; las primeras, cuyo carácter es ácido, pueden ser reducidas a largos filamentos al solidificarse, siendo las últimas, las básicas, muy poco viscosas.

Las escorias ácidas son generalmente estables, aún en el caso en que el enfriamiento haya sido lento, constituyendo las escorias denominadas en bloques o pedazos. Las escorias inestables (casi todas básicas) se descomponen al aire reduciéndose a polvo, que es lo que se denomina harina de escoria o de fundición, y únicamente se convierten en estables mediante granulación o sea reduciéndolas a arena de escoria.

De arena de escoria se obtienen las variedades ligera y pesada, según la composición química de las escorias y el procedimiento aplicado para su granulación. La lana de escoria se obtiene pulverizando escorias de alto horno ricas en ácido silícico (ácidas), y la escoria de espuma o piedra pómez artificial haciendo penetrar en agua, lo más horizontalmente posible, escorias ricas también en ácido silícico, con lo cual la contextura de la escoria se hace muy porosa en virtud del vapor de agua que la penetra.

De las demás puzolanas artificiales la marga y la marga arcillosa fundidas y granuladas equivalen por sus efectos a las escorias básicas de alto horno; cuando solamente están concrecionadas, sus propiedades son semejantes a las del trass.

La arcilla calcinada y el ladrillo molido así como la pizarra aluminosa calcinada y la bituminosa destilada tienen capacidad hidráulica latente. Si se trata de arcilla o de pizarra calcinadas, los mejores resultados se obtienen cuando el calentamiento de estas sustancias no excede de lo necesario para que pierdan el agua de hidratación; si la incandescencia es intensa, resulta una disminución de sus propiedades hidráulicas. La práctica ha enseñado, de acuerdo con este hecho, que da mejores resultados la harina de ladrillos poco cocidos que la de los que lo están mucho. (25)

#### 6.6 Clasificación A.S.T.M.

Creo mi deber incluir en este trabajo la clasificación que el A.S.T.M. hace de acuerdo con la cita C 618-77 de la manera siguiente:

##### Puzolanas

Clase N: Naturales brutas o calcinadas

- cierta tierra de harina fósil
- los esquistos opalinos
- las tobas volcánicas

- los derivados de la piedra pómez
- o diversos materiales que requieren calcinación para obtener propiedades satisfactorias. (ciertas arcillas y esquistos)

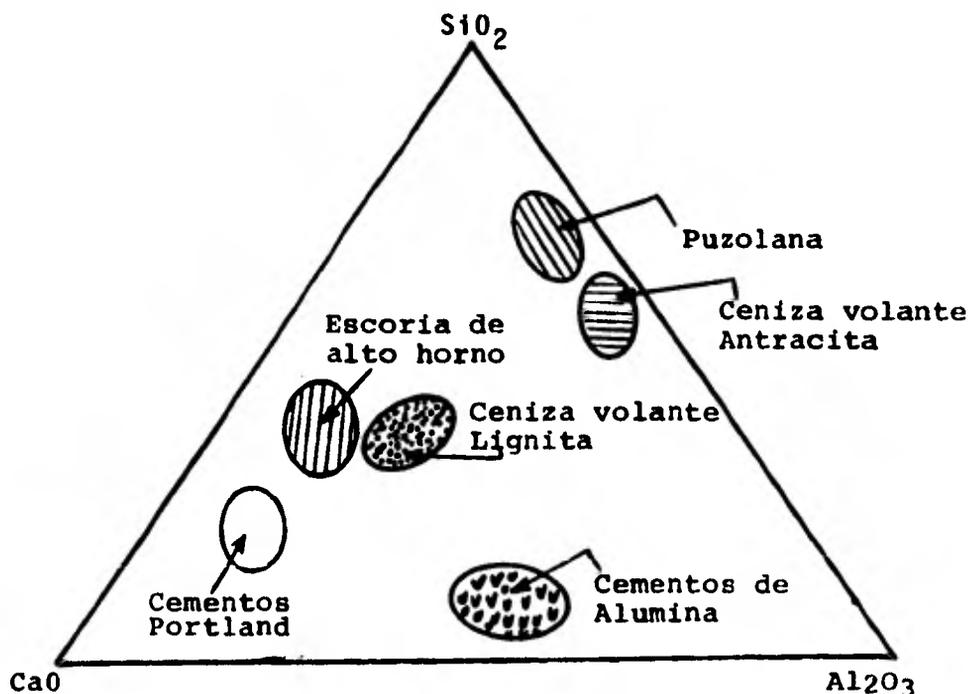
Clase F: Ceniza: volante de la antracita o del carbón bituminoso.

Clase C: Ceniza volante de la lignita o del carbón sub-bituminoso.

Clase S: Cualquier puzolana que satisface los requerimientos después de cierto procesamiento, i.e. derivados de piedra pómez procesados, ciertos esquistos calcinados y molidos, arcillas y diatomitas.

### 6.7 Composición química.

En las puzolanas naturales y artificiales, la sílice es el principal componente y el contenido de óxido de calcio es bajo. Las puzolanas suministran la sílice que reacciona con la cal añadida o con la cal libre que se produce debido a la hidratación del cemento portland.



Al proponerse hablar de la composición química de las puzolanas no se trata de decir cual es o cual debería ser desde un punto general tal composición química ya que cada puzolana dependiendo de su lugar de origen tendrá su composición química y quizás esta sea única con respecto a otras puzolanas. Pero lo que si se desea, es indicar cuales son los principales componentes a determinar y presentar de acuerdo con la bibliografía la composición química promedio que presentan las puzolanas mas comunes. (21, 27, 28, 29, 30, 31, 32.)

	% de escoria de alto horno	% de ceniza volante.	% de tierra de infusorios	% de piedra pómez volcánica.
$\text{SiO}_2$	28 - 38	40 - 60	48 - 71	41 - 45
$\text{Al}_2\text{O}_3$	8 - 24	20 - 40	16 - 22	16 - 19
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.5 - 1.7	3 - 17	3 - 10	12 - 14
$\text{CaO}$	10 - 45	2 - 10	2 - 10	7 - 10
$\text{MgO}$	1 - 18	1 - 3	5	9 - 11
$\text{SO}_3$	1.5 - 6	0.3 - 3	0.3 - 1.6	-
$\text{K}_2\text{O}$	0 - 0.5	2 - 5	0.5 - 4.0	-
$\text{Na}_2\text{O}$	0 - 0.5	0.4 - 2	0.5 - 4.0	-
$\text{MnO}$	0.2 - 1.0	0.3	-	-
$\text{P}_2\text{O}_5$	-	0.2	-	-

En el reporte final de análisis de una puzolana se deberán incluir los datos correspondientes a:

- Residuo insoluble
- Pérdida por calcinación.

#### 6.8 Propiedades químicas.

Es común a todas las puzolanas contener ácido silícico soluble, es decir, ácido silícico que pueda combinarse con la cal adicionada y convertirse en hidrosilicato de calcio, pues en la formación de hidrosilicato de calcio se funda el endurecimiento de los cementos puzolánicos, los mismo que el de todos los demás aglomerantes hidráulicos.

De la misma manera que los aglomerantes hidráulicos de por sí al solo contacto con el agua, como las escorias vítreas de al tos hornos bajo la acción de un excitador alcalino, se transforman en hidrosilicatos de calcio e hidroaluminatos de calcio, en el fraguado de los cementos puzolánicos se forman idénticas combinaciones por adaptación directa de cal añadida al ácido silícico "soluble" de las puzolanas. En el estudio de éstas hay que dedicar, pues, especial atención, no só lo al ácido silícico total, sino también al ácido silícico soluble, por lo cual es preciso, por lo pronto, poner en cla ro qué es lo que se entiende por ácido silícico "soluble". Lógicamente la determinación del ácido silícico soluble debiera efectuarse tratando con cal o por lo menos con un líquido alcalino; apartandose de esto es, sin embargo, corriente en la industria de los cementos designar con el nombre de "soluble" a aquella parte del ácido silícico total que en el ataque con ácido clorhídrico diluido entra en disolución coloidal. Sin embargo este procedimiento se funda en un concepto tomado de la Mineralogía que no tiene justificación, en realidad, en el estudio científico de las puzolanas; del contenido en ácido silícico "soluble en ácido clorhídrico" no puede formarse, desde luego, juicio sobre el contenido de ácido silícico "soluble en álcalis" y, por lo tanto, sobre el valor de una puzolana. Por otra parte, es preciso, además, darse

cuenta de que el concepto de ácido silícico "soluble en álcalis" es del todo impreciso. Sabemos que toda clase de ácido silícico e incluyendo el ácido silícico-cuarzoso libre y el ácido silícico de todos los silicatos, acaba por combinarse a elevadas temperaturas con la cal para dar hidrosilicatos de calcio; y en ello precisamente estriba la fabricación de ladrillos de cal y arena de calderas de fraguado a alta presión.

Se puede ahora preguntar en qué se diferencian estos silicatos, de gran valor hidráulico precisamente, de otros silicatos de composición análoga que no tienen la menor facultad de fraguar hidráulicamente.

La sencilla respuesta de que el ácido silícico sea soluble es tan solo otra forma de expresión, pero no da ninguna explicación sobre la facultad de reaccionar con la cal añadida. Veremos que el ácido silícico soluble se presenta bajo dos formas especiales, como ácido silícico de hidratación en combinación con agua y como ácido silícico vítreo, como ya lo conocemos de las escorias de altos hornos.

La tierra de infusorios es la que tiene entre todas las puzolanas la constitución más sencilla, ya que en sus componentes hidráulicos está constituida con gran predominio de hidrosilicato libre. En las masas de deyección volcánica que encontramos bajo la forma de trass, piedra pomez, tierra puzolánica, tierra de Santorin, etc., existe también el ácido silícico soluble en forma hidratada. En realidad, no podemos ver en esta substancia sencillamente hidrosilicato libre, sino que debemos atribuir la facultad de fraguar hidráulicamente a la presencia de ciertos hidrosilicatos de alúmina y de hierro cuya constitución no es todavía conocida con detalle; en todo caso, las investigaciones de Michaelis, Feichtinger y Hambloch, entre otros, han dado por resultado que todos los yacimientos de trass, de tierra de Santorin y de tierras pu-

zolánicas de fraguado hidráulico endurecen con el hidrato de cal tanto mejor cuanto más elevado es su contenido de agua de hidratación. La idea de aquellos investigadores de que el contenido de agua de hidratación sea por sí solo suficiente para caracterizar el valor hidráulico de estas puzolanas no es válida, sin embargo, se ha buscado también el origen de la facultad de fraguar hidráulicamente en ciertas partes vítreas que constituyen la masa fundamental del trass y de las demás puzolanas naturales.

Entre las puzolanas artificiales tiene importancia la sustancia silícea, que es un producto residual muy rico en ácido silícico que se forma en la fabricación del alumbre y otras combinaciones del aluminio con materias primas que contienen ácido silícico. La sustancia silícea contiene indudablemente hidrosilicato libre en cantidad muy considerable y su facultad de fraguar con la cal debe, por lo tanto, considerarse análoga a la de la tierra de infusorios. Por otra parte, en el polvo de altos hornos, que se produce en el servicio de éstos, tenemos una sustancia que, indudablemente, no tiene ácido silícico hidratado y cuya facultad de fraguar debe atribuirse a cierto estado vítreo. Respecto a la causa de la facultad de fraguar hidráulicamente el polvo de ladrillo no se ha determinado una explicación satisfactoria hasta el momento. Ni es satisfactoria la idea de que en el polvo de ladrillo exista una masa vítrea comparable a las escorias de altos hornos, ni tampoco puede clasificarse el polvo de ladrillo como ácido silícico hidratado, ni como hidrosilicato. Quizá pueda darse una explicación de la facultad de fraguar hidráulicamente imaginándose que en la cocción de la arcilla después de expulsar el agua de hidratación, resulta un sistema de un estado de división sumamente fino que es posible que contenga ácido silícico libre y que mientras no se llegue a una temperatura muy elevada de cocción, conserve este estado de división fina y ofrezca así una gran superficie de ataque de la cal, lo cual da lugar a una reacción, aunque el ácido silícico soluble, en el sentido en que hasta ahora hemos aceptado

este concepto, no se encuentra, en realidad en el polvo de ladrillo. (26)

#### 6.9 Propiedades físicas.

##### - Humedad

De importancia ya que si se emplea la puzolana como aditivo la humedad de ésta determinará la cantidad de agua requerida para la mezcla cemento-agregado. Ahora que si la puzolana se desea emplear para la fabricación de cemento puzolánico la importancia estriba en la temperatura y humedad a producirse en el molino ya que estos factores influyen en el proceso de molienda, la fluidez, la formación de bolas en los silos, el fraguado y el endurecimiento del cemento.

Cuando el contenido de humedad en el molino no es controlado, se puede presentar una reducción de la resistencia de 10-20%. La prehidratación del clinker en el molino es una de las razones para esta pérdida de resistencia. (21 22,27,28,29,30,31, 32.)

- Peso específico.

- Superficie específica.

Determinada generalmente mediante el método Blaine.

## CAPITULO 7

## A C T I V I D A D    P U Z O L A N I C A

¿Cuál será la base para determinar el valor de una puzolana?  
¿Dependerá todo de que cumpla con su función?

"Que siendo materiales silicosos o silico-aluminosos que, por si mismos, no tienen propiedades cementantes, pero que, cuando se encuentran finamente pulverizados y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a la temperatura ordinaria, para formar compuestos que si tienen propiedades cementantes".

Muchos autores han tratado de caracterizar a las puzolanas en base a lo que ellos han llamado "Valor puzolánico", "Puzolanidad", "Actividad puzolánica", y esto es teniendo como punto de partida dos aspectos, que son:

- Primero, la aptitud de combinación de la puzolana para reaccionar con el hidróxido de calcio, "Fijar la cal".
- Segundo, la contribución a la resistencia que el silicato de calcio hidratado resultado de la reacción cal-puzolana da al concreto.

La inquietud de estos investigadores se hace manifiesta en la búsqueda de nuevas formas y métodos para determinar el "Valor puzolánico" y de esta manera evaluar las puzolanas en base a su "actividad".

A continuación citaré algunos comentarios que a este respecto en general se han realizado:

## 7.1

"Todas las puzolanas deben su actividad a una o más de las cinco clases de estas substancias:

- Vidrio natural o artificial, silicoso y aluminoso.
- Opalo.
- Minerales arcillosos calcinados.
- Determinadas Zeolitas. Las especies del grupo de las zeolitas tienen alguna relación con los feldespatos en su constitución: pero las relaciones de oxígeno a los protóxidos, alúmina y sílice son diferentes, además de que carecen completamente de magnesio y hierro, en sustitución de los cuales se encuentran en pequeñas cantidades sodio, potasio, calcio y bario.
- Óxidos hidratados o hidróxidos de aluminio.

Estos materiales petrográficamente se pueden clasificar como sigue:

- Cenizas volcánicas sueltas o compactas "Tuffs" (incluyendo a la pumicita); riolitas o composiciones andesíticas (Riolita, andesita y basalto son rocas ígneas solidificadas tras un estado de fusión. Son superficialmente intrusivas y están constituidas por partículas cristalinas que se formaron al enfriarse rápidamente. Se diferencian entre sí por el contenido de materiales oscuros.)
- Rocas silicosas sedimentarias tales como las tierras diatomáceas, arcillas, opalinas y "cherts". (El chert, es una roca sedimentaria muy densa, aunque algunas veces porosa, microcristalina, compuesta de calcedonia, cuarzo y algunas veces ópalo.)
- Arcillas calcinadas.
- Subproductos industriales tales como: escoria de alto horno, cenizas volantes y ladrillo molido.

....." (21) (16) (25)

## 7.2

"La causa de las actividades puzolánicas se encuentra en la proporción amorfa o vitrificada y, en menor intensidad, en los minerales parcialmente alterados. Todo ello es considera-

do como la parte activa frente a la cal . (33)

Al pensar en la aptitud de combinación de la puzolana, lo que de ahora en adelante llamaremos "actividad puzolánica", de  
rán tenerse en cuenta dos aspectos: los constituyentes quími-  
cos y el estado físico. (34 ), (33)

El vidrio volcánico es un material de estructura o textura escoriacea y además, es porosa. Se ha formado de erupciones volcánicas, que dieron origen a gases y a vapor de agua en su interior, dejando una porosidad de gran superficie de paredes internas y produciendo una especie de microgel, conj  
unto de factores fundamentales para el desarrollo de la activi  
dad puzolánica. Un vidrio volcánico compacto no tiene activi  
dad puzolánica porque cristalizó o microcristalizó, es decir perdió su carácter amorfo, vítreo auténtico. (33)

#### Constituyentes químicos.

Los más importantes son la sílice y la alúmina; el óxido de fierro se supone que actúa como alúmina, quizás en forma más adecuada. Estos óxidos mantienen uniones inestables o débiles en el material de origen (vidrios o tobas volcánicas) o relajadas por un tratamiento térmico controlado (arcillas activadas).

Poco se sabe de las funciones desempeñadas por los componentes menores, sin embargo, se destaca que los álcalis intervienen en forma significativa, por sus relaciones de solubilidad con la cal.

#### Estado físico.

Su función es decisiva en el proceso. Así los materiales zeolíticos, encontrados en las tobas volcánicas, se dejan atacar por la cal más rápidamente que las puzolanas vítreas y fijan una cantidad muy superior a lo que supone un simple cambio de base. Tiene importancia, el origen de los vidrios; si se han

formado por enfriamiento de magma fundido, que fue lanzado por una erupción y pulverizado por acción de gases y vapor de agua se crea una textura porosa muy activa. (33 )

### 7.3

"La acción puzolánica se puede atribuir, tal vez sucita y simplemente a los constituyentes vítreos y amorfos y, en parte a los componentes mineralógicos microcristalinos, más o menos alterados y descompuestos, con redes distorsionadas o dislocadas.

La energía potencial de los primeros y la actividad de los segundos hace que los elementos ácidos principales de la puzolana: la sílice, la alúmina y el óxido férrico, fijen cal, como también lo hacen, en gran medida, los componentes zeolíticos de las tobas volcánicas.

Para que esta fijación de cal tenga lugar con amplitud y eficacia, la puzolana debe ser lo más activa posible, dependiendo la actividad total de su finura y del contenido global de sílice y alúmina. La actividad a corto plazo del contenido de alúmina, principalmente" (1)

### 7.4

"Al hidratarse el cemento portland libera hidróxido de calcio (cal hidratada), compuesto que en nada contribuye a la resistencia mecánica del concreto. Este compuesto es soluble en agua y es susceptible de eliminación por acción de lavado.

Si la puzolana provee en forma finamente dividida la sílice necesaria para reaccionar con esa cal, para formar un silicato de calcio hidratado, de relativa baja solubilidad, este nuevo compuesto contribuye tanto a impermeabilizar el medio como a incrementar la resistencia mecánica.

Este es el principio básico aceptado para explicar la actividad puzolánica y sus efectos.

La velocidad con la que un material silíceo se combina con la cal, depende de varios factores, algunos de los cuales aún no se conocen con claridad.

Aparentemente, cualquier material silíceo, independientemente de su estado mineralógico, puede combinarse con la cal a temperatura ordinaria, siempre y cuando se muele a una elevada finura.

La mayoría de las puzolanas contienen otros elementos además de la sílice, y es casi seguro que en el proceso de reacción química se formen otros compuestos más complejos, que incluyen aluminio, fierro y álcalis en su estructura.

No es posible, por lo tanto, establecer una diferencia de composición química entre materiales puzolánicos y no puzolánicos, debiendo recurrirse a diversas pruebas físicas y químicas que se han diseñado especialmente para evaluar tanto la calidad de la puzolana, como la del cemento puzolánico".(36)

## 7.5 EFECTOS DE LA TEMPERATURA.

La experiencia ha demostrado que un tratamiento térmico (previo a su empleo) a ciertas puzolanas naturales es un proceso importante para el desarrollo de sus cualidades cementantes.

"Un calentamiento controlado mejora la actividad de las puzolanas; con ello se deshidrata y "ahueca" la red cristalina, quedando más propensa a reacciones. Un calentamiento excesivo reduce o anula dicha actividad". (37 )

### 7.5.1 Tierras Diatomeas.

La actividad puzolánica de la diatomita propiamente dicha re-

sulta en muchos casos mermada por la presencia de sustancias orgánicas o de arcillas caolínicas con las cuales puede hallarse asociada. Fácilmente se elimina la influencia nociva de las sustancias antes dichas; en el primer caso por simple y rápida calcinación a baja temperatura del precitado material en el segundo, por calcinación más o menos prolongada del material a 600°- 700°C. Por encima de esta última temperatura la diatomita muestra una densidad aparente más elevada y una actividad puzolánica de desarrollo cada vez más lento. Más allá de los 870°C se transforma primero en tridimita, luego en cristobalita perdiendo totalmente las propiedades puzolánicas. (38)

#### 7.5.2 Silfcitos.

Los silcitos (silices denominadas hidratadas) geliformes. Derivadas substancialmente del ataque ácido a rocas silíceas, presentan con frecuencia actividad puzolánica elevada y de rápido desprendimiento, comparable con la de las diatomitas.

Resultan a veces asociadas a sustancias orgánicas o a arcillas caolínicas que reducen en mayor o menor grado su actividad, para eliminar esto se tratan en la misma forma que las anteriores, sometiéndolas a calcinación más o menos rápida a unos 700°C. Con frecuencia también contienen arcillas coloidales montmorilloníticas las cuales no reducen mucho su actividad. En tal caso pueden emplearse después de someterlas a una desecación a unos 300°- 350°C. (38)

#### 7.5.3 Las arcillas coloidales (pertenecientes al subgrupo de la montmorillonita.)

Caracterizadas por el hecho de ceder la casi totalidad del agua de constitución entre 100° y 300°C para recuperarla cuando se exponen al aire húmedo, muestran alta actividad puzolánica de desarrollo rápido; se diferencian así netamente de las arcillas caolínicas, las cuales resultan del todo insensibles a

la acción del calor hasta cerca de los 500°C y no adquieren propiedades puzolánicas sino hasta temperaturas superiores. (38)

#### 7.5.4 Arcillas caolínicas.

Estas arcillas tratadas a una temperatura de más o menos 750°C (cocción supranormal de Vicat) procurando que esta cocción no sufra detención alguna y enfriando rápidamente, adquieren en función del contenido de caolinita, alta actividad y de rápido desarrollo. (38)

#### 7.5.5 Arcillas derivadas de la silicación de cenizas volcánicas resultan esencialmente constituidas por montmorillonita (que es la predominante) y beidellita.

Estas arcillas llevadas a 600°C pierden en forma irreversible su aptitud al fortísimo entumecimiento que les produce el contacto con el agua y que es, en substancia, una de sus principales características físicas. Adquiriendo el máximo de actividad puzolánica a esa temperatura. Actividad que se atenúa sensiblemente y desaparece del todo cuando se mantienen durante algún tiempo a unos 800°C o temperaturas superiores. (38)

De esta manera se podrá notar la importancia de la temperatura en el aumento o disminución de la actividad puzolánica que presentan algunas puzolanas, las cuales por este hecho se les denomina puzolanas artificiales.

Hay algunas controversias acerca de los cambios que sufren las arcillas cuando por efecto de la temperatura pierden parte o toda el agua combinada que contienen; pero se cree que debido a eso una parte o toda la silica vítrea pase al estado de sílice amorfa y a esto se deba la disminución o anulación de la actividad puzolánica en esos casos. (37 )

Pero no es posible cifrar la actividad puzolánica en todos y cada uno de los aspectos indicados. Sabemos de la importancia de cada uno de ellos, mas cada puzolana representa un caso

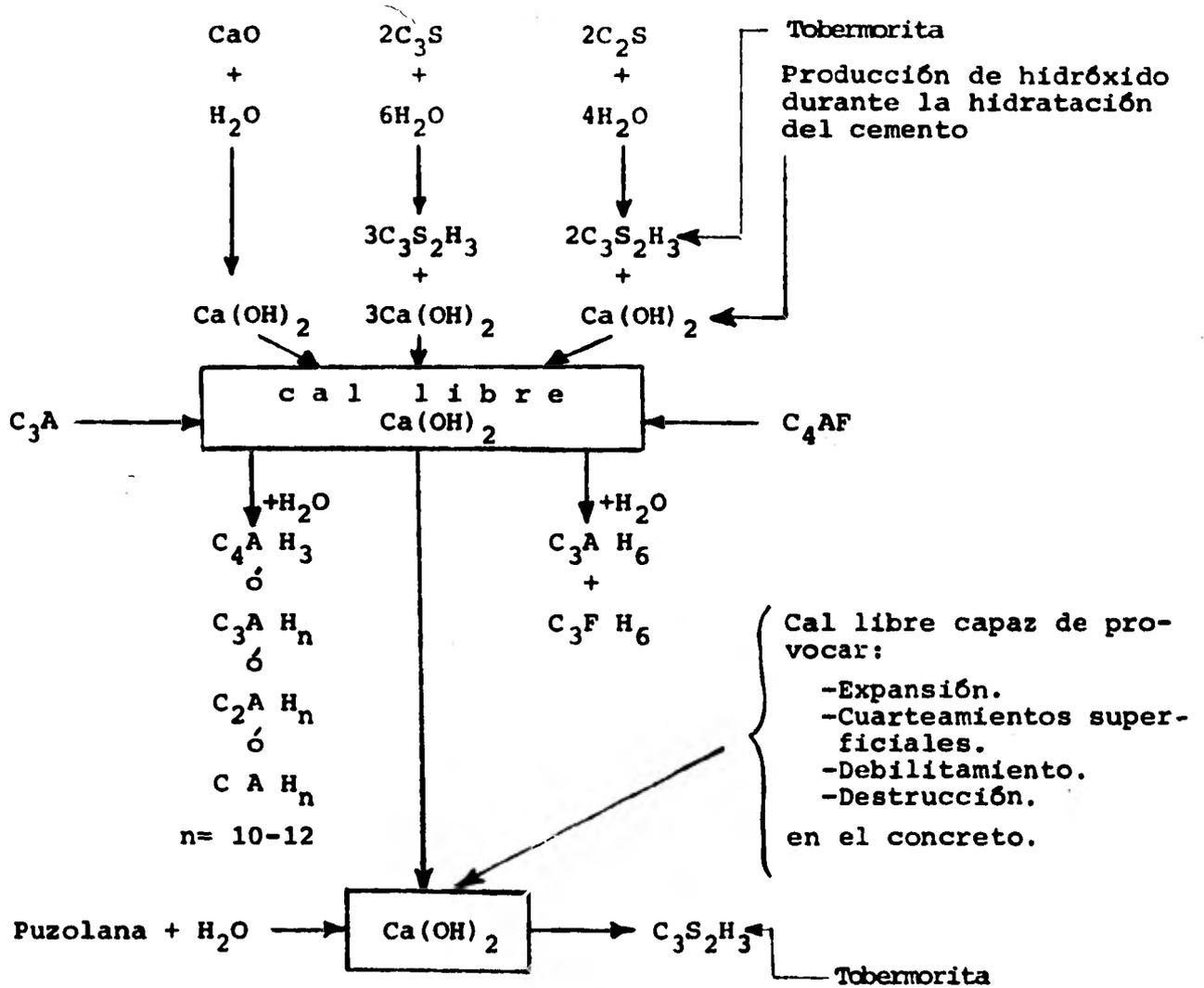
particular de superposición de factores físicos y químicos, internos y externos. No existe una teoría general.

Lo único seguro, dejando a un lado la complejidad y la cinética de las transformaciones que ocurren entre puzolana y cal, es que finalmente se forman muy parecidos compuestos a los que hay en un cemento portland hidratado. Con las modernas técnicas de análisis físicoquímicos, se ha demostrado que aparece un silicato hidratado y gelatinoso, de baja basicidad y composición variable, según el tipo y la proporción de puzolana y edad de la mezcla.

Este es el punto importante en la acción puzolánica:

- sustitución del hidróxido de calcio por tobermorita, cambio positivo porque:
- la cal liberada (hidróxido de calcio) es un producto no hidráulico, soluble y pernicioso.
- la tobermorita (silicato de calcio hidratado) es un producto hidráulico y resistente, base de los conglomerantes silico calcáreos hidratados.

7.6 Actividad puzolánica diagrama.



A C C I O N      P U Z O L A N I C A

## 7.7 MEDIDA DE LA ACTIVIDAD PUZOLANICA.

No hay un criterio único y general para medir la actividad puzolánica. No existe este patrón único, tanto por los diversos aspectos que se pueden medir, como por la forma misma en que actúa la puzolana. El desarrollo de la resistencia es importante; la puzolana no es hidráulica "per se" como la escoria siderúrgica. ¿Debe ensayarse combinada con cal o con el cemento portland que le sirve de base?.

Pero el efecto puzolánico consiste en fijar la cal y bien se puede pensar en medir esta propiedad en forma independiente de las cualidades mecánicas. En el ensayo de la puzolana sola se controla su composición química, su solubilidad en ácido y/o álcalis, su capacidad de fijar la cal, etc.

El ensayo antiguo consiste en estudiar el comportamiento de la mezcla cal puzolana. En ello se pretende medir el efecto puzolánico mediante controles de tiempo de fraguado, resistencia mecánica, residuos insolubles de la puzolana y de la pasta puzolana-cal a distintas edades de hidratación.

Finalmente es necesario hacer notar, una vez más, que gran parte de los ensayos se relacionan con la resistencia mecánica. La mayoría de las veces esto se logra preparando varias muestras en las cuales el contenido de puzolana varíe de un 15 a 40% siendo el resto cemento portland normal.

A continuación se citan algunos criterios que en la actualidad se emplean para apreciar la actividad puzolánica.

CRITERIOS DE APRECIACION DE LA ACTIVIDAD PUZOLANICA DE LOS COMPONENTES SECUNDARIOS DE LOS CEMENTOS

País	Turquía	Estados Unidos y México		Alemania Oriental										
Norma	TS 639 (1968)	ASTM C 618 - 73 (para concreto)		TCL 28 101/03										
Naturaleza del componente	Cenizas volantes	Cenizas volantes	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">Puzolanas</th> </tr> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">Naturales</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Artificiales</td> </tr> </table>		Puzolanas		Naturales	Artificiales	Cualquier naturaleza.					
Puzolanas														
Naturales	Artificiales													
Composición del o de los morteros.	<p style="text-align: center;">2 morteros normales con:</p> <p style="text-align: center;">A; 65% cemento + 35% <math>\frac{\rho_{cv} \text{ ó } \rho_p}{\rho_c}</math></p> <p style="text-align: center;">cenizas o puzolanas (*)</p> <p style="text-align: center;">B: 100% cemento</p>			<p>a: 100% cemento</p> <hr/> <p>b: 70% cemento 30% cenizas</p> <hr/> <p>c: 70% cemento 30% arena</p> <hr/> <p>d: 30% cemento 70% cenizas</p> <hr/> <p>e: 30% cemento 70% arena</p>										
Relación de la resistencia entre mortero con adición y mortero-testigo (%) Edad de los ensayos: 28 días.	$\frac{A}{B} \geq 70$	$\frac{A}{B} \geq 85$	$\frac{A}{B} \geq 75$	$\frac{A}{B} \geq 85$	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Componentes</th> <th style="width: 20%;">Activos</th> <th style="width: 65%;">Poco act.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><math>\frac{b-c}{a-c}</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\geq 30</math></td> <td style="text-align: center;">10 a 30</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><math>\frac{d-e}{a-e}</math></td> <td style="text-align: center;"><math>\geq 10</math></td> <td style="text-align: center;">5 a 10</td> </tr> </tbody> </table>	Componentes	Activos	Poco act.	$\frac{b-c}{a-c}$	$\geq 30$	10 a 30	$\frac{d-e}{a-e}$	$\geq 10$	5 a 10
Componentes	Activos	Poco act.												
$\frac{b-c}{a-c}$	$\geq 30$	10 a 30												
$\frac{d-e}{a-e}$	$\geq 10$	5 a 10												

(\*)  $\rho_{cv}$ ,  $\rho_p$  o  $\rho_c$  = densidad de las cenizas volantes, puzolanas o cemento. (39)

CRITERIOS PARA APRECIAR LA ACTIVIDAD PUZOLANICA DE LOS COMPONENTES SECUNDARIOS  
DE LOS CEMENTOS.

Pafs	Alemania Occidental		Austria	
Norma	(y)	DIN 51 043	Onorm B 3323	Onorm B 3319
Naturaleza del componente.	Cenizas volantes	Trass	Trass	Cenizas volantes
Composición del o de los morteros.	2 morteros normales con: a: cemento: 1 b: cemento: 0,8 cenizas: 0,2	Trass : 1 Cal hidratada : 0,8 Arena normal : 1,5	Trass : 0,7 Cal hidratada : 0,8 Arena normal : 3,0	3 morteros normales con: a: cemento puro b: { 0,85 cemento 0,15 cenizas c: { 0,85 cemento 0,15 arena fina
Resistencia a la compresión (Kp/cm <sup>2</sup> )		7 dfas: > 45 28 dfas: > 140	-- 28 dfas: > 50	
Relación de la resistencia entre morteros con adición y mortero-testigo (%)	$\frac{b}{a} \geq 90$ a 2,7 y 28 dfas.			$\frac{b - c}{a - c} \geq 30$ a 28 dfas.

(y) Se trata de exigencias no normalizadas que hay que respetar para conseguir una marca de calidad que autorice el empleo de cenizas como adición al cemento (mas. 20% del peso de cemento) en el concreto ; los 2 valores extremos ( 39 ) están garantizados por el producto comercial Efa-füller.

Como se podrá observar el difícil problema de la valoración de una puzolana, no tiene una solución única y satisfactoria. Y puesto que una puzolana ejerce acciones -positivas- diversas y se utiliza en unas condiciones bien determinadas, su evaluación no tiene sentido si no se hace en función de la finalidad que con ella se persigue, y en condiciones lo más aproximadas posible a las de su empleo en la práctica; y siempre fijando o controlando el mayor número posible de variables. A este respecto cabe decir que una cosa son los métodos para el estudio teórico de la acción puzolánica como tema de investigación en un laboratorio, y otra cosa muy distinta son los métodos para la valoración de los materiales puzolánicos.

## CAPITULO 8

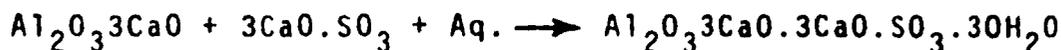
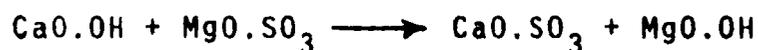
## C E M E N T O P U Z O L A N I C O

La preparación de un alglomerante de elevado valor hidráulico y capaz de proporcionar con seguridad aglomerados estables en los medios que tenderían a disgregar más o menos velozmente los morteros a base de portland, ha sido intentada desde hace mucho tiempo.

Se ha tratado, en primer lugar, de eliminar la antedicha causa de disgregación: la formación de la expansiva sal de Candiot por la acción de los sulfatos sobre los aluminatos fuertemente básicos del mencionado aglomerante.

W. Michaelis, gran vanguardista de la actividad cementera, contribuyó ya a la solución de dicho problema con una importante aportación. A la vista de modelos famosos, las antiguas mezclas de cal y puzolana, propuso para las obras en el mar, el empleo de la mezcla de portland y puzolana. (40)

Pensando que los morteros a base de tal mezcla, oportunamente dosificada, en contacto con el agua que contenía sulfato de magnesia en disolución no deberían sufrir daños por causa de la expansión, dado que a consecuencia de la fijación de la cal, procedente de la hidratación del portland, por los elementos químicamente activos de la puzolana, no sería posible que se desarrollasen las reacciones:



La validez de la especulación propuesta por Michaelis fue comprobada y sostenida por Tetmajer (41), Erdmenger (42), Le Chatelier (43), Fére (44), Poulsen (45), y por otros muchos autores.

A principios de 1909, Ferrari a base de sus primeras observaciones sobre el particular opinó que el ulterior estudio de los cementos puzolánicos debía conducir a resultados más importantes que los hasta entonces conseguidos; que pudiera precisar el tipo de cemento unitario más adecuado para formar aglomerantes puzolánicos de muy alta resistencia química (pues la adopción generalmente practicada de cementos de elevado contenido de aluminato tricálcico para la obtención de productos que se hayan de exponer a la acción de los sulfatos no parecía verdaderamente lógica) y además parecía importante demostrar que el campo de aplicación de los mencionados aglomerantes era, con mucho, más vasto de lo previsto.

Desde entonces los estudios se han desarrollado constantemente, habiendo observado:

- a) Que la incapacidad del portland fuertemente básico para formar masas hidratadas impermeables, provenía de la influencia que sobre la impermeabilidad de tales masas tenían las fuertes proporciones de cal de hidrólisis y de hidratación del propio cemento. Este hidrato presenta en efecto una solubilidad en el agua incomparablemente mayor que la de los otros hidratos del cemento. Tiende a difundirse en el medio de inmersión del conglomerado correspondiente haciéndole cada vez más permeable, y por consiguiente, más atacable por el medio de que se trata. La parte que escapa a tal difusión, ya que se transforma con el tiempo en gruesos cristales con muy escasa aptitud de adherencia (en contacto con el agua y anhídrido carbónico) da lugar, no a la forma sumamente adherente del carbonato de calcio y muy compacta de los otros hidratos citados, sino más bien a una forma pulverulenta sin cohesión que tiende a disminuir de ese modo la eficiencia de la costra protectora que es el único factor en la duración de todo complejo cementante.
- b) Que las masas hidratadas de las mezclas de portland y de puzolana bien proporcionadas o dosificadas resultan capaces de adquirir más o menos rápidamente (según sea la actividad

puzolánica) la más marcada compacidad y en consecuencia , una impermeabilidad al agua prácticamente absoluta, en la descripción de la patente italiana (38) se dice lo siguiente:

"En relación con las peculiares propiedades de las mezclas experimentales, las sustancias puzolánicas deben mirarse como el correctivo más valioso de las deficiencias naturales o eventuales del portland. Así, por ejemplo, los tiempos de fraguado demasiado restringidos que con frecuencia presenta dicho producto, se alargan convenientemente, gracias a la adición de aquellas sustancias; los desastrosos efectos de los agentes expansivos quedan reducidos o eliminados y (cosa de capital interés), la impermeabilidad prácticamente absoluta viene a substituir, como característica de la masa hidratada, gracias a dicha adición, la propiedad contraria que a todos los cementos cálcicos, a excepción de los silicosos con un alto índice, característica que representa la principal causa de su degradación con el tiempo".

Después de algunos años de asiduas investigaciones sobre el tema (43) se pudieron deducir las siguientes conclusiones:

- 1a. Que la resistencia a la acción del agua de mar, a las aguas minerales sulfatadas, de los cementos puzolánicos (que, entonces muchos consideraban específica de la masa hidratada de tales cementos, que es en realidad consecuencia de la impermeabilidad de dicha masa adquirida con el tiempo por la formación abundante del gel, provocada por el ataque de la cal de hidrólisis del componente ácido. Impermeabilidad que es prácticamente absoluta), es función estricta del porcentaje de aluminato tricálcico propio del precipitado componente básico.

De los numerosísimos morteros considerados, los corres-

pondientes a las mezclas con un componente básico pobre en aluminato tricálcico (que se distinguía especialmente por un módulo  $Al_2O_3/Fe_2O_3 < 1$ ) se habían mostrado, en efecto, muy estables ante la acción agresiva de las aguas mencionadas, mientras que los correspondientes a mezclas de componente básico con elevada dosis de aluminato tricálcico habían sufrido una lenta pero profunda alteración.

Tal fenómeno había interesado únicamente a la superficie del mortero porque la presencia de la puzolana había determinado en el mortero citado la máxima capacidad con la consiguiente detención de la difusión de la cal en el medio de inmersión. La capa externa de aquella, sutil pero de naturaleza compleja se había desprendido y renovado asiduamente y la masa cementicia, en consecuencia, había experimentado una verdadera y auténtica corrosión centrífuga (inversa precisamente a la que es característica de la emigración de la cal de que habían sufrido los morteros a base de portland puro) que confería a la superficie de la masa mencionada una microestructura cavernosa.

Esto había anunciado claramente que, en el primer caso, las reducidas proporciones de sulfoaluminato expansivo originadas en el susodicho revestimiento protector por la acción directa o indirecta de los sulfatos no habían logrado mermar la impermeabilidad de dicho revestimiento en el segundo caso, en cambio, las fuertes proporciones del agente expansivo indicado, originadas como ya se ha dicho, habían provocado en aquella costra, tensiones superiores a las fuerzas de reacción despertadas en ella y, por consiguiente, numerosas y nocivas soluciones de continuidad.

- 2a. Que el endurecimiento de los morteros a base de los cementos puzolánicos considerados, conservados al aire,

progresa con velocidad comparable a la de los mismos morteros conservados en agua. Esto estaba en relación con el hecho de que el agua indispensable para que los elementos activos del componente puzolánico se gelificaran y endurecieran en presencia de la cal, era suministrada por deshidratación de los geles primeramente formados principalmente por el componente cemento, a continuación del amasado y de la consiguiente humectación de los morteros ensayados. Estos resultaban superiores desde cualquier punto de vista a los correspondientes de los cementos unitarios .

- 3a. La resistencia a toda edad, es como se sabe, patrimonio casi exclusivo del silicato tricálcico. Pero en contenido alto de silicato tricálcico en cemento exige un alto grado de saturación de cal en el clinker, con el riesgo de una elevada o inadmisibles proporción, sistemática o accidental, de cal libre y en consecuencia, con posible y muy probable riesgo de tener cementos expansivos que pueden dar lugar a concretos deleznable. (38)

Al margen de esto, un alto contenido de cal libre en el cemento proporciona una reserva alcalina y un pH elevados. El pH alto es bueno para mantener, en condiciones normales, el estado de pasividad electroquímica de las armaduras en el concreto armado y, sobre todo, en el pretensado, lo cual las protege contra la corrosión. La gran reserva alcalina contribuye al mismo objeto en condiciones de agresividad de tipo ácido al concreto. Estos son aspectos positivos. Pero tanto el pH como la reserva alcalina elevados por razones de equilibrio, exponen a los cementos a ser atacados más fuertemente por aguas puras y carbónicas agresivas. Este es un aspecto negativo que aclara los anteriores, en la forma siguiente: en unos medios agresivos de naturaleza ácida las armaduras se defienden a costa del sacrificio del propio concreto, mientras éste puede seguir sacrificándose.

Una resistencia elevada a edades tempranas requiere un contenido alto de aluminato tricálcico. Pero entonces el cemento resultante puede ser difícil de regular en su fraguado y presentar una fuerte retracción, lo que implica el tener concretos fisurables. Además y en ciertos casos esto es aún más importante; esos concretos, en presencia de sulfatos, forman etringita expansiva que provoca su destrucción.

Altos contenidos aislados o conjuntos de silicato y aluminato tricálcicos en un cemento, confieren a éste un elevado calor de hidratación el cual, en concreto en grandes masas, y sobre todo con dosificaciones altas y fuertes gradientes de temperatura en relación con el medio ambiente, puede dar lugar a fisuración por excesiva retracción térmica, dada la escasa conductividad del concreto, como la de cualquier material pétreo.

Una solución para reducir los contenidos de silicato y/o aluminato tricálcico de los clinkerés, conduce a una disminución de las resistencias de los cementos a largo y/o corto plazo. No siempre posible, fácil, económico o conveniente. Sin embargo es una solución que se adopta en el caso de los cementos portland resistentes al yeso, y en los de bajo calor de hidratación.

Otra solución sería la de reducir lo más posible en los cementos hidratados la proporción de portlandita, la cual, sin aportar nada en el aspecto de las resistencias, crea dificultades desde el punto de vista de la durabilidad. Pero para que esto sea eficaz se debe conseguir sin reducir los contenidos de silicato y de aluminato tricálcicos -y sobre todo del primero- en los clinkerés. Ya se comprende que esto requiere molerlos junto con materiales capaces de reaccionar con la cal de hidrólisis, para dar compuestos hidratados de la misma naturaleza que los que dan los propios componentes del clinker.

Estos materiales, por definición, no son otros que los de carácter y actividad puzolánica, bien sean naturales o artificiales. Con la particularidad de que desarrollan tanto mejor su acción y propiedades, precisamente cuanto mayor sea el grado de saturación del clinker al que se añadan, es decir, cuanto más alto sea su contenido de silicato tricálcico. En tales condiciones es también posible una sustitución de clinker por puzolana en una proporción mayor (cemento puzolánico).

Dicho de otra manera, al ser mayor la "dilución" del clinker en el cemento -conjunto de clinker más puzolana-, también se diluyen más en éste tanto el silicato como el aluminato tricálcico y la posible cal libre, atenuándose los efectos expansivos, los retractivos -fisurabilidad- y la eventual susceptibilidad del cemento en cuestión, al yeso y a los sulfatos en general. En este caso lo que hay que sacrificar son las resistencias a corto plazo.

Esto es así porque durante los primeros períodos de la hidratación prevalece el efecto de la "dilución" del clinker por parte de la puzolana sobre la actividad de ésta, ya que la acción puzolánica no ha tenido aún tiempo suficiente para manifestarse, pues a temperatura ordinaria los procesos correspondientes son lentos. Pero a plazos intermedios y, sobre todo, largos, dicha acción contrarresta y llega a rebasar el efecto de la "dilución", de tal manera que, a partir de una cierta edad, los cementos puzolánicos pueden dar resistencias superiores a las de los cementos portland, incluso procedentes del mismo clinker. ( 1 ).

#### 8.1 LA COMBINACION CEMENTO PORTLAND PUZOLANA

La mayoría de las puzolanas deben reducirse a polvo fino para poder usarse en mezclas cementantes, y si esta puzolana se considera como constituyente integral del cemento portland puzolana, entonces suele ser molida conjuntamente con el clinker y yeso del cemento (la norma mexicana exige esta molienda con-

junta).

Un concreto puzolánico puede, pues, prepararse con la puzolana añadida al preparar la mezcla o utilizando un cemento puzolánico.

En el primer caso es posible gobernar a voluntad algunas características de la puzolana, tales como finura y la proporción con el tipo de cemento elegido, para obtener cualidades específicas en el concreto. Las desventajas de este procedimiento radican en que se tiene un mayor costo de la puzolana, en la necesidad de una dosificación muy cuidadosa y la dificultad para obtener una mezcla íntima y homogénea entre el cemento y la puzolana.

En el cemento puzolánico, la puzolana ha sido integralmente incorporada al cemento, y aunque normalmente se agrega en una proporción prefijada, la dosificación de la misma está calculada por el fabricante para brindar las ventajas de la puzolana, aunadas a resistencias mecánicas óptimas.

## 8.2 PROPIEDADES DE LA PUZOLANA EN LOS CONCRETOS

Cuando se desea un concreto con una característica especial, dada por la puzolana, es recomendable realizar las pruebas necesarias para evaluar el resultado y la magnitud de esa acción puzolánica. Es posible, sin embargo, generalizar en cuanto a algunas propiedades de los cementos puzolánicos que constituyen un común denominador de los mismos.

Cabe advertir que en la preparación de un concreto con cemento portland puzolánico, deben seguirse los mismos procedimientos recomendados por la elaboración de concretos con cemento portland normal.

### 8.2.1 Trabajabilidad

Es característica de las puzolanas la facultad de mejorar la docilidad del concreto, aumentando su plasticidad y reduciendo al mismo tiempo la segregación y el sangrado. Estos efectos son más marcados en las mezclas pobres que en las ricas. (36)

#### 8.2.2 Resistencia a aguas agresivas.

El cemento puzolánico mejora la resistencia de un concreto a ciertos agentes agresivos, como los sulfatos de sodio y magnesio disueltos en el agua. También los hace más resistentes a las aguas ligeramente ácidas o de bajo pH. Es recomendable particularmente para obras marinas y obras sanitarias. (36)

#### 8.2.3 Calor de hidratación.

El calor de hidratación del cemento puzolánico es siempre menor que el del cemento portland correspondiente, y cuando esta cualidad es indispensable como en el caso de colados masivos de obras hidráulicas, es indudable que el cemento puzolánico resulta ideal.

Esta reducción del calor de hidratación generado ayuda a disminuir los agrietamientos del concreto imputables a la contracción térmica. (36).

#### 8.2.4 Permeabilidad.

Una de las propiedades más importante de las puzolanas reside en su habilidad para reducir la permeabilidad del concreto, sobre todo en los de mezclas pobres. Esta impermeabilidad resulta muy deseable en obras sobre terrenos húmedos y salitrosos, y coadyuva grandemente a reducir las eflorescencias que a menudo afean la superficie del concreto. (36).(58)

#### 8.2.5 Reacción álcali - agregado .

En renglones con agregados reactivos a los álcalis, los cementos puzolánicos proporcionan una protección extraordinaria al inhibir la expansión retardada en el concreto, expansión que ocurre cuando los agregados quedan expuestos a los álcalis del cemento o de cualquier otra fuente.

#### 8.2.6 Resistencia mecánica a la tensión.

En general y bajo condiciones normales de curado de concreto, las resistencias a la tensión a edades tempranas (hasta 28 días), proporcionadas por un cemento puzolánico, son comparables a las del cemento portland normal y mejoradas a edades más tardías.

#### 8.2.7 Resistencias mecánicas a la compresión.

En igualdad absoluta de finura (Blaine), el cemento puzolánico manifiesta resistencia algo más baja que el cemento portland normal, a edades tempranas, aunque posteriormente las iguala o supera.

Lo anterior es explicable por la relativa lentitud de la reacción sílice-cal de la puzolana cemento, lográndose estas resistencias iniciales con la aportación casi exclusiva del cemento. Sin embargo, dado que el tamaño de las partículas es también un factor de influencia en la velocidad de reacción y afecta la resistencia total, es factible dotar al cemento puzolánico de resistencias iniciales comparables a las del cemento portland normal simplemente moliéndolo más finamente. Las resistencias a largo plazo se verán afectadas también favorablemente. (1), (38), (48), (47).

#### 8.2.8 Rendimiento.

Como el cemento puzolánico tiene (generalmente) una densidad menor que la del cemento portland (2.9 Vs. 3.1 aproximadamente), en igualdad de proporcionamientos en peso de los agrega-

dos, agua y cemento, el rendimiento en el concreto será algo mayor (entre 3 y 7%) cuando se utiliza un cemento puzolánico, con el consiguiente beneficio económico. (36)

#### 8.2.9 Temperatura

La temperatura elevada ayuda a desarrollar la actividad de un cemento puzolánico, situación que favorece su utilización en climas cálidos. Por el contrario, no se recomienda colar el concreto en temperaturas frías (menores de 10°C ) sin tomar precauciones especiales.

En resumen, en lo referente a concretos, el campo de utilización del cemento portland puzolana es tan amplio como puede serlo el cemento portland normal.

En la tabla 1 se presenta una sinopsis del comportamiento de las puzolanas en los concretos. (36)

## T A B L A 1

Pruebas de evaluación de puzolanas y resultados previstos en el concreto.

<u>P R U E B A</u>	<u>E F E C T O D E L A P U Z O L A N A</u>	<u>O B S E R V A C I O N E S</u>
Resistencia a la tensión.	Más alta a edades largas.	Mayor resistencia al agrietamiento.
Resistencia a la compresión.	Menor a edades tempranas igual o mayor a edades largas.	Adecuada para todo propósito, puede incrementarse.
Calor de hidratación y aumento de temperatura.	Reducido.	Reduce agrietamiento térmico y contracción al enfriamiento.
Permeabilidad.	Mucho menor.	Importante en obras hidráulicas.
Resistencia a los sulfatos.	Aumentada, particularmente con clinker tipo 1.	Importante para contacto con agua marina o salitrosa.
Contracción por secado.	Aumentada.	No es seria con un buen curado y buena puzolana.
Trabajabilidad.	Mejorada.	Importante en mezclas pobres.
Propiedades elásticas.	Módulo de elasticidad y relación de Poisson algo menores.	Menos agrietamiento.
Congelamiento y deshielo.	Algo menos resistente.	Puede compensarse con inclusores de aire.
Reacción álcali agregado.	Reducida.	Importante cuando se tiene que usar agregados reactivos.

## CAPITULO 9

## REACCION DE LOS ALCALIS

La interacción de los álcalis del cemento portland con algunos componentes silicosos de ciertos agregados del concreto, produce una reacción que puede ser la causa de una expansión de estos agregados, lo que, a su vez, es motivo de un deterioro general del propio concreto, que revienta o estalla por la presión interna del agregado activo, principalmente de las gravas, al aumentar de volumen excesivamente y en poco tiempo, cuando el concreto ya ha endurecido.

Los álcalis son el óxido de sodio  $\text{Na}_2\text{O}$  y el óxido de potasio  $\text{K}_2\text{O}$  que se encuentran en el cemento portland en proporciones relativamente pequeñas (como 0.60 % del cemento). Desde luego que es preferible usar cemento con un bajo contenido de álcali y evitar el uso de agregados activos, pero cuando las circunstancias no permiten económicamente esta selección pueden emplearse cementos puzolánicos. (49)

Se ha descubierto que hay tres clases de puzolanas que pueden reducir la expansión de los agregados reactivos en el concreto o mortero:

- a) Las sustancias silicosas amorfas o silicoaluminosas, como algunos ópalos, rocas opalinas, vidrios volcánicos, tierras diatomáceas, arcillas calcinadas de tipo caolín y algunas cenizas volcánicas.
- b) Arcillas del tipo montmorillonita (este grupo comprende los minerales bentoníticos arcillosos que tienen la particularidad de hincharse cuando se mojan y se vuelven blandos y resbalosos) como la bentonita conteniendo calcio como catión intercambiable y que haya sido calcinada a temperaturas entre  $500^\circ\text{C}$  -  $1000^\circ\text{C}$  pero no

mayores para no destruir su estructura cristalina.

- c) Combinaciones de las dos categorías antes mencionadas incluyendo algunas pizarras. (50)(51) (57)

## CAPITULO 10

## RESISTENCIA A LOS SULFATOS

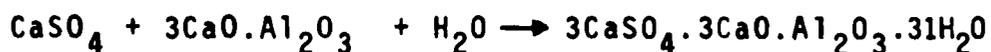
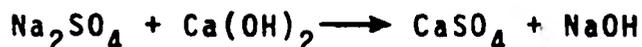
Son tres los sulfatos que más comúnmente destruyen el concreto y son a saber:

- sulfato de sodio
- sulfato de magnesio
- sulfato de calcio.

## 10.1 ATAQUE CAUSADO POR SULFATO DE SODIO

Se encuentra esta sal en algunos lagos naturales y en aguas que han desleído terrenos alcalinos así como en algunos deshechos industriales.

De acuerdo con Lea (52) el sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio producto de la descomposición del silicato tricálcico del cemento portland, según se expresa en las siguientes reacciones:



Este último compuesto conocido como "Etringita, Sal de Candlot, o sulfoaluminato de calcio de la forma alta", es altamente expansivo al formarse entre la masa del cemento hidratado y produce tensiones internas que destruyen el concreto.

Las experiencias en el campo de algunos investigadores les ha llevado a las siguientes deducciones:

1. Es necesario que sulfato de sodio cambie a sulfato de calcio en forma previa o simultánea a la formación de la etringita. Por lo tanto, la reducción del hidróxido de calcio disponible disminuye la cantidad de sulfato que

puede reaccionar.

2. La disminución de aluminato tricálcico en el cemento también limita la cantidad de etringita que puede formarse.

La forma usual de disminuir el  $\text{Ca(OH)}_2$  en el cemento portland, es por medio de la adición de puzolanas. Como ya se a dicho en este trabajo (Cap.7) los compuestos activos de las puzolanas se combinan con el  $\text{Ca(OH)}_2$  del cemento, reduciéndose la cantidad de etringita formada retardandose considerablemente la destrucción del concreto. Múltiples experiencias de campo corroboran lo anterior como puede verse en el cuadro siguiente.(53)

Efectos de solución $\text{Na}_2\text{SO}_4$ en la resistencia a la compresión de cubos de 10 cm. por lado Kg/cm				
	6 meses	12 meses	6 meses	12 meses
100% cemento portland.	442	465	200	90
60% cemento ptd. 40% arcilla calc.	350	427	404	402
60% cemento ptd. 40% trass	323	368	275	265

Es importante señalar que debe haber suficiente tiempo para que la puzolana reaccione con la cal de acuerdo con la reactividad de cada puzolana.

Al igual que en cualquier reacción química, el contacto íntimo de los compuestos a combinarse favorece la rapidez de formación de los nuevos compuestos y para nuestro caso particu-

lar la facilidad con que el agua sulfatada penetre los poros del concreto será un factor importante en el avance del deterioro. La porosidad del concreto depende de la relación agua-cemento, la riqueza de la mezcla y la granulometría de los agregados, cualidades que influyen en la durabilidad del concreto en general y muy particularmente al ataque de los sulfatos.

## 10.2 SULFATO DE MAGNESIO.

Al igual que el sulfato de sodio se encuentra en lagos naturales y aguas que han desleído terrenos dolomíticos, pero su mayor acumulación está en las aguas marinas con la particular adición de un alto contenido de cloruro de sodio en solución.

El sulfato de magnesio también reacciona con el  $\text{Ca(OH)}_2$  del cemento portland hidratado formando hidróxido de magnesio y yeso; posteriormente el yeso reacciona con el aluminato tricálcico hidratado formando sulfoaluminato cálcico. El sulfato de magnesio va más allá en sus efectos dañinos y ataca también a los silicatos cálcicos como puede expresarse en la siguiente reacción:



Se cree que la causa de esta reacción que no sucede con el sulfato de sodio es debida a que la solución saturada de sulfato de magnesio tiene un pH de 10.5, inferior al pH de equilibrio del silicato cálcico hidratado. En estas condiciones el silicato segrega cal para buscar su pH de equilibrio, cal que se combina con el sulfato de magnesio formando más yeso e hidróxido de magnesio. Al separarse este último de la solución, el ciclo se repite una y otra vez.

El sulfoaluminato cálcico también es atacado nuevamente por el sulfato de magnesio descomponiéndose un yeso, alúmina hidratada e hidróxido de magnesio. (53)

Las reacciones de ataque no terminan aún y el hidróxido de magnesio en la última fase de deterioro se combina con el gel de sílice formando silicatos de magnesio que no tienen ya poder cementante.

La presencia de cloruros en el agua de mar aumenta considerablemente la solubilidad del yeso y la etringita, y al desleírse éstos por la acción del oleaje no se presentan expansiones en el concreto aunque sí pérdida de resistencia.

De todas las experiencias de muchos países se concluye que la máxima resistencia del concreto de cemento portland sujeto al ataque de sulfato de magnesio de aguas marinas, se obtiene con concretos ricos ( $400 \text{ kg/m}^3$ ) y cemento de alto sílice a los que se les añade de 20 a 40% de puzolana preferiblemente de alto sílice, ya que la acción del magnesio y el lavado de las olas van gradualmente removiendo los compuestos de cal quedando al último y como único cementante el gel de sílice. Esta aseveración la confirma el estado de algunas estructuras fabricadas con mezcla de cal-puzolana en la época del imperio romano. Después de 2000 años de ataque casi ya no contienen cal quedando el gel de sílice como único cementante que las mantiene firmes. (53)

### 10.3 SULFATO DE CALCIO.

Se encuentra en algunos terrenos selenitosos naturales y en colectores de aguas negras como producto secundario de la combinación del hidróxido de calcio del cemento y el ácido sulfúrico que llega a formarse de la oxidación del anhídrido sulfuroso. También aparece como compuesto secundario después del ataque del sulfato de magnesio a los silicatos cálcicos ó del sulfato de sodio al hidróxido de calcio.

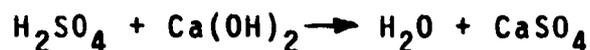
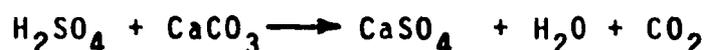
Las reacciones de combinación son las mismas que las señaladas en el párrafo dedicado al sulfato de sodio y como puede verse ataca directamente al  $C_3A$  sin necesidad de combinarse previa-

mente con el  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Esta característica limita las ventajas del uso del cemento puzolánico al ataque de este sulfato, ya que la reacción se presenta aún en ausencia del  $\text{Ca(OH)}_2$  quedando como única propiedad favorable de este cemento la mayor permeabilidad que puede lograrse. En la práctica, debido a que la solubilidad del sulfato de calcio es muy baja los ataques observados son muy ligeros, acentuándose solamente donde ocurren ciclos frecuentes de inmersión y secado.

En los colectores de aguas negras no son los sulfatos los primordialmente causantes del deterioro del concreto, sino que actúan después de un severo ataque del ácido sulfúrico. Los daños se localizan siempre en las bóvedas o partes donde no corre el agua y se identifican por desprendimientos del agregado. No existe ningún cemento portland resistente al ácido sulfúrico pero el uso de agregados calizos que neutralicen el ácido ha comprobado alargar la duración del concreto. Existen tratamientos a base de resinas y vinilos que sí son muy efectivos pero muy costosos.

Al combinarse el ácido con la piedra o el cemento se obtiene:



El sulfato así obtenido puede gradualmente atacar al  $\text{C}_3\text{A}$  del aglomerante por lo que es necesario usar cementos de bajo  $\text{C}_3\text{A}$  en este tipo de obras. Se requiere además un adecuado diseño hidráulico que evite remolinos y una muy buena ventilación que prevenga las condensaciones.

Es conveniente conocer qué tipo de sulfato va a estar en contacto con el concreto, en forma general puede señalarse que para el caso de sulfato de sodio puede indistintamente usarse

cemento tipo V o cemento puzolánico.

Para el ataque de sulfato de calcio debe preferirse el cemento tipo V.

Para defenderse del sulfato de magnesio lo mejor es usar un cemento portland que contenga de 30 a 40% de puzolana rica en sílice. (54).(55)(56)(53)

## CAPITULO 11

## CORROSION DEL CONCRETO

## 11.1 ASPECTOS GENERALES.

El efecto destructivo de las aguas agresivas sobre el concreto depende de los siguientes factores:

- a) El tipo de cemento utilizado, sus propiedades químicas y físicas.
- b) La calidad de los agregados, sus propiedades físicas.
- c) Los métodos usados para preparar el concreto, la relación agua-cemento, su compactación y edad del concreto.
- d) La condición de la superficie expuesta al agua agresiva.
- e) La composición y concentración del agua agresiva, así como la manera de actuar el fluido agresivo sobre la estructura del concreto.

Según la clasificación de Le Chatelier, Moskin y otros, el deterioro del concreto en un medio agresivo se puede deber a los siguientes factores:

- Lixiviación del  $\text{Ca(OH)}_2$ . Corrosión por lixiviación.
- Corrosión de intercambio de las sustancias fácilmente solubles.
- Formación de yeso y cristales de sulfoaluminatos de calcio hidratados. Corrosión por expansión.

## 11.2 TIPO I

## 11.2.1 Agresividad por aguas muy suaves.

Este tipo de ataque se debe a la acción de las aguas que contienen una débil dureza carbonatada (dureza total).

En la superficie de las estructuras de concreto de hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$  producto de la hidratación del cemento se

combina con el  $\text{CO}_2$  que existe en la atmósfera para formar  $\text{CaCO}_3$  compuesto que ayuda a la impermeabilidad. Si posteriormente este concreto se pone en contacto con aguas muy suaves, debido a que estas aguas presentan una gran avidez por las sales se produce la disolución del carbonato. Como resultado de esto, el agua penetrará en el concreto a través de los poros así abiertos y al ponerse en contacto con el  $\text{Ca(OH)}_2$  del interior lo arrastrará, haciendo de hecho más poroso y menos resistente al concreto.

Debido a esto el agua destilada se considera como uno de los agentes más agresivos del concreto.

Si las aguas blandas actúan durante mucho tiempo sobre el concreto será posible el lavado total del  $\text{Ca(OH)}_2$  y la descomposición de los compuestos remanentes hasta que se formen los hidratos de sílice friables, hidróxido de aluminio y el óxido de hierro, lo que conduce a la completa destrucción del concreto.

Con un lavado parcial del hidróxido de calcio se produce una disminución en la resistencia del concreto. Por ejemplo, la lixiviación de  $\text{CaO}$  del concreto en una cantidad de 15% a 30% provoca una disminución de la resistencia de 40 a 50%.

La lixiviación se puede observar en la presencia de manchas blancas en la superficie del concreto.

La presencia en el agua de  $\text{Ca(HCO}_3)_2$  y  $\text{Mg(HCO}_3)_2$  contribuye a la disminución de la solubilidad del hidróxido de calcio, no así la presencia de  $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  quienes aumentan la solubilidad del  $\text{Ca(OH)}_2$ , arrastrándose éste con más rapidez del concreto. (5)

#### 11.2.2 Agresividad debido a la presencia de $\text{CO}_2$

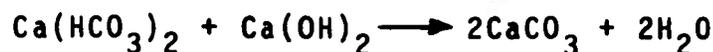
A este tipo de agresividad se le llama agresividad carbonatada, y se debe a la presencia en el agua de  $\text{CO}_2$  no combinado.

Cuando una agua con estas características se pone en contacto con una estructura de concreto, por ejemplo en presas, el agua ataca al  $\text{CaCO}_3$  formado en la superficie y produce  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  según:



El bicarbonato es soluble en agua y es arrastrado.

Al penetrar el agua por los poros, en los que hay  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se produce la reacción:

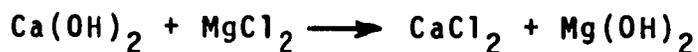


El carbonato, como ya se ha dicho es poco soluble y obstruye los poros, pero después es atacado por el agua agresiva y se repite el proceso hasta llegar a poner en peligro la estructura. (5)

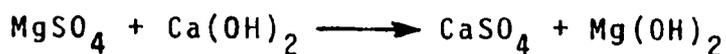
### 11.3 CORROSION TIPO II

Este tipo de corrosión ocurre como resultado de la reacción de intercambio de base entre los componentes fácilmente solubles del concreto y la solución agresiva.

El ejemplo de esta corrosión es la acción de las sales solubles de magnesio sobre el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .



El hidróxido de magnesio es poco soluble en agua y por eso la reacción continua hasta que se gasta todo el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y se transforma en una sal soluble ( $\text{CaCl}_2$ ) que es arrastrada del concreto, el hidróxido de magnesio aparece como una masa friable que no posee propiedades hidráulicas.

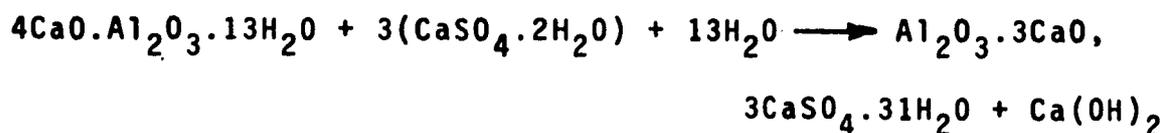


El sulfato de calcio que se produce de esta reacción se combina con los aluminatos, lo que será motivo de estudio en el siguiente punto a tratar.

#### 11.4 CORROSION TIPO III

Se produce por reacción de determinadas sales sobre aluminatos cálcicos hidratados, con la formación de sulfoaluminatos en el seno del concreto ya endurecido. Estos compuestos se forman con aumento de volumen, provocando el agrietamiento del concreto.

La corrosión del sulfoaluminato se produce como consecuencia de la reacción de los aluminatos cálcicos hidratados de alta basicidad con el  $\text{CaSO}_4$  según lo siguiente:



Este hidrosulfoaluminato es conocido con el nombre de etringita que al aumentar el volumen en el seno de la pasta endurecida provoca la destrucción de ésta. (5)

#### 11.5 OTROS AGENTES DE AGRESION.

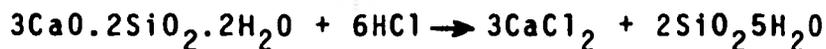
Acidos orgánicos: los más agresivos son el acético, el láctico, los grasos y los tartáricos.

Los aceites y grasas contienen ácidos que se combinan con el  $\text{Ca(OH)}_2$  formando sales grasas o jabones, que no tienen propiedades hidráulicas.

Además podemos citar la corrosión ácida que cae dentro del tipo II o III, y que surge como resultado de la acción de los

distintos ácidos minerales y orgánicos sobre el hidróxido de calcio y otros compuestos del concreto.

Como ejemplo, podemos citar la acción del ácido clorhídrico sobre  $C_3S_2H_2$ :



de la misma manera actúan otros ácidos.

Los productos que se forman, por ejemplo  $CaCl_2$ , son arrastrados del concreto y los productos insolubles no poseen poder aglomerante.

Es muy difícil proteger al concreto de la acción de los ácidos fuertes.

#### 11.5 EL CEMENTO PUZOLANICO COMO UNA SOLUCION

De acuerdo con lo tratado anteriormente se desprende la conveniencia de emplear cualquier agente que sea capaz de reaccionar con el  $Ca(OH)_2$  de tal manera que lo transforme en un compuesto estable, teniendo como consecuencia la disminución de los distintos tipos de corrosión del concreto.

Con este fin se emplean habitualmente los materiales conocidos como puzolanas, que como ya se sabe estos materiales tienen la propiedad de fijar la cal  $Ca(OH)_2$ .

La sílice activa de la puzolana reacciona con el  $Ca(OH)_2$  constituyendo un silicato monocálcico del tipo CSH estable, disminuyendo así la concentración de  $Ca(OH)_2$  (5).

## C O N C L U S I O N E S

1a.- El concreto es un material tecnológico de construcción, del cual se esperan, y al que se exigen, ciertas características determinadas.

2a.-Al concreto se le pueden y se le deben imponer condiciones previas en cuanto a resistencias mecánicas, estabilidad dimensional y durabilidad.

3a.- El concreto en masa o prefabricado, armado o pretensado es un material estructural cuya misión es resistir y durar, o bien "durar resistiendo".

4a.- Para obtener concretos resistentes y durables se deberán emplear materiales primarios o componentes que a su vez lo sean en la medida necesaria. Esta condición la debe cumplir, en particular, el cemento.

5a.- Durante la hidratación del cemento se producen aproximadamente 60% de gel-CSH (tobermorita= cementante), y 30% de  $\text{Ca(OH)}_2$  (cal libre = expansiva), esta última nociva para el concreto ya que su presencia implica destrucción.

6a.- La puzolana tiene la propiedad de fijar la cal libre producida durante la hidratación del cemento "Actividad puzolánica"

7a.- La aplicación de la puzolana puede ser de dos maneras: primera, como aditivo (hasta 5%), es decir en el momento mismo de preparar la mezcla, "in situ".

Segunda. Integrada al clinker y yeso durante su molienda, dando lugar al llamado "Cemento Puzolánico". Si es el segundo caso,--debera esperarse que tal cemento cumpla con las propiedades que se le exigen a un cemento de su tipo, no así el primer caso.

8a.- Como norma general las puzolanas no se especifican en los concretos, a menos que realmente se espere de ellos ventajas bien definidas, como en el caso del cemento puzolánico, el cual se emplea esperando mejorar ciertas propiedades de las cuales el cemento normal carece.

9a.- La sílice finamente dividida presente en la puzolana puede formar con la cal a temperaturas normales, al hidratarse, hidratos coloidales de silicato de calcio, siempre que la sílice se encuentre en estado activo natural (vitreo o amorfo).

10a.- Las puzolanas pueden ser naturales o artificiales. Las cuales deben su alta capacidad de reacción hidráulica, ante todo a su estructura física, su entremado poroso de gran superficie interna.

11.- No es posible establecer una diferencia en la composición química entre materiales puzolánicos y no puzolánicos debiendo recurrirse para su caracterización a diversas pruebas físicas y químicas, que se han diseñado especialmente para evaluar tanto la calidad de la puzolana, como la del cemento puzolánico.

12a.- La experiencia ha demostrado que un tratamiento térmico (previo a su empleo), a ciertas puzolanas naturales es un proceso importante para el desarrollo de sus aptitudes hidráulicas.

13a.- No existe un método único para medir la actividad puzolánica ya que ésta dependerá de factores como calidad del clinker, y tipos de puzolanas, por lo que existen varios criterios.

14a.- El mecanismo de la actividad puzolánica consiste en la transformación del hidróxido de calcio (cal libre) en un silicato cálcico hidratado (tobermorita), mediante la participación de una puzolana.



15a.- Ciertas puzolanas son más efectivas que otras para reducir la permeabilidad del concreto a edades tempranas. Sin embargo en la mayor parte de las obras, la permeabilidad del concreto fabricado con cemento puzolánico se reduce notablemente a edades posteriores.

16a.- Los cementos puzolánicos generalmente necesitan un aumento considerable en la cantidad de agua requerida para una determinada manejabilidad del concreto, en comparación con los que no lo son. Esto es muy conveniente en concreto estructural porque a mayor contenido de agua por  $m^3$ . en el concreto, la absorción, retracción y permeabilidad aumentan.

17a.- El empleo de cemento puzolánico garantiza una reducción en el calor que se desarrolla durante la hidratación del cemento así como en los cambios térmicos de volúmen y sangrado.

18a.- El comportamiento a largo plazo de pavimentos de prueba, indica que el empleo de cemento puzolánico puede ser ventajoso para reducir o eliminar el agrietamiento en forma de mapa y la expansión.

19a.- En igualdad absoluta de finura, el cemento puzolánico manifiesta resistencia algo más baja que el cemento portland normal a edades tempranas, aunque posteriormente las iguala o supera.

20a.- El emplear puzolana en un 15%, 25%, 30% y 35% como sustituto del clinker en la fabricación de cemento (cemento puzolánico), implica un ahorro considerable de combustible, en beneficio tanto del fabricante como del consumidor.

21a.- El mayor énfasis en el empleo de cementos puzolánicos ha sido en los siguientes tipos de construcción:

- Presas.
- Carreteras

- Revestimiento de canales.
- Sistemas de drenaje.
- Obras marítimas.
- Banquetas.
- Estacionamientos.

De acuerdo con las necesidades de la época en que vivimos, la mayoría de las industrias cementeras de nuestro país se han dado a la tarea de fabricar el cemento de "nuestros antepasados" (con la técnica moderna del hoy), el llamado cemento puzolánico, el cual es empleado actualmente por millares de toneladas en diversas construcciones -con buenos resultados-, permitiendo así, mantener el desarrollo de la industria de la construcción, que a su vez da la pauta como industria de infraestructura para el desarrollo continuo de nuestro México.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- CALLEJA, J., "Cementos puzolánicos", Asociación Brasileña del Cemento Portland, (conferencia), 23-35, Sao Pablo, Brasil, (1976).
- 2.- MORALES, M., "Posibilidades de ahorro de energía en la industria del cemento", Materiales de Construcción No. 166,61-84, Madrid, España, (1977).
- 3.- CALLEJA, J., "Cuestiones que plantea el empleo del cemento", Cemento Hormigón No. 461, 656-673, España, (1972).
- 4.- KEIL, F., "Cemento", 24-35, 345-380, España, (1972).
- 5.- MARTINEZ, E., "Empleo de las puzolanas como un medio para evitar la corrosión", C.I.M.T.E.C., Universidad de la Habana, Cuba, (1972).
- 6.- "Manual de diseño de obras civiles", Comisión Federal de -- Electricidad, I, 500-519, México, (1969).
- 7.- Norma oficial mexicana "Cemento Portland", DGN-C1-1975, Secretaría de Industria y Comercio, (México).
- 8.- CALLEJA, J., "Cementos", 1er. Simposium de Arquitectura, Sevilla, España,(1972).
- 9.- BUCHER, H., and H.P. MULLER., "Products related to manufacture of portland clinker", Cement Handbook Technical Center Holderbank, II, 14 , 10-19, Suiza, (1979).
- 10.- SERSALE, R. and P. ORSINI., "Hidrated phases after reaction of lime with pozzolanic materials or with blast furnace slags", 5th. International Symposium on the Chemistry of Cement in Tokyo, IV, 7, 114-120,(1968).

- 11.- CALLEJA, J., "Desarrollo de la actividad técnica de los VI coloquios de directores y técnicos de fabricas de cemento", -- Cemento Hormigón No. 518, 235-276, España, (1977).
- 12.- BRAUN, H., "Cementos mezclados y cementos especiales", Seminario de garantía de calidad y aplicación del cemento, Cementos Apasco, México, (1980).
- 13.- CHACON, R., "Influence of the finess of portland cement on strength of mortar and concrete", Holderbank News No. 140, 13-16, Suiza, (1975).
- 14.- GEBAUER, J., "Cement", Cement Handbook Technical Center Holderbank, II, 16, 2-30, Suiza, (1979).
- 15.- CALLEJA, J., "Cuestiones que plantea el empleo del cemento"- Cemento Hormigón No. 461, 661-667, España, (1972).
- 16.- DE NEYMET, A., "aditivos para concreto", 49-52, México, (1976).
- 18.- "Guia para el empleo de aditivos", Nueva serie IMCYC, No. 7, 15-17, México, (1980).
- 19.- KEIL, F., "Cemento", 240-275, España, (1972).
- 21.- DRON, R., "Les pouzzolanes et la pouzzolanicite", Materiales Construcción No. 692, 27-30, Francia, (1975).
- 22.- ULLMANN, F., "Enciclopedia de la química industrial", VII, 664-666, Gustavo Gíl editor, Barcelona, España.
- 23.- Diccionario enciclopedico U.T.E.H.A., Unión Tipográfica, Editorial Hispanoamericana, México, (1963).
- 25.- PRICE, H.W., "Puzzolans review", A.C.I., Journal, 225-231, mayo, (1973).

26.- Annual book of A.S.T.M. standards, "Blended hydraulic cements"- C 595-81a, XIII, 361-371,(1981).

27.- MENDOZA,C., "Características y usos en la construcción de las cenizas volantes de la planta termoeléctrica de río Escondido", Simposium sobre cemento, Monterrey, N.L., México, (1979).

28.-LUXAN,M.P., "Comportamiento del gel de sílice en el ensayo de puzolanicidad", Materiales de Construcción No. 160, 79-95, España- (1975).

29.- Idem (10).

30.- TAKEMOTO,K. and H. UCHINAWA.;"Hidratation of puzzolanic cement" Onda Cement, Japón, (1979).

31.- SHWIETE,H.E.,P.KASTANJA.,U.LUDWIN. and A.OTTO., "Investigations on the behavior of natural an artificial puzzolans", 5th.International Symposium on the Chemistry of Cement in Tokyo, IV,135-139, Japón, (1968).

32.- REBOLLO,A., "Propiedades puzolánicas de la piedra pómez volcánica", Cemento Hormigón No. 437, 765-778, España, (1970).

33.- ROJAS,S., "Cemento con puzolanas naturales", Cemento Hormigón- No. 544, 231-244, España, (1970).

34.- "L' activité pouzzolanique", Bull. Liaison Labo No. 93, -- 623-647.

36.- VILLASEÑOR,J., "Concretos elaborados con cemento portland -- puzolana", Cementos Tolteca. México, (1980).

37.- PRICE,W., "Calcination natural pozzolans testing pozzolans in concrete availability of pozzolans", Pozzolans Review, A.C.I., Journal, 228, (1975).

- 38.- FERRARI,F., "Cemento ferrari y cemento ferropuzolánico", Cemento Hormigón No.440, 1087-1089, España, (1970).
- 39.- DUTRON,P., "Ahorro de energfa por adiciones al cemento", Materiales de Construcción No. 166, 103-111, España, (1977).
- 40.- SORIA,F., "Estudio de materiales hidráulicos", Consejo -- Superior de Investigaciones Científicas, España, (1972).
- 41.- TETMAJER,R., Schweizerische Bauzeitung No. 24, 1884, Suiza, (1976).
- 42.- ERMENGER,T., Tonindustrie Zeitung No. 51, 1976, Suiza,(1970).
- 43.- CHATELIER,L.H., "Sur la permeabilite par diffusion des mortiers", Boletin Societé D' Encouragement Pour L' Industrie Nationale, France, (1901).
- 44.- FERET,R. Annales des ponts et chaussees No. 4, France, (1901).
- 45.- POULSEN,A., Congress 1912 Premieres Communications of the -- N.A.I.E.M., Zurich, (1930).
- 47.- ABDUR,N., "Fly ash concrete an evaluation", Boletin No. 284, 135, Highway Research Board, (1961).
- 48.- BLOEM,D.L. "Effect of curing conditions on compressive strength of concrete test specimens", National Ready Mixed Concrete-Association, Publication No. 53, 15, (1954).
- 49.- DE NEYMET,A., "Aditivos para concreto", 160-162, México,-- (1976).
- 50.- PEPPER,L.and B.MATHER., "Effectiveness of mineral admixtures- in preventing excessive expansion of cement due to alkali-aggregate reaction", Proceedings A.S.T.M. LIX, 1178-1203.

51.- Concrete Manual U.S., Bureau of reclamation, 7th edition, 642, Denver, U.S.A., (1963).

52.- LEA, F.M. and C.M. DESCH., "Pozzolans and pozzolanic cements", The Chemistry of Cement and Concrete, St. Martin's Press, Inc. New York, (1956).

53.- GUEMEZ, R.G., "Resistencia del concreto de cemento portland a los sulfatos", Revista IMCYC, X, 97-101, México, (1972).

54.- TROXEL, G.E. and H.E. DAVIES., "Composition and properties of concrete", 72-73, Mc. Graw Hill Book, Co., New York, (1956).

55.- POLIVKA, M. and E.H. BROWN., "Influence of various factors on sulfate resistance of concretes containing pozzolan", Proceedings A.S.T.M., LVIII, 1077-1099, (1958).

56.- EITEL, W., "Recent investigations of the system lime-alumina-calcium sulfate-water and its importance in building research--problems", A.C.I., Journal, Proceedings No. 7, LIII, 679-698, (1957) (con 22 referencias anotadas).

57.- NEWLON, H. and W. SHERWOOD., "Methods for reducing expansion of concrete caused by alkali-carbonate rock reaction", Highway -- Research Record No. 45, 134-150, (1954).

58.- DAVIS, R.E., "A review of pozzolanic materials and their use in concretes", Symposium on use of pozzolanic materials in mortars and concretes, 3-15, (1949). (con 9 referencias)

59.- PAYNE, G.A., "La industria del cemento en México", revista--IMCYC, XIV, (1977).