



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"ASPECTOS PETROGRAFICOS DEL CONCRETO"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO GEOLOGO
PRESENTA:
ALBERTO HERRERA PALOMO



MEXICO, D.F.

OCTUBRE DEL 2002.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-I-1067

**SR. ALBERTO HERRERA PALOMO**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Germán Arriaga García y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**ASPECTOS PETROGRÁFICOS DEL CONCRETO**

- RESUMEN**  
**INTRODUCCIÓN**  
**I CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CONCRETO**  
**II CONTROL DE CALIDAD EN LOS AGREGADOS**  
**III AGUA, POROS Y CONCRETOS ESPECIALES**  
**IV PATOLOGÍA EN LAS OBRAS CIVILES**  
**CONCLUSIONES**  
**BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria, D.F., a 6 de septiembre de 2002  
EL DIRECTOR

  
**ING. GERARDO FERRANDO BRAVO**

GFBRLLR\*gtg



..... Ve pues al sitio a donde te dedicaron entre papeles y entre incienso tu madre y tu padre. Es el *Calmeac*, casa de llanto, casa de lágrimas, casa de austeridad. Allí cual joyas se forjan y allí cual flores abren sus corolas los príncipes. Cual esmeralda son perforados, como flores dan color y aroma.....

(Exhortación de un padre a su hijo al dejarlo en el *Calmeac*, Documentación de Sahagún. Códice de Florencia)

*Ayoppa in piltihua, ayoppa in tlacatihua*

(No dos veces se es hecho, ni dos veces se nace)

No dos veces se vive

Proverbio Mexica

## **Agradecimientos**

**A Vicko's:**

Que siempre está a mi lado,  
por ser el amor, apoyo y motivación de mi vida.

**A mi madre Esperanza:**

Por la fortaleza que inspira y el amor que  
me brinda

**A mis hermanas**

**Dolores, Magdalena y Laura:**

Gracias por poder contar con ustedes siempre.

**A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme conocer gente valiosa y darme  
una formación profesional.**

Agradezco al Ing. Germán Arriaga por la dirección y comentarios para la realización de este trabajo. A los ingenieros Miguel Vera, Carlos Garza, Arturo Tapia y Héctor Guzmán por los comentarios y sugerencias al presente trabajo.

Un agradecimiento especial al Ing. Juan Aguilar Pascual por todo el apoyo brindado a lo largo de la carrera.

A mis amigos

Que de una forma u otra han estado conmigo:

Julia Sánchez, José Luis Torres, Clara Rodríguez, Adrián Yañez, Esther Romero, René Hernández, Luisa Loyda, Julia Palma, Guadalupe Alvarado, Angélica Hernández, Zaira Sandoval, Nicasio Salvador y Marco Antonio Sánchez.

Así como a todos mis profesores y compañeros de la Facultad de Ingeniería, gracias por estar en el momento adecuado.

RESUMEN	4
JUSTIFICACION	5
MARCO CONCEPTUAL	7
INTRODUCCION	10
<b>CAPITULO I</b>	
Características generales del concreto	13
I.1 Características del concreto	13
I.2 Cemento portland	19
I.2.1 Fabricación	19
I.2.2 Proceso general de producción	20
I.2.3 Compuestos químicos	34
I.2.4 Características físicas de las principales fases del clinker	37
I.3 Tipos de cementos portland	42
I.3.1 Propiedades del cemento portland	43
<b>CAPITULO II</b>	
Control de calidad en los agregados	45
II.1 Agregados para el concreto	45
II.1.1 Condición física	47
II.1.2 Granulometría	47
II.1.3 Morfología	50
II.1.4 Fragmentación y tipo de depósito	56
II.1.5 Agregados manufacturados	59
II.1.6 Peso volumétrico y peso específico	63
II.1.7 Absorción y humedad superficial	64
II.1.8 Resistencia al desgaste	65
II.1.9 Limpieza y sanidad	67
II.1.10 Control de calidad de los agregados en un proyecto	68
II.1.11 Actividad química de los agregados	69

### CAPITULO III

Agua, Poros y Concretos especiales	78
III.1 Agua de mezclado para el concreto	78
III.2 Porosidad en el concreto	80
III.3 Relación agua / cemento (w/c)	81
III.4 Proporciones de la mezcla y propiedades del concreto	85
III.5 Concretos especiales	86
III.5.1 Concretos de alto desempeño	86
III.5.2 Concreto ligero	88
III.5.3 Suelo - cemento	89

### CAPITULO IV

Patología en las obras civiles	91
IV.1 Condiciones climáticas	92
IV.2 Congelamiento y deshielo	95
IV.3 Carbonatación	97
IV.4 Reacción álcali-agregado	100
IV.4.1 Mecanismos de la reacción álcali-agregado	102
IV.4.2 Reacción álcali-carbonato	103
IV.4.3 Regiones propensas a la reacción álcali-carbonato	104
IV.4.4 Reacción álcali-sílice	105
IV.4.5 Regiones propensas a la reacción álcali-sílice	116
IV.4.6 Situación del efecto álcali-sílice en la República Mexicana	119
IV.5 Efectos de la temperatura en el concreto	118
IV.5.1 Temperaturas ordinarias	119
IV.5.2 Temperaturas extraordinarias	120
IV.5.3 Efectos de las altas temperaturas en el concreto	121

CONCLUSIONES	128
--------------	-----

BIBLIOGRAFIA	129
--------------	-----



## RESUMEN

El concreto se elabora básicamente con la mezcla de dos componentes: pasta y agregados. La pasta generalmente está constituida de cemento portland y agua. El cemento portland se produce al pulverizar el clinker.

El clinker se obtiene al triturar, moler y calcinar principalmente calizas y lutitas o pizarras. Al producto obtenido se adiciona yeso. El clinker cuenta con una composición química determinada y es monitoreada por la presencia de cuatro compuestos principales que son: Silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y aluminoferrito tricálcico.

La pasta se debe hidratar con agua potable o bien que cumpla con requisitos físicos-químicos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-C-122.

Los agregados utilizados en la fabricación del concreto se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos pueden variar de 1.18 mm hasta 152 mm. Los agregados deben cumplir ciertas reglas para darles un uso óptimo en la construcción: deben de estar formados por partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

Las operaciones de mezclado y colocación dan lugar a que se atrape aire, lo que aumentará inevitablemente los espacios vacíos en el concreto endurecido, y permite la creación de tres clases de poros en el concreto: poros de aire, de agua y microporos.

Además toda obra civil está expuesta a probables cambios climáticos, procesos de carbonatación, reacciones químicas entre los agregados y la pasta (reacción álcali-carbonato y álcali-sílice) y exposición al fuego (incendios). Cada uno de los factores mencionados provoca características particulares al concreto que pueden ser identificadas en un estudio petrográfico.

## Justificación

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes; agregados y pasta.

La pasta compuesta de cemento (portland) y agua, une a los agregados (arena y grava) para formar una masa "semejante a una piedra" pues dicha pasta se endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua.

Ahora bien, si el concreto se puede considerar como una roca, también se podrá analizar con las técnicas y métodos de estudio para una roca natural. Entre estos métodos se pueden incluir los estudios petrográficos; por tanto, se puede realizar un "Estudio Petrográfico del Concreto" con sus respectivas limitantes, por que no hay que olvidar que se trata de un producto artificial y no se puede obtener en forma general la misma información de una roca.

De acuerdo a las Normas de Estandarización de Materiales de Estados Unidos de Norte América (ASTM) en su Norma ASTM - 259, C-856 el Estudio Petrográfico del Concreto lo debe realizar una persona con conocimientos bastos en mineralogía y petrografía, por lo tanto se deduce que se debe de contar con un Geólogo para realizar este tipo de estudios. Actualmente en México son pocos los organismos que ofrecen dentro de sus servicios estudios Petrográficos del Concreto entre los que se pueden citar a Cementos Mexicanos (CEMEX), Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCyC) y el Laboratorio Nacional de la Construcción (LANCO) por lo que se refleja que realmente son pocos los profesionistas que se dedican a tales estudios.

Pero si el concreto es como una roca ¿por qué no se le ha prestado mayor atención e importancia entre la comunidad de las Ciencias de la Tierra?.

El por qué de la importancia de su estudio, radica en el hecho de que su versatilidad, durabilidad y economía, lo ha convertido en el material de construcción más usado en el mundo, esto se puede ver en la variedad de estructuras en que se emplea, desde carreteras, puentes, edificios, presas y autopistas hasta pisos, banquetas y aún en obras de arte.

Al empezar cualquier proyecto de construcción se debe considerar entre otros factores el tipo de materiales que se deben de utilizar para asegurar la óptima vida de la obra y un estudio petrográfico de los materiales (grava y arena) proporciona una información muy valiosa para este fin.

Pero toda estructura tiene una vida útil; cuando tiende a su fin, es el momento de realizar los trabajos necesarios para evaluar si se le da otra oportunidad a la obra, al analizar los daños estructurales y capacidad de resistencia que en parte están en función del estado de la pasta y los agregados; por lo que un estudio petrográfico del concreto puede proporcionar la información necesaria a los especialistas de la construcción para tomar las decisiones adecuadas.

De esta forma se observa la importancia que tienen los estudios petrográficos a lo largo de cualquier proyecto de ingeniería civil y la necesidad de capacitar a profesionales en esta "novedosa" rama en ciencias de la tierra.

El objetivo de este trabajo es el de documentar los aspectos petrográficos inherentes al concreto y servir como aliciente a los actuales y futuros profesionistas de ciencias de la tierra para involucrarse en el proceso de fabricación y estudio del concreto.

## Marco conceptual

La palabra cemento es nombre de varias sustancias adhesivas. Deriva del latín *caementum*, porque los romanos llamaban *opus caementitium* (obra cementicia) a la grava y a diversos materiales parecidos al hormigón que usaban en sus morteros, aunque no eran la sustancia que los unía.

Hoy se conoce como cemento por igual a varios pegamentos, pero de preferencia, al material para unir que se usa en la construcción de edificios y obras de ingeniería civil.

También se le conoce como cemento hidráulico, denominación que comprende a los aglomerantes que fraguan y endurecen una vez que se mezclan con agua e inclusive, bajo el agua.

De acuerdo con la definición que aparece en la Norma Oficial Mexicana (NOM), el cemento portland es el que proviene de la pulverización del clínker obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos, que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio y fierro en cantidades convenientemente dosificadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar, así como otros materiales que no excedan del 1% del peso total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento, como pudieran ser los álcalis.

Por miles de años el hombre se ha esforzado constantemente en crear construcciones bellas, que alberguen su civilización.

Desde la antigüedad los materiales de construcción básicos han sido: la roca natural, el adobe y el tabique, materiales disponibles casi universalmente.

En un inicio el concreto utilizado por los romanos fue una revolución tecnológica en la construcción al hacer posible edificaciones magníficas tanto estructural como estéticamente.

Después de mucho tiempo, pasada la época romana, el concreto desaparece de la historia.

Los franceses hicieron dinteles y adornos de puertas con piedra artificial precolada en el año de 1138 en Carcassone, Francia, ciudad en la cual aún se pueden ver los restos de la piedra moldeada.

En 1824 Joseph Aspdin inventa el cemento portland en Inglaterra; sin embargo a finales del siglo XIX experimentos e investigaciones del material, llegaron a fijar definitivamente sus cualidades y las bases teóricas para su difusión.

El primer cemento portland que se usó en Estados Unidos de Norte América y Canadá fue importado de Inglaterra entre 1870 y 1871, y se construyeron los primeros hornos para la fabricación de cemento en los Estados Unidos.

El cemento se usó extensivamente en Londres hasta 1900 y en Estados Unidos y México alrededor de 1920. El uso más generalizado del concreto como un material para fachadas data de los años 30's

México cuenta con una tradición constructora desde tiempo inmemorial. Muestra de esto son las fantásticas construcciones legadas a los mexicanos por los Olmecas, Toltecas, Mayas, Zapotecas, Mixtecos y Mexicas, en estas obras los cementantes fueron de uso común en tales culturas.

Teotihuacan, Tajín, Palenque, Uxmal, Chichén Itzá, Monte Albán y Mitla son sólo algunos ejemplos de este extraordinario legado que forma parte indiscutible de la cultura de los mexicanos. Tajín es un ejemplo claro del empleo del concreto, construida por losas constituidas por puzolanas y agregados.

De igual manera, se tienen ejemplos muy importantes de construcciones realizadas en el virreinato y en el México Independiente.

En México el cemento y el concreto son utilizados plenamente en todo tipo de construcciones y edificaciones. El "polvo mágico" como se conoce al cemento se transforma en esa piedra moldeable que es el concreto y se convierte en el "permanente, silencioso y discreto compañero".

Así, desde el principio de la vida, los mexicanos viven acompañados de este material, el hospital donde se nace, la casa donde se vive, las escuelas y universidades en las que se educan, los estadios, cines, teatros, templos, la infraestructura para la transportación, la oficina donde se trabaja, todas ellas están construidas principalmente de concreto y que interviene prácticamente en todo y poco se aprecia al material que es de enorme valor para la vida diaria.

El desarrollo de la construcción con concreto no ha sido tan espectacular como el de las industrias electrónica o espacial, sin embargo en las últimas dos décadas se han logrado procedimientos para la construcción, que será del dominio general en un futuro próximo. Entre estos grandes desarrollos se encuentran los concretos de alto comportamiento para edificios de gran altura, también ha representado incrementos en los claros de los puentes y concretos de peso ligero.

En un futuro se podrán lograr resistencias del concreto cercanas a los  $1400 \text{ kg/cm}^2$  en tanto que en los años 50's se especificaban concretos de  $140 \text{ kg/cm}^2$ , resistencia diez veces menor.

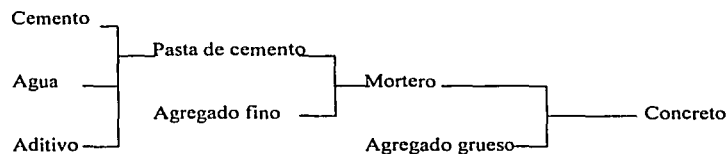
En 1984, el Presidente de los Estados Unidos de Norte América, Ronald Reagan, propuso la construcción de una estación espacial de su país. En 1985 la NASA comunicó al Laboratorio de Tecnología de la Construcción (CTL) que recibiría muestras de la Luna traído por el Apolo XVI para demostrar la viabilidad de elaborar concretos de calidad con los materiales disponibles de la Luna.

La importancia del concreto en todos los aspectos de la vida cotidiana hace conveniente analizar sus características de fabricación y su comportamiento durante su vida estructural lo que se conoce en parte, por medio de un estudio petrográfico.

## Introducción

Concreto del latín *concretus*, que significa; condensado, denso, endurecido, cuajado.

El concreto es de uso común o convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo.



Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una revoltura de concreto, se introduce de manera simultánea un quinto participante: el aire.

La mezcla íntima de los componentes del concreto convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

La representación común del concreto convencional en estado fresco, lo identifica como un conjunto de fragmentos de roca, globalmente definidos como agregados, dispersos en una matriz viscosa constituida por una pasta de cemento de consistencia plástica. Esto significa que en una mezcla así, hay muy poco o ningún contacto entre las partículas de los agregados. Esta característica tiende a permanecer en el concreto ya endurecido.

Consecuentemente, el comportamiento mecánico de este material y su durabilidad en servicio, dependen de tres aspectos básicos: 1. Composición y las propiedades de la pasta de cemento, 2. La calidad propia de los agregados y 3. La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe contemplarse la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua/cemento conveniente.

En cuanto a la calidad de los agregados, es importante adecuarla a las funciones que debe desempeñar la estructura, a fin de que no presenten el punto débil en el comportamiento del concreto y su capacidad para resistir adecuadamente y por largo tiempo los efectos consecuentes de las condiciones de exposición y servicio a que esté sometido.

Finalmente, la compatibilidad y el buen trabajo de conjunto de la matriz cementante con los agregados, dependen de diversos factores tales como las características física y químicas del cementante, la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen los agregados, la forma, tamaño máximo y textura superficial de estos.

Los cementantes que se utilizan para la fabricación del concreto son hidráulicos, esto significa que fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire.

En la elaboración de los cementos hidráulicos intervienen normalmente materias primas como son:

Cemento Portland: Caliza y arcillas.

Cemento Aluminoso: Caliza y bauxita.

Cemento Sobresulfatado: Escoria granulada de alto horno.

Cemento Expansivo: Clinker portland, escoria, bauxita, yeso.

Natural: Caliza arcillosa.

Todos los cementos para concreto hidráulico que se producen en México son elaborados a base de clinker portland, por tal motivo se justifica centrar el interés en éste.

El concreto hidráulico experimenta cambios de volumen desde que se coloca y compacta, hasta el término de su vida de servicio; cambios que pueden ser motivados por diversas causas tales como las variaciones de humedad y temperatura, así como las reacciones químicas entre el cemento y los agregados.



El propósito de un estudio petrográfico de concreto endurecido es el de:

- Determinar con detalle la condición del concreto en una construcción.
- Determinar la calidad interior o deterioro del concreto en una construcción.
- Determinar el futuro probable o mejoramiento del comportamiento del concreto.
- Determinar cuando el concreto en una construcción fue o no fabricado con los datos especificados.
- Describir la matriz del cementante, incluyendo el grado de carbonatación y porcentaje de la relación agua / cemento.
- Determinar si está presente la reacción álcali - sílice o álcali - carbonato.

Por lo que para poder realizar un estudio petrográfico, aparte de requerir los datos de localización y orientación original de la muestra, edad de la estructura, condiciones de operación de servicio y exposición y la razón y objeto de estudio, se requiere además, conocer las características óptimas en la fabricación de cemento y los materiales apropiados para su fabricación, la calidad de los agregados, las características idóneas del agua de mezclado y la interacción de los constituyentes del concreto.

# CAPITULO I

## Aspectos generales del concreto

### I. 1 Características del concreto

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta.

La pasta generalmente constituida de cemento portland [cemento hidráulico calcáreo producido por el calentamiento de los óxidos de silicio, calcio, aluminio e hierro] y agua.

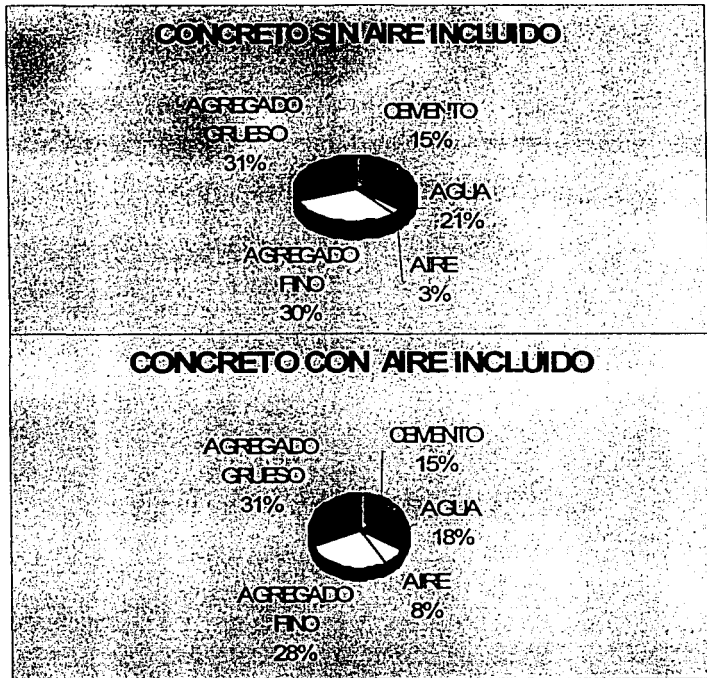
Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm; los agregados gruesos son aquellos cuyas partículas se retienen en la malla n° 16 (1.18 mm) y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente es el de 19 mm o el de 25 mm.

La pasta constituye del 25 al 40 % del volumen total del concreto.

El agua entre 14 y 21 %. El contenido de aire en concretos, incluido el aire inyectado, puede llegar hasta el 8% del volumen del concreto. En la gráfica 1.1 se muestra el porcentaje medio de los constituyentes de un concreto fabricado con y sin aire.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60 al 75 % del volumen total del concreto, su selección es importante. Los agregados deben consistir en partículas con resistencia adecuada, así como resistencia a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto; en la gráfica 1.1 se muestra el porcentaje más común de los constituyentes del concreto cuando se elabora con y sin aire incluido.

En México la industria de la construcción ocupa un lugar importante y en cuanto a la producción de clinker y cemento portland se muestran en la tabla 1.1 y 1.2, en las cuales se dan las cifras de producción en toneladas y su valor económico respectivamente (en los meses en que no existen datos sobre producción se abrevia como ND).



Gráfica 1.1 Constituyentes principales del Concreto (IMCyC)

PERIODO	Volumen (Toneladas)	Valor (Miles de Pesos)
1997/01	50,880	10,882
1997/02	132,673	26,794
1997/03	96,161	21,716
1997/04	110,736	27,980
1997/05	95,265	34,603
1997/06	128,258	33,869
1997/07	83,031	22,630
1997/08	71,763	17,876
1997/09	126,873	31,528
1997/10	98,127	27,121
1997/11	80,000	21,776
1997/12	200	57
1998/01	87,795	23,631
1998/02	41,890	11,680
1998/03	87,291	24,419
1998/04	53,164	13,684
1998/05	12,000	2,165
1998/06	124,712	35,459
1998/07	15,443	6,154
1998/08	43,453	15,972
1998/09	30,078	11,620
1998/10	32,452	11,989
1998/11	16,974	7,163
1998/12	47,594	15,649
1999/01	ND	ND
1999/02	ND	ND
1999/03	ND	ND
1999/04	ND	ND
1999/05	ND	ND
1999/06	ND	ND
1999/07	ND	ND
1999/08	ND	ND
1999/09	ND	ND
1999/10	ND	ND
1999/11	ND	ND

1999/12	ND	ND
2000/01	ND	ND
2000/02	ND	ND
2000/03	ND	ND
2000/04	ND	ND
2000/05	ND	ND
2000/06	ND	ND
2000/07	ND	ND
2000/08	ND	ND
2000/09	ND	ND
2000/10	ND	ND
2000/11	ND	ND
2000/12	ND	ND
2001/01 p/	ND	ND
2001/02	ND	ND
2001/03	ND	ND
2001/04	ND	ND
2001/05	ND	ND
2001/06	ND	ND
2001/07	ND	ND
2001/08	ND	ND
2001/09	ND	ND
2001/10	ND	ND
2001/11	ND	ND
2001/12	ND	ND
2002/01	ND	ND
2002/02	ND	ND
PACIFIC RIM ECONOMIC COOPERATION DEVELOPMENT ORGANIZATION SECRETARIAT		

Tabla 1.1 Producción de Clinker en México

PERIODO	Volumen (Toneladas)	Valor (Miles de Pesos)
1997/01	2,009,015	1,141,874
1997/02	1,940,054	1,069,862
1997/03	2,103,379	1,141,867
1997/04	2,439,140	1,152,029
1997/05	2,559,028	1,286,269
1997/06	2,435,745	1,325,988
1997/07	2,418,074	1,321,993
1997/08	2,608,411	1,457,874
1997/09	2,254,224	1,260,104
1997/10	2,403,826	1,457,794
1997/11	2,309,714	1,459,684
1997/12	2,198,623	1,285,865
1998/01	2,161,876	1,435,643
1998/02	2,134,554	1,428,160
1998/03	2,540,130	1,756,211
1998/04	2,205,607	1,531,488
1998/05	2,501,741	1,811,318
1998/06	2,487,156	1,788,038
1998/07	2,505,252	1,794,672
1998/08	2,553,621	1,845,931
1998/09	2,445,428	1,851,686
1998/10	2,306,415	1,769,736
1998/11	2,271,591	1,853,257
1998/12	2,495,415	2,065,537
1999/01	2,459,499	2,034,205
1999/02	2,266,405	1,879,121
1999/03	2,567,797	2,231,006
1999/04	2,284,008	2,062,930
1999/05	2,378,600	2,167,087
1999/06	2,580,153	2,346,940
1999/07	2,571,058	2,379,622
1999/08	2,544,220	2,292,781
1999/09	2,379,327	2,149,295
1999/10	2,524,895	2,347,902

1999/11	2,528,359	2,182,962
1999/12	2,654,413	2,447,999
2000/01	2,562,523	2,330,915
2000/02	2,563,299	2,213,476
2000/03	2,733,104	2,582,885
2000/04	2,509,407	2,473,592
2000/05	2,721,908	2,760,685
2000/06	2,751,387	2,788,746
2000/07	2,737,927	2,816,703
2000/08	2,736,465	2,808,146
2000/09	2,540,218	2,607,448
2000/10	2,631,034	2,663,200
2000/11	2,466,268	2,462,368
2000/12	2,565,219	2,596,558
2001/01 p/	2,356,057	2,390,656
2001/02	2,304,396	2,357,514
2001/03	2,786,447	2,948,596
2001/04	2,331,032	2,461,096
2001/05	2,561,385	2,731,805
2001/06	2,613,974	2,784,233
2001/07	2,631,603	2,786,420
2001/08	2,649,848	2,836,839
2001/09	2,389,675	2,533,212
2001/10	2,503,769	2,614,376
2001/11	2,414,960	2,530,000
2001/12	2,584,004	2,656,503
2002/01	2,487,052	2,617,183
2002/02	2,419,466	2,487,675

Tabla 1.2 Producción de Cemento Portland en México

## **I. 2 Cemento Portland**

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente por silicato de calcio hidratados. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar únicamente con el agua.

Durante esta reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una pasta de aspecto similar al de una roca.

La hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua. cada partícula de cemento forma un aumento sobre su superficie, mismo que gradualmente se extiende hasta enlazarse con el aumento de otras partículas de cemento hasta que se adhiere a los áridos adyacentes. Esta reconstitución tiene como resultado la progresiva rigidización, endurecimiento y desarrollo de resistencia.

La hidratación prosigue mientras se disponga de espacio para los productos de la hidratación y se tengan condiciones favorables de humedad y temperatura (curado); a medida que la hidratación continúa, el concreto se vuelve más duro y más resistente. La mayor parte de la hidratación y del desarrollo de la resistencia tiene lugar durante el primer mes de vida del concreto (28 días).

La invención del cemento portland se atribuye generalmente al ingles Joseph Aspdin. En 1824 obtuvo una patente por su producto al cual denominó cemento portland debido a que producía un cemento que en su color semejaba a una caliza natural que se explotaba en el islote de portland, en el Canal de la Mancha.

El primer cemento portland fabricado en los Estados Unidos de Norte América se produjo en la planta Coplay, Pennsylvania en 1871.

### **I. 2.1 Fabricación**

El cemento portland se produce al pulverizar el clinker, que consiste principalmente en silicatos hidratados de calcio junto con algunos aluminatos de calcio y aluminoferritos de calcio. Normalmente contiene una o más formas de sulfatos de calcio (yeso), que se adiciona a la molienda.



Los materiales usados para fabricar cemento portland deben contener proporciones adecuadas de óxidos de calcio, sílice, alúmina y componentes de óxidos de hierro.

Los pasos a seguir en la manufactura del cemento se representan en el diagrama de flujo (fig.1.1) que es básicamente el mismo en todas las plantas de cemento, no existiendo ninguna planta típica de producción de cemento portland, cada planta tiene diferencias en cuanto a su disposición, equipo o apariencia general.

### Fabricación del cemento

El cemento portland se fabrica en cuatro etapas básicas:

1. Trituración y molienda de la materia prima.
2. Mezcla de los materiales en las proporciones correctas, para obtener el polvo crudo.
3. Calcinación del polvo crudo.
4. Molienda del producto calcinado, conocido como clínker, junto con una pequeña cantidad de yeso

### 1.2.2 Proceso general de producción de cemento

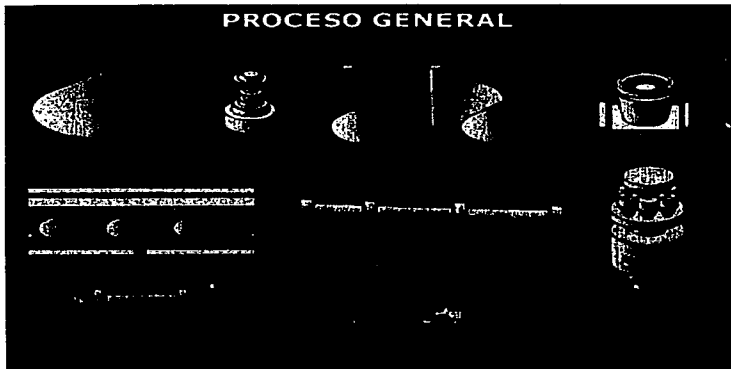


Fig.1.1 Etapas de producción de cemento

## Materias primas

Las fuentes de materia prima más comunes empleadas para la fabricación del cemento portland son para:

Cal ( $\text{CaO}$ ).....	Calcita, Aragonita, Calizas, Margas
Hierro( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) .....	Arcilla, minerales de Fe, costras de laminado
Silice ( $\text{SiO}_2$ ).....	Arcilla, Marga, Esquistos (Qz-Feld.), Arenas Silíceas
Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).....	Lutitas, Esquistos (Qz-Feld.)
Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ ).....	Anhidrita, Yeso Magnesio, Calizas y Dolomitas

En la figura 1.2 se muestra en forma gráfica la cantidad necesaria de cada tipo de material necesario para fabricar el clinker.

La caliza y la pizarra se obtienen de canteras cercanas a las fábricas. El caolín es una arcilla con alto contenido de alúmina que se utiliza para la fabricación del cemento blanco.

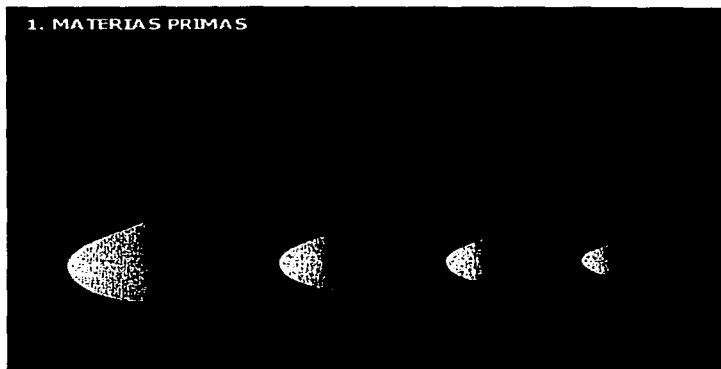


Fig. 1. 2 Materias primas utilizadas en la fabricación de cemento

## Caliza

Se encuentra en las capas superficiales de numerosas cadenas montañosas; en depósitos de profundidad variable (hasta 2000 m y más) lo que representa enorme tonelaje. Para la fabricación de cemento se sacan volúmenes muy grandes porque la caliza representa el 80% de las materias primas que forman el clínker. Por eso conviene que esté cerca de la planta; de no ser así el costo del cemento se elevaría demasiado por razón del acarreo.

Primero se explora el depósito calcáreo para conocer su volumen y el grado de pureza del material que se va a explotar. El análisis químico permite conocer la calidad de una cantera de caliza. Se considera buena la que tiene carbonato de calcio en un 95% o más. Abajo de 90% ocasiona problemas.

Debido a su dureza se extrae de las canteras con el empleo de explosivos. Una voladura puede producir de 30 a 100 mil toneladas de materia prima.

## Pizarra

Se les llama "pizarra" a las arcillas constituidas principalmente por óxidos de silicio de un 45 a 65%, por óxidos de aluminio de 10 a 15%, por óxidos de hierro de 6 a 12% y por cantidades variables de óxido de calcio de 4 a 10%. Es también la principal fuente de álcalis. La pizarra representa aproximadamente un 15% de la materia prima que formará el clínker. Como estos minerales son relativamente suaves, el sistema de extracción es similar al de la caliza, sólo que la barrenación es de menor diámetro y más espaciada, además requiere explosivos con menor potencia.

Debido a que la composición de estos varía de un punto a otro de la corteza terrestre, es necesario asegurar la disponibilidad de las cantidades suficientes de cada material.

## Sílice

Eventualmente se agregan arenas sílicas que contienen de 75% a 90% de sílice, para obtener el óxido de silicio requerido en la mezcla cruda. La Cruz Azul posee jales de sílice en Tlalpujahua, Mich. Los jales son un desecho de las minas, rico en óxido de silicio.

## Hematita

A lo que aporta mineral de hierro se le llama 'hematita', aunque pueden ser diversos minerales de hierro o escoria de laminación. La hematita contiene entre 75 y 90% de óxido férrico. Con estos minerales se controla el contenido de óxido férrico de la mezcla. La hematita constituye entre el 1 y 2% de la mezcla cruda.

## Caolín

El caolín es una arcilla con alto contenido de alúmina que se utiliza para la fabricación del cemento blanco. La Cruz Azul lo consigue en Agua Blanca Ver., al norte del estado de Hidalgo, de donde lo envía por ferrocarril a la planta de Lagunas, Oaxaca.

## Trituración

Para obtener las materias primas, las rocas se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada, en la figura 1.3 se muestra el esquema del proceso de trituración.

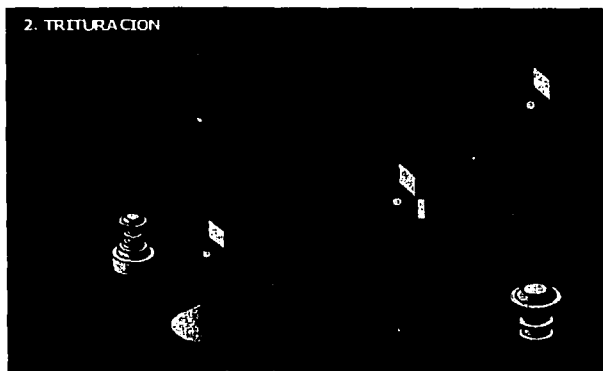


Fig.1.3 Proceso de trituración de la materia prima

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### Prehomogenización

La prehomogenización se lleva a cabo mediante un sistema especial de almacenamiento y recuperación de los materiales triturados, se uniforma en tamaño y composición química (fig. 1.4).

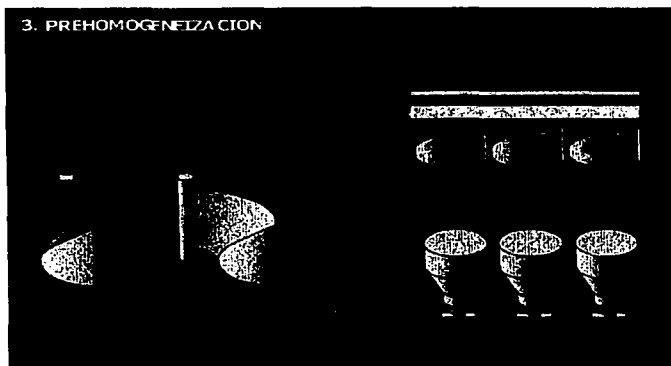


Fig.1.4 Prehomogenización de la materia prima

### Molienda del polvo crudo

El resultado del análisis indica si es preciso ajustar la dosificación y la finura, ya que la mezcla cruda necesariamente debe conservar cierta relación entre los óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio.

Se lleva un estricto control químico; además, las partículas de caliza no deben ser mayores de 125 micras y las de cuarzo no deben medir más de 45 micras para garantizar una operación normal del horno. Si la mezcla de polvo crudo no es uniforme, el horno tiende a enfriarse o a calentarse demasiado, lo que obliga a ajustar la velocidad o el flujo de combustible.

En la figura 1.5 se muestra la distribución del colector, molino y ciclones en la etapa de molienda.

### Homogeneización

El producto de la molienda se lleva a un sitio homogenizador, donde se mezcla para mejorar su uniformidad (fig.1.6).



Fig.1.5 Molienda del polvo crudo

### Calcinación

Los cambios físicos y químicos son graduales. Cuando el polvo crudo entra a la cuarta zona del horno cambia su composición química en una suma de compuestos que se llama clínker; la figura 1.7 muestra el desarrollo de ésta etapa.

El clínker de cemento que tiene la forma de pelotitas negro grisáceas de 12 mm de diámetro (foto. 1.1).

Los constituyentes para 1 kg de clínker son aproximadamente 1.5 kg de calizas y arcilla molida, se calcinan (parcialmente fundidos) a 1450°C durante un lapso de 15 a 29 minutos.

Puesto que las cenizas que provienen de los combustibles se integran al clínker, no existen desechos de las materias primas.

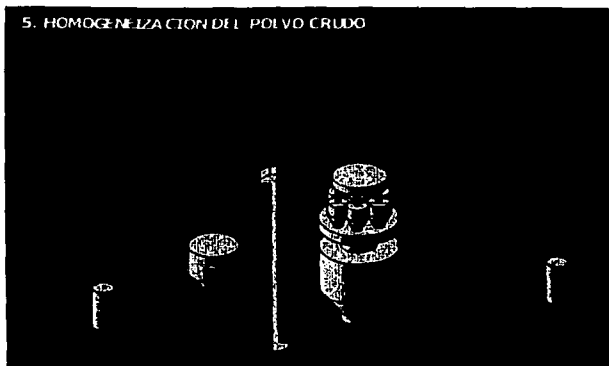


Fig. 1.6 Homogeneización del polvo crudo

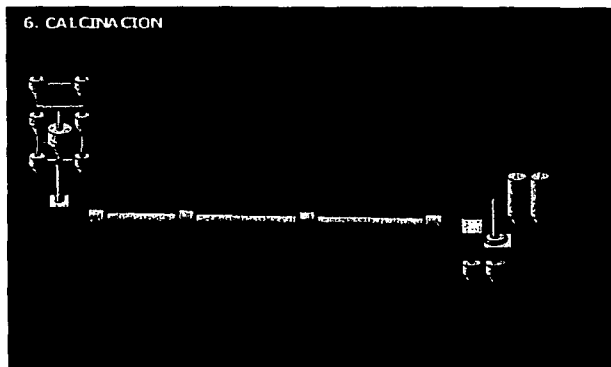


Fig. 1.7 Proceso de calcinación

La palabra clinker procede del inglés y significa 'escoria'. Se define clinker como el producto obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos que contengan óxido de calcio, silicio, aluminio y fierro en cantidades convenientemente calculadas.

El producto de la calcinación debe tener una composición química predeterminada (fig.1.8). No debe haber exceso de cal porque aparece como cal libre en el cemento y al hacer un concreto se producen expansiones y grietas. Será un cemento de mala calidad, se debe evitar entonces la cal libre mediante la correcta dosificación de las materias primas y una "clinkerización" a la temperatura adecuada, (1450° C).

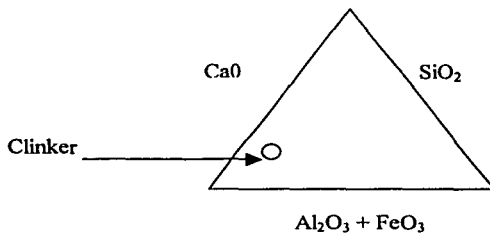
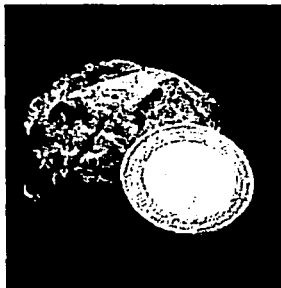


Fig. 1.8 Composición química del clinker



Fotografía 1.1 "Bola" de Clinker

Luego del mezclado, la materia prima molida se vierte por el extremo superior de un horno gíatorio. La materia prima pasa por el horno a una velocidad que se controla por medio de la pendiente y la velocidad de rotación del horno. En el extremo inferior, el combustible para calcinar (carbón pulverizado, combustóleo o gas) es inyectado, donde las temperaturas alcanzan de 1420°C a 1650°C

El clinker se pone a enfriar y posteriormente se pulveriza; en el transcurso de esta última operación se agrega una pequeña cantidad de yeso que sirve para regular el tiempo de fraguado del cemento,



el clínker se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar a través de la malla N° 200 (75micras, 6200 aperturas por centímetro cuadrado), este polvo gris extremadamente fino es el cemento portland.

### Almacenamiento

El clínker frío se almacena a cubierto (fig. 1.9) para después combinarse con otros materiales.

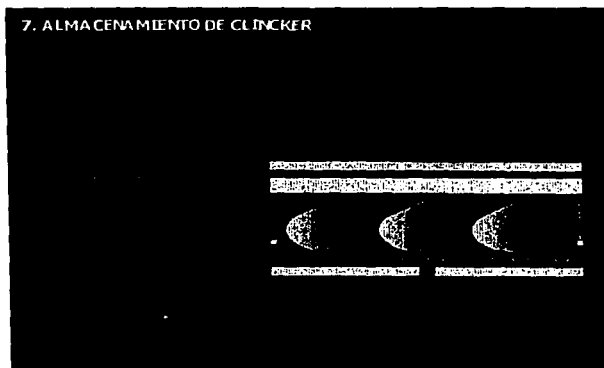


Fig.1.9 Almacenamiento del clínker

### Transformación del clínker en cemento

Para obtener un cemento de alta calidad, al material proveniente de la pulverización del clínker se le agrega yeso sin calcinar, así como materiales que no excedan del 1% del peso total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento (fig.1.10).

El yeso que se mezcla funciona como retardador del fraguado. La combinación de clínker y yeso alcanza una proporción óptima. Es decir, para obtener un cemento con mayor resistencia se requiere agregar el yeso necesario solamente.

Cierta relación de clínker y yeso ofrecen una resistencia inicial un día después de fraguar. Para mejorar resistencia a los 28 días, la proporción debe ser otra.



Fig. 1.10 Transformación de clinker en cemento

### Yeso

El yeso empleado es natural, regula la hidratación y el fraguado del cemento mediante una reacción con el aluminato tricálcico. Al formar el sulfoaluminato tricálcico, la mezcla se hidrata poco a poco y además acelera la hidratación del silicato tricálcico.

El yeso para hacer cemento necesita ser muy puro, con valores que oscilen entre 80 y 90% de pureza.

### Puzolana

Hay puzolanas naturales y artificiales, estas últimas se elaboran con arcillas activadas. La puzolana natural es un material volcánico. Se le utiliza porque contribuye a la resistencia del cemento; aunque la puzolana sola no tiene propiedades hidráulicas, combina su contenido de sílice con la cal que libera el cemento al hidratarse, para formar compuestos con propiedades hidráulicas.

En su definición clásica las puzolanas se identifican como materiales silíceos o silíceo aluminosos que en sí mismos tienen poco o ningún valor cementante, pero que finamente divididos y en

presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a la temperatura ambiente para formar compuestos que sí poseen propiedades cementantes.

Los materiales que tiene la capacidad necesaria para cumplir con los requisitos de la definición anterior, son muy numerosos y pueden clasificarse en dos grupos:

Grupo 1 Puzolanas naturales.- Tierras diatomáceas, cenizas, arenas, lapilli, tobas, rocas vítreas.

Grupo 2 Puzolanas artificiales.- cenizas volantes, hollín de sílice, ladrillo molido.

Los materiales puzolánicos que ahora se utilizan en el país para la fabricación de los cementos portland - puzolana comerciales, corresponden en su mayoría al primer grupo; es decir, se trata principalmente de puzolanas naturales que se muelen en fábrica juntamente con el clinker, en su mayor parte son materiales que pertenecen al grupo de cenizas, arenas, lapilli, tobas y rocas vítreas de origen volcánico.

La puzolana que utiliza La Cruz Azul procede del El Encino, Santa María Ilucán y San Miguel Vindhó en el estado de Hidalgo.

La función básica de una puzolana en el concreto de cemento portland consiste en reaccionar con el hidróxido de calcio que se libera en el curso de la hidratación del cemento, para formar compuestos con propiedades cementantes. De esta manera el hidróxido de calcio liberado, que es un compuesto fácilmente soluble en agua, se convierte a la forma de silicatos hidratados de calcio que son insolubles y resistentes.

El principal beneficio que se obtiene en el concreto endurecido, como consecuencia de esta reacción, es el de hacerlo más durable especialmente cuando presta servicio en condiciones que propician la disolución y extracción del hidróxido de calcio que normalmente contiene en su interior.

Un motivo frecuente para utilizar puzolanas en el concreto de cemento portland consiste en aprovechar su aptitud para inhibir los efectos dañinos de la reacción álcali - agregado, cuando es inevitable emplear agregados que son reactivos y no se dispone de cementos portland bajos en álcalis (0.6 % máximo como  $\text{Na}_2\text{O}$ ).

### **Control químico**

**Mezcla cruda.** Para efectuar el control químico de la mezcla cruda la planta deberá contar con un equipo automático de espectrometría de Rayos X.

Para cumplir con las necesidades de control y particularmente para conocer la composición con la exactitud y rapidez que se requiere, se toman muestras cada hora en las unidades de molienda de crudo, en función de éstas se modifican las proporciones de caliza, pizarra, sílice y hematita.

**Clíinker.** Para evaluar la calidad del clíinker también se emplea el análisis por rayos X. A partir de su composición química se calculan los compuestos potenciales, como los silicatos y los aluminatos de calcio.

**Cemento:** el control de silicatos se efectúa cada ocho horas, es decir, una prueba por turno.

### **Control físico**

Las pruebas de resistencia a la compresión, sanidad y tiempos de fraguado inicial y final, se realizan cada 24 horas.

En la planta, cada hora toma una muestra para la prueba blaine, que mide la finura del cemento. Esta prueba tiene como unidades de medida  $\text{cm}^2/\text{gr}$ , es decir, la superficie que cubre un gramo de polvo. Los cementos tipo II y tipo II con puzolana, alcanzan finuras del orden de los 3,500 a 4,500  $\text{cm}^2/\text{gr}$ .

Hay también tamices para medir grados de finura; prensa, para medir la resistencia a la compresión; balanzas para medir la densidad; parrillas para secar muestras que se tamizan en vía húmeda y reactivos para determinar el carbonato de calcio, que es lo más usual.

La prueba de absorción atómica se utiliza para elaborar series Patrón Estándar.

Así como el estudio de un mineral permite indagar su origen, también es posible saber la historia de un clíinker. Al microscopio petrográfico, los investigadores analizan con qué material se hizo, si las partículas eran heterogéneas, si estaban muy gruesas así como la morfología del cristal.

### **Envase y embarque**

De los sitios de almacenaje el cemento se transporta por diferentes ductos hasta la zona de ensacadora o sitios de carga a granel (fig. 1.11).



Fig. 1.11 Envase y embarque del cemento

México cuenta con 24 importantes plantas cementeras ubicadas estratégicamente a lo largo de la República (fig.1.12a) que aprovechan las características litológicas de la región donde se encuentran establecidas.

*Cemex* afilia a diferentes cementeras como son: Cemento Monterrey, Cemento Centenario, Cemento Maya, Cemento Guadalajara, Cemento Anahuac, Cemento Tolteca, Cemento León, Cemento Campana y Cemento Atlante.

*Cementos Cruz Azul* por su parte cuenta con tres plantas ubicadas en los estados de Hidalgo, Oaxaca y Aguascalientes.

*Cementos Moctezuma* cuenta con dos plantas ubicadas en el estado de Morelos.

*Grupo Cementos Chihuahua* por su parte cuenta con cuatro plantas en el estado de Chihuahua.

Además, cada empresa posee centros de distribución de acuerdo a la zona geográfica más conveniente para su comercialización que se muestran en las figuras 1.12b, 1.12c y 1.12d, mientras que en las zonas restantes CEMEX se encarga de la distribución de sus productos.

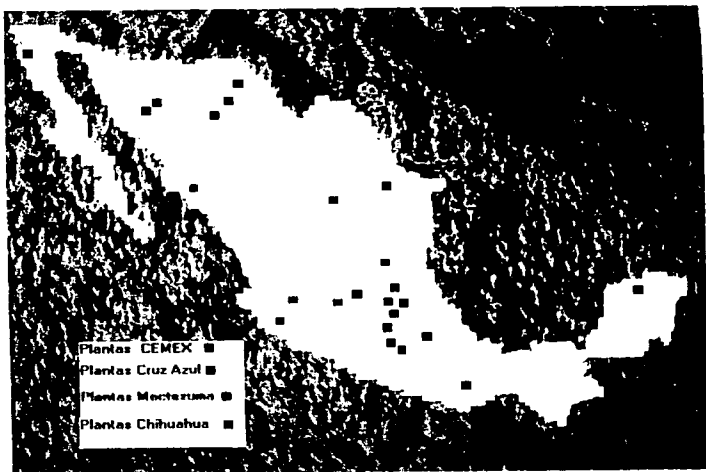


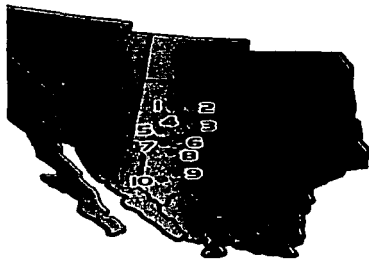
Fig. 1.12a Ubicación de las principales plantas cementeras en México



Fig. 1.12b Zona de distribución Cemento Cruz Azul



Fig. 1.12c Zona de distribución Cemento Moctezuma



- 1 Albuquerque N.M.
- 2 Tijera N.M.
- 3 Ruidoso N.M.
- 4 Alamo Gordo N.M.
- 5 Las Cruces N.M.
- 6 El Paso Texas
- 7 Cd. Juárez Chih.
- 8 Samalayuca Chih.
- 9 Chihuahua Chih.
- 10 Cuahitlán Chih.

Fig.1.12d Zona de distribución Grupo Cemento Chihuahua

### I. 2. 3 Compuestos químicos

El secado implica la evaporación de la humedad de la materia prima a una temperatura de 110°C.

La deshidratación se da a temperaturas mayores de 450°C, y significa la pérdida del agua químicamente unida a compuestos tales como algunas arcillas y agregados.

A los 900°C la caliza se descompone en cal viva (CaO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Esta cal está lista para reaccionar y debe ser tratada rápidamente en la zona de clinkerización.

Durante la calcinación en la fabricación del clinker, el óxido de calcio se combina con los componentes ácidos de la materia prima para formar cuatro compuestos fundamentales que constituyen el 90% del cemento, también se encuentran presentes yeso y otros materiales.

Los constituyentes principales son:

Silicato tricálcico	3 CaO SiO <sub>2</sub>	= C <sub>3</sub> S
Silicato dicálcico	2 CaO SiO <sub>2</sub>	= C <sub>2</sub> S
Aluminato tricálcico	3 CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= C <sub>3</sub> A
Aluminoferrito tricálcico	4 CaO Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	= C <sub>4</sub> AF

El último término expresado es la nomenclatura convencional en la Industria de la Construcción.

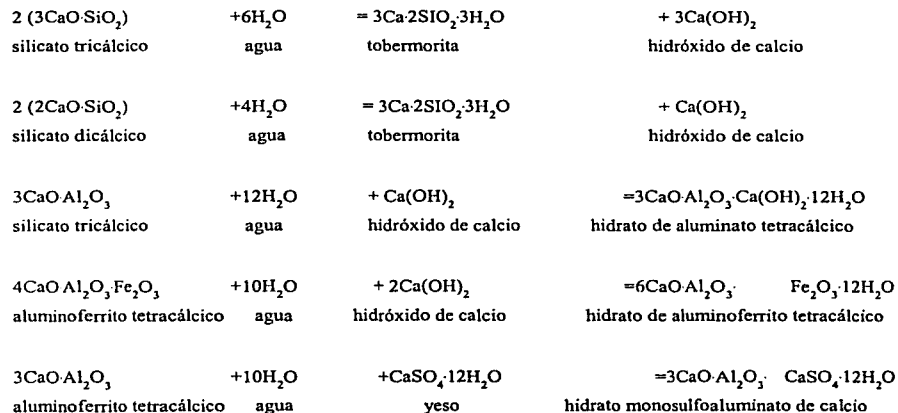
En presencia de agua, los cuatro compuestos se hidratan para formar nuevos compuestos que constituyen la infraestructura de la pasta del cemento endurecido en el concreto. Los silicatos de calcio  $C_3S$  y  $C_2S$  que constituyen cerca del 75% del peso se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio e hidrato de silicato de calcio llamado gel de Tobermorita. El cemento hidratado contiene aproximadamente un 25% de hidróxido de calcio y un 50% de gel de Tobermorita en peso.

La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente al gel de Tobermorita.

El  $C_3A$  reacciona con el agua y con el hidróxido de calcio para formar el hidrato de aluminato tetracálcico.

El  $C_4AF$  reacciona con el agua para formar hidrato de aluminoferrito de calcio.

El  $C_3S$ , el yeso y el agua se pueden combinar para formar el hidrato sulfoaluminato de calcio.





### Temperaturas de reacción

Los óxidos de hierro comienzan a reaccionar con la cal y la alúmina, para formar ferroaluminato tetracálcico líquido a la temperatura de 1300°C, a la que se disuelven los minerales, incrementando la reacción entre ellos.

A los 1338°C los materiales disueltos en el ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) reaccionan, formando todo el silicato dicálcico ( $C_2S$ ).

El aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) se termina de formar a los 1400°C. La cal que se encuentra en exceso reacciona con parte del silicato dicálcico ( $C_2S$ ) para formar silicato tricálcico ( $C_3A$ ).

El precalentador aumenta la capacidad de la unidad, ahorra energía y reduce mucho el dióxido de carbono que sale a la atmósfera.

La temperatura de calcinación es de 1450°C ese calor se debe mantener constante en la zona de calcinación del horno para que se realicen las reacciones químicas.

El polvo calcinado y convertido en clínker pasa al enfriador, donde llega con una temperatura aproximada de 1000°C. En el enfriador al clínker se le inyecta mucho aire a presión que lo enfría hasta los 40°C. Pierde calor con rapidez porque está formado de nódulos o bolitas de poco volumen y de polvo. Si hubiera piedras, al romperse estarían rojas por dentro todavía.

Parte del aire que se calienta al contacto con el polvo se aprovecha para facilitar la quema del combustólcio, el que ya tiene poca temperatura se va a la atmósfera a través de un colector de residuos.

El conocimiento actual de la química del cemento indica que estos compuestos tienen las siguientes propiedades:

$C_3S$  (*silicato tricálcico*).- Se hidrata y endurece rápidamente y es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia temprana.

$C_2S$  (*silicato dicálcico*).- Se hidrata y endurece lentamente, también contribuye al incremento de la resistencia a edades mayores de una semana.

*C<sub>3</sub>A (aluminato tricálcico).*- Libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento, los cementos con bajos porcentajes de C<sub>3</sub>A son particularmente resistentes a los suelos y aguas que contienen sulfatos.

*C<sub>4</sub>AF (aluminoferrito tetracálcico).*- Reduce la temperatura de formación del clinker, lo que favorece a la manufactura del cemento, la mayoría de efectos de color se debe al C<sub>4</sub>AF y a sus hidratos.

En el clinker y en el cemento el C<sub>3</sub>S y el C<sub>2</sub>S son también conocidos como alita y belita respectivamente.

#### **1. 2. 4 Características físicas de las principales fases presentes en el clinker**

Mucha de la información descriptiva de los constituyentes del clinker está basada en los trabajos realizados por Le Chatalier (1883), Törnnebohm (1897), Rankin and Wright (1915) y más recientemente en publicaciones realizadas por Ono kawamura (1968), Chromy and Carin (1980/81), Maki and Kato (1982).

Como ya se ha mencionado la alita es la fase que predomina en el clinker portland, que comprende del 40 al 70% del clinker, seguido por cristales de belita (10 a 30%), en los primeros es común que desarrollen cristales bien definidos mientras que los de belita no, por otra parte la matriz va a presentar pequeños cristales de belita secundaria y bordes de reacción con los cristales de alita.

##### **Alita (C<sub>3</sub>S)**

La alita es una solución sólida que cristaliza en los sistemas monoclinico y triclinico; sustituciones de los iones de magnesio y aluminio por silicio en su estructura interna son los responsables que cristalicen en uno u otro sistema, pero también se puede presentar cristalización en un sistema pseudotrigonal (foto. 1.1a, 1.1b y 1.1c), otros iones que pueden intervenir en la sustitución son el fierro y el calcio.

Las características físicas y ópticas de este compuesto son:

- densidad de 3.13 a 3.22 (mg/m<sup>3</sup>)
- lustre vítreo
- cristales idiomórficos usualmente de seis lados

- tamaño promedio de cristales de 25 a 65 micras
- dureza de 5 en la escala de Mohs
- temperatura de cristalización de 1200 a 1450°C
- Índice de refracción de 1.716 a 1.720 ( $\alpha$ ); 1.722 a 1.724 ( $\gamma$ )
- birrefringencia de 0.005
- extinción oblicua y ondulante
- figura de interferencia biáxica negativa

### **Belita (C<sub>2</sub>S)**

La belita es una solución sólida que cristaliza en los sistemas ortorrómbico y monoclinico; sustituciones de los iones de magnesio, potasio, sodio, bario, cromo, aluminio, fósforo, manganeso y fierro en su estructura interna son los responsables que cristalicen en uno u otro sistema.

Las características físicas y ópticas de este compuesto son:

- densidad de 3.07 (mg/m<sup>3</sup>)
- lustre vítreo
- cristales hipidiomórficos usualmente redondeados, maclado polisintético
- tamaño promedio de cristales de 1 a 4 micras a 1300°C y de 20 a 40 micras a 1500°C
- dureza de 4 a 5 en la escala de Mohs
- índice de refracción de 1.694 ( $\alpha$ ); 1.702 ( $\gamma$ )
- birrefringencia de 0.008
- extinción oblicua y ondulante
- figura de interferencia biáxica positiva

### **Aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A)**

El aluminato tricálcico es una solución sólida donde se encuentran presentes iones de fierro, silicio, magnesio, sodio y potasio; cristaliza en el sistema cúbico; sustituciones de los iones en su estructura interna son los responsables que cristalicen en el sistema tetragonal o monoclinico.

Las características físicas y ópticas de este compuesto son:

- densidad de 3.04 (mg/m<sup>3</sup>)
- lustre vítreo
- cristales xenomórficos
- tamaño promedio de cristales de 1 a 60 micras

- temperatura de cristalización de 1542°C
- dureza de 6 en la escala de Mohs
- índice de refracción de 1.710

### **Aluminoferrito tricálcico ( $C_3AF$ )**

El aluminoferrito tricálcico también es una solución sólida con iones de calcio, fierro y aluminio, cristaliza en los sistemas ortorrómbico y monoclinico;

Las características físicas y ópticas de este compuesto son:

- densidad de 3.77 ( $mg/m^3$ )
- lustre vítreo
- cristales hipidiomórficos usualmente prismáticos
- dicroico de pardo amarillo a verde oliva
- índice de refracción de 1.98 ( $\alpha$ ); 2.05 ( $\gamma$ )
- birrefringencia de 0.010
- extinción oblicua y ondulante
- figura de interferencia biáxica negativa

Otras fases que pueden estar presentes en el clinker portland son periclasa, calcita, yeso, anhidrita, cuarzo y vidrio.

Una pasta de cemento hidratado presenta características bien definidas como su comportamiento isotrópico con doble polarización y la presencia de finos cristales de hidróxido de calcio distribuidos uniformemente pero con ligeras concentraciones bajo los agregados gruesos y finos; el índice de refracción es ligeramente menor o mayor al Bálamo de Canadá (1.537) fotografías 1.2 y 1.3.

Los cristales planares de muscovita pueden ser confundidos con los minerales de hidróxido de calcio pero estos últimos poseen una birrefringencia de 0.027 de color amarillo brillante o naranja correspondientes al segundo orden de la tabla de Michel-Levy.



1.1a

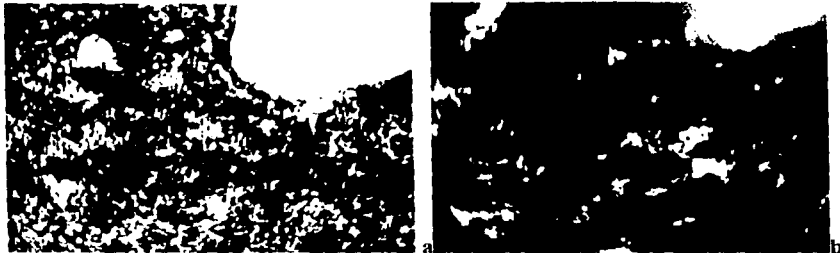


1.1b

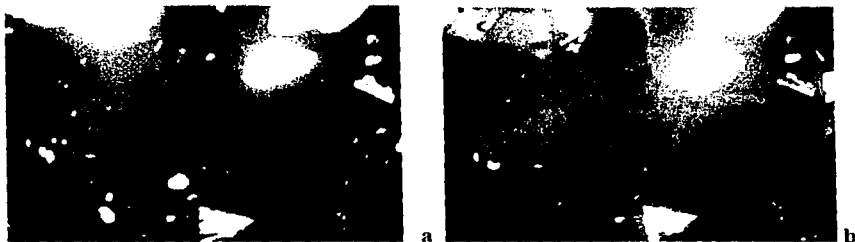


1.1c

Foto 1.1. Fotomicrograffas que presentan cristales de alita en una matriz de  $C_4AF$  oxidado; 1.1a: 10x con luz polarizada; 1.1b: 63x con luz polarizada; 1.1c: 63X con doble polarización.



Fotografía 1.2; Fotomicrografía en la que se muestra la presencia de finos cristales de hidróxido de calcio y comportamiento isotrópico de la pasta en un concreto normal, a) luz polarizada, b) doble polarización.



Fotografía 1.3; Fotomicrografía en la que se muestra la ausencia de cristales de hidróxido de calcio y comportamiento isotrópico de la pasta, a) luz polarizada, b) doble polarización.

### **I. 3 Tipos de Cementos portland**

Se fabrican diversos tipos de cemento portland para satisfacer diferentes necesidades químicas y físicas.

La norma C150 "Especificación estándar para cemento portland" de la American Society For Testing and Materials (ASTM) estipula ocho tipos de cemento portland:

#### **Tipo I Normal y Tipo IA Inclisor de aire.**

De uso general, adecuado para ser empleado cuando las propiedades especiales de los demás tipos de cementos no sean necesarias.

Se utiliza en concretos que no estén sujetos al ataque de factores agresivos como sulfatos.

Entre sus usos se incluyen pavimentos, pisos, edificios de concreto reforzado, puentes, estructuras para vías férreas, tanques y depósitos, tubería y mampostería.

#### **Tipo II de Resistencia moderada a sulfatos y Tipo IIA Inclisor de aire.**

Se emplea donde sea necesario tomar precauciones contra el ataque moderado de sulfatos, como son drenajes.

#### **Tipo III Alta resistencia a edad temprana y Tipo IIIA Inclisor de aire.**

Proporciona resistencias elevadas a edades tempranas normalmente a una semana o menos.

Se emplea cuando las cimbras deben ser retiradas rápidamente.

#### **Tipo IV Bajo calor de hidratación.**

Se emplea cuando se tiene que mantener un valor mínimo en la cantidad y velocidad de generación de calor provocado por la hidratación, se destina para estructuras de concreto masivo como presas de gravedad.

#### **Tipo V Resistencia elevada a los sulfatos.**

Se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de sulfatos, su característica radica en el bajo contenido de aluminato tricálcico.

### **I. 3. 1 Propiedades del cemento portland**

La mayor parte de especificaciones para el cemento portland limitan su composición química y sus propiedades físicas. La comprensión del significado de algunas de estas propiedades físicas es útil para interpretar los resultados de las pruebas que se efectúan al cemento.

#### **Finura**

La finura del cemento influye en el calor liberado y en la velocidad de hidratación. A mayor finura del cemento mayor rapidez de hidratación del cemento y por tanto mayor desarrollo de resistencia. Aproximadamente del 85% al 95% de las partículas de cemento son menores a 45 micras.

#### **Sanidad**

La sanidad se refiere a la capacidad de una pasta endurecida para conservar su volumen después del fraguado. La expansión destructiva retarda o falta de sanidad es provocada por un exceso en las cantidades libres de cal libre o de magnesio (periclasa).

#### **Consistencia**

La consistencia se refiere a la movilidad relativa de una pasta de cemento recién mezclado o bien a su capacidad de fluir.

#### **Tiempo de fraguado**

El fraguado inicial de la pasta de cemento no debe ocurrir demasiado pronto; el fraguado final tampoco debe ocurrir demasiado tarde. Los tiempos de fraguado indican si la pasta está desarrollando sus reacciones de hidratación en forma normal. El yeso regula el tiempo de fraguado en el cemento, la relación agua cemento y los aditivos usados.

#### **Resistencia a la compresión**

Se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto sujeto a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) a una edad de 28 días y se le designa con el símbolo  $f'c$ .

La resistencia a la compresión es obtenida a partir de pruebas en cubos de mortero estándar de 5 cm, o bien se efectúan sobre cilindros que miden 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Estos ejemplares se hacen y se curan de manera prescrita y utilizando una arena estándar (ASTM-C-778)



### Calor de hidratación

El calor de hidratación es el que se genera cuando reacciona el agua con el cemento. La cantidad de calor generado depende principalmente de la composición química del cemento, siendo el C<sub>3</sub>A y el C<sub>2</sub>S los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor.

Otros factores que también influyen son la relación agua - cemento, la finura del cemento y la temperatura de curado. Incrementos en la relación agua - cemento, en la finura o en la temperatura de curado aumenta el calor de hidratación.

En ciertas estructuras, como ocurre con aquellas de masa considerable, la velocidad así como la cantidad de calor generado son de gran importancia. Si este calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable en la temperatura del concreto. Esto puede ser indeseable puesto que, después del endurecimiento a una elevada temperatura, el enfriado no uniforme hasta alcanzar la temperatura ambiente, puede crear esfuerzos debidos a la contracción térmica.

Las cantidades aproximadas de calor generado durante los primeros siete días, tomando como 100% al del cemento portland tipo I, son las siguientes:

Tipo II y IIa moderado	80 a 85%
Tipo III y IIIa	hasta 150%
Tipo IV	40 a 60%
Tipo V	60 a 75%

### Peso específico

Generalmente el peso específico del cemento portland es de aproximadamente de 3.15.

### Propiedades físicas del cemento

Consistencia normal (% de agua).....	25.4%
Tiempo de fraguado	
Inicial.....	1:55 h
Final.....	4:55 h
Peso específico.....	3.10
Resistencia a la compresión kg/cm <sup>2</sup>	
3 días.....	237
7 días.....	272
28 días.....	349

## **CAPITULO II**

### **Control de calidad en los agregados**

#### **II. 1 Agregados para el concreto**

La importancia de utilizar el tipo y calidad adecuados de agregados, no debe ser subestimada, pues los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60 a 75% del volumen del concreto (70 a 85% en peso) e influyen notablemente en las propiedades del concreto recién mezclado o endurecido.

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o roca triturada, con un tamaño máximo de 5 mm; los agregados gruesos consisten en gravas o agregados triturados cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm a 38 mm.

Los agregados deben cumplir ciertas reglas para darles un uso óptimo en la construcción: deben de consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y de otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta de cemento.

La deficiencia de la calidad de los agregados empleados provoca la aparición de propiedades no deseables en el concreto; bajo módulo de elasticidad, altas deformaciones y elevados cambios volumétricos, todo lo cual da lugar al agrietamiento de las estructuras.

La calidad intrínseca de la roca se obtiene con el examen petrográfico a la roca en estudio (norma ASTM C295; NOM C256). Mediante la ejecución de este examen se definen sus características físicas como son mineralogía, estructura, textura, porosidad, sanidad, fracturamiento y contaminaciones indeseables; así mismo, se puede inferir el comportamiento de la roca al ser sometida a fragmentación por trituración. Si por el examen petrográfico se determina que la roca es de buena calidad intrínseca, el siguiente paso consiste en confirmarlo mediante pruebas de laboratorio correspondiente.

Los procedimientos específicos empleados en el examen petrográfico de cualquier muestra dependen en gran parte del propósito del examen y de la naturaleza de la muestra. Un examen petrográfico completo para propósitos e investigaciones particulares, requiere de una revisión de los componentes seleccionados por medio de procedimientos adicionales tales como el análisis de difracción de rayos X, análisis diferencial térmico, espectroscopía u otros.

La identificación de los agregados de una muestra, generalmente, es un paso necesario para el conocimiento de las propiedades que se espera influyan en el comportamiento del material, para el aprovechamiento deseado, pero la identificación no es el fin del mismo. El valor de cualquier examen petrográfico depende en gran parte de la representatividad de la muestra examinada, de la completa y exacta información proporcionada al petrógrafo respecto al origen y propósito del empleo del material y de la habilidad del petrógrafo para correlacionar estos datos con los encontrados en el examen.

El examen petrográfico se emplea para determinar las propiedades físicas y químicas del material por analizar que tienen relación con la calidad del mismo para su aprovechamiento adecuado; para describir y clasificar los componentes de la muestra; para determinar las cantidades relativas de los componentes de la muestra con el fin de evaluar cuando estos difieren significativamente en propiedades que se relacionan con la calidad del material para el aprovechamiento adecuado.

El muestreo se debe realizar bajo la supervisión directa de un geólogo familiarizado con los requisitos de agregados para concreto de acuerdo a las diferentes normas de calidad publicadas. Por ejemplo, es común que las rocas estratificadas, consideradas como agregados para concreto pueden ser calizas, en las que se debe observar la presencia y distribución de impurezas arcillosas. Las calizas que contiene horizontes delgados de lutitas, intercaladas pueden ser bancos adecuados de agregados si la lutita está distribuida de forma tal que no impida la fabricación del tamaño máximo requerido y se pueda eliminar durante el proceso.

Cuando existen impurezas arcillosas se debe determinar si éstas son de minerales de arcilla o de otros minerales del tamaño de la arcilla. Si son minerales de arcilla debe establecerse si estos incluyen miembros del grupo de la montmorrillonita que es una arcilla expansiva.

El reporte del estudio petrográfico de los áridos debe contener la descripción de cada tipo de roca, entre las características principales, se incluyen las siguientes:

- Forma de la partícula
- Superficie de la partícula
- Tamaño de grano
- Textura y estructura
- Porosidad
- Color
- Heterogeneidades importantes
- Condiciones físicas generales del tipo de roca
- Presencia de constituyentes que se sabe causan reacciones químicas perjudiciales al concreto

En el estudio petrográfico de concreto endurecido se debe indicar la localización y espaciamiento de las fracturas de falla, tipo o tipos litológicos, tipos de alteración, condiciones físicas y variación de condición, dureza, cohesión, porosidad, tamaño del grano, textura, tipo o tipos de fracturas y presencia de componentes capaces de reaccionar perjudicialmente en el concreto.

#### **II. 1. 1 Condición física**

Con frecuencia se pueden encontrar partículas en diferentes grados de intemperismo en un grupo de áridos. Esto se debe clasificar dentro de las categorías basadas en condiciones y comportamientos comparables en el concreto. Los tipos de categorías propuestas en la norma NOM-C-265-1983 son:

- Sanas densas
- Moderadamente intemperizadas
- Muy intemperizadas
- Densas
- Porosas

Usualmente, no es práctico identificar más de tres condiciones por tipo de roca, una o dos pueden ser suficientes.

#### **II. 1. 2 Granulometría**

La granulometría se refiere a la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, tal como se determinan por el análisis de tamices (norma ASTM-C-136), el término agregado fino se refiere a un agregado cuya mayor parte pasa a través de una malla con abertura de 5mm; agregado

grosso se refiere a un agregado cuya mayor parte queda retenida en la malla de 5 mm. Las proporciones o cantidades de las partículas de diversos diámetros que constituyen el agregado se encuentran por tamizado, los siete tamices estándar para agregados fino tienen aperturas que varían desde la malla N° 100 (150 micras) hasta 9.52 mm; para el agregado grosso se utilizan trece tamices estándar y tienen aperturas que varían desde 1.18 mm hasta 102 mm.

Tabla de mallas utilizadas en el tamizado del agregado fino

Malla N° 100	0.15 mm	Malla N° 8	2.36 mm
Malla N° 50	0.30 mm	Malla N° 4	4.75 mm
Malla N° 30	0.60 mm	3/8 pul	9.52 mm
Malla N° 16	1.18 mm		

Tabla de mallas utilizadas en el tamizado del agregado grosso

Malla N° 16	1.18 mm	1.5 pul	37.5 mm
Malla N° 8	2.36 mm	2 pul	50 mm
Malla N° 4	4.75 mm	2.5 pul	63 mm
3/8 pul	9.5 mm	3 pul	75 mm
1/2 pul	12.5 mm	3.5 pul	90 mm
3/4 pul	19.0 mm	4 pul	100 mm
1 pul	25.0 mm		

De acuerdo a la Norma Mexicana NOM - C - 111-1988 que trata sobre la granulometría de los agregados para el concreto establece los límites permisibles en la utilización de los áridos:

**Del agregado fino**

- a) Estar dentro de los límites indicados en la tabla
- b) Su módulo de finura no debe ser menor de 2.30 ni mayor de 3.10
- c) El retenido parcial en cualquier criba no debe ser mayor de 45%

Criba	% Retenido acumulado
(3/8)	0
(4)	0 a 5
(8)	0 a 20
(16)	15 a 50

(30)	40 a 75
(50)	70 a 90
(100)	90 a 98
Charola	100

La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las características relativas al concreto como son: los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad. Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente a la uniformidad del concreto de una revoltura a otra. Las arenas muy finas a menudo resultan antieconómicas; las arenas muy gruesas y el agregado grueso pueden producir mezclas rígidas, no trabajables. En general, aquellos agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y tienen una curva granulométrica normal producirán los resultados más satisfactorios.

Las cantidades de agregado fino que pasan las mallas de 0.30 mm y de 0.15 mm afectan la trabajabilidad, la textura superficial y el sangrado del concreto.

Comúnmente se necesita más agua y cemento para agregados de tamaño pequeño que para tamaños mayores.

#### Prueba de finos para arena

La prueba de asentamiento en el campo es una prueba sencilla, para obtener un indicio de la cantidad de finos presentes en la arena natural. Esta prueba para efectuarla, hay que utilizar preferentemente una probeta graduada  $d < e$  250ml y seguir los siguientes pasos.

1. Verter en la probeta 50ml de solución de agua con sal (una cucharadita de sal para 570ml de agua)
2. Verter arena en la probeta hasta que el nivel de ésta llegue a la marca de 100ml.
3. Agregar más agua salada hasta llegar a 150ml
4. Agitar bien la probeta
5. Colocar la probeta sobre una superficie nivelada y golpearla ligeramente hasta que la parte superior de la arena quede nivelada.
6. Dejar reposar durante 3 h.

7. Medir el volumen de la capa de finos y el volumen de la arena y utilizar la siguiente expresión:

$$(\text{altura de la capa de finos} / \text{altura de la columna de arena}) \times 100$$

El contenido de finos no debe ser mayor del 8%.

### II. 1.3 Morfología

Esta característica de los agregados es necesario conocerla ya que tiene influencia sobre la trabajabilidad y durabilidad de cualquier estructura de concreto.

La constituyen las propiedades de forma, esfericidad y redondez.

**Forma:** Es la geometría o relación que existe entre las tres dimensiones de la partícula. Para determinar la forma, se puede utilizar la clasificación de Zing (1935) el cual clasifica las partículas en función de dos valores asociados a sus dimensiones (fig.2.1):

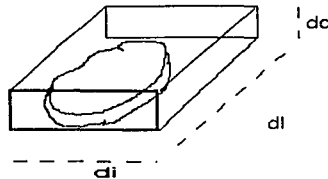


Fig. 2.1 Dimensiones de una partícula (Zing)

dc = dimensión corta

dl = dimensión larga

di = dimensión intermedia

Relación

dc / di = valor en " X "

di / dl = valor en " Y "

Este autor propone cuatro posibles formas (fig.2.2)

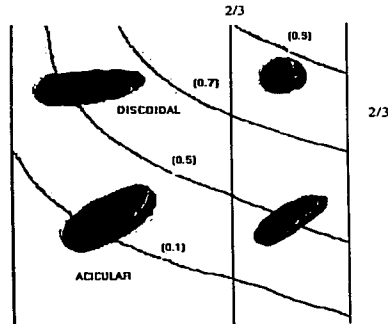


Fig. 2.2 Formas de una partícula (Zing)

forma	X	Y
Hoja	< 2/3	< 2/3
Rodillo	> 2/3	< 2/3
Discoidal	< 2/3	> 2/3
Equidimensional	> 2/3	> 2/3

Sneed y Folk (1958) proponen una clasificación triangular con base a los diámetros de las partículas (fig.2.3):

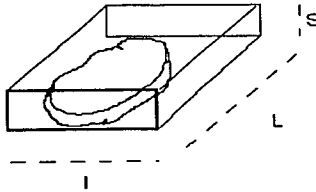


Fig. 2.3 Dimensiones de una partícula (Sneed y Folk; 1958)

S = diámetro menor

L = diámetro mayor

I = diámetro intermedio

Relación:

$$(L-I) / (L-S) = X$$

$$S / L = Y$$



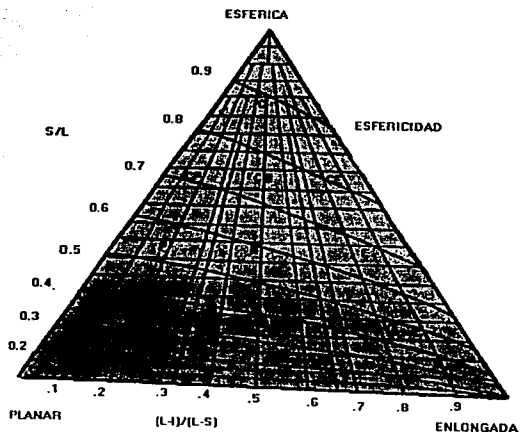


Fig. 2.4 Formas de una partícula (Sneed y Folk; 1958)

Ambos autores proponen diez formas (fig. 2.4)

Forma		X	Y
Muy planar	(VP)	<0.3	<0.3
Planar	(P)	<0.3	(0.3 - 0.5)
Planar compacta	(CP)	<0.3	(0.5 - 0.7)
Forma de Hoja pronunciada	(VB)	(0.3 - 0.7)	< 0.3
Hoja	(B)	(0.3 - 0.7)	(0.3 - 0.5)
Hoja compacta	(CB)	(0.3 - 0.7)	(0.5 - 0.7)
Muy enlongada	(VE)	(0.7 - 1.0)	< 0.3
Enlongada	(E)	(0.7 - 1.0)	(0.3 - 0.5)
Enlongada compacta	(CE)	(0.7 - 1.0)	(0.5 - 0.7)
Compacta	(C)	(0.0 - 1.0)	(0.7 - 1.0)

Para identificar con rapidez las partículas planas y alargadas (fig.2.5) contenidas en un conjunto de fragmentos se puede aplicar el método CRD 119 del Cuerpo de Ingenieros del Ejército (EUA), que emplea un calibrador especialmente diseñado para tal propósito.

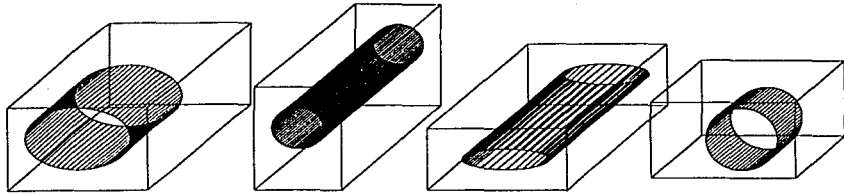
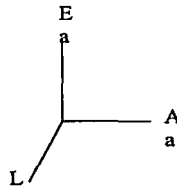


Fig.2.5 Forma de las partículas método CRD 119



$A/E > 3$	$L/A > 3$	$A/E > 3$	$A/E < 3$
$L/A < 3$	$A/E < 3$	$L/A > 3$	$L/A < 3$
Partículas planas (lajeadas)	Partículas alargadas (oblongadas)	Partículas planas y alargadas (tabulares)	Partículas equidimensionales (cubos, esfera)

En la actualidad se usan gráficas visuales para determinar la esfericidad y redondez de las partículas como son los gráficos (fig.2.6) de Krumbein y Sloss (1955).

Por otra parte, las formas de las partículas se pueden simplificar en 4 tipos básicos que son: equidimensional o esférica, prismática, tabular o elíptica e irregular.

De estas formas la que mayor problema puede ocasionar es aquella del tipo tabular; estas piezas pueden provocar disminución en la trabajabilidad y afectan la durabilidad de la estructura ya que muy fácilmente pueden orientarse de manera preferencial (y en ocasiones en un solo plano) y el agua y el espacio poroso pueden acumularse debajo de ellas, además provoca mayores

requerimientos de arena y eso hace necesario un incremento en el volumen de agua para la mezcla (Ropke 1982).

### **Esfericidad**

Es la semejanza que tengan las partículas a una esfera perfecta.

### **Redondez**

Está relacionada con el desgaste de bordes y arista de las partículas (historia de la abrasión) y se pueden clasificar en partículas angulosas, subangulosas, subredondeadas, redondeadas y bien redondeadas (fig. 2.7).

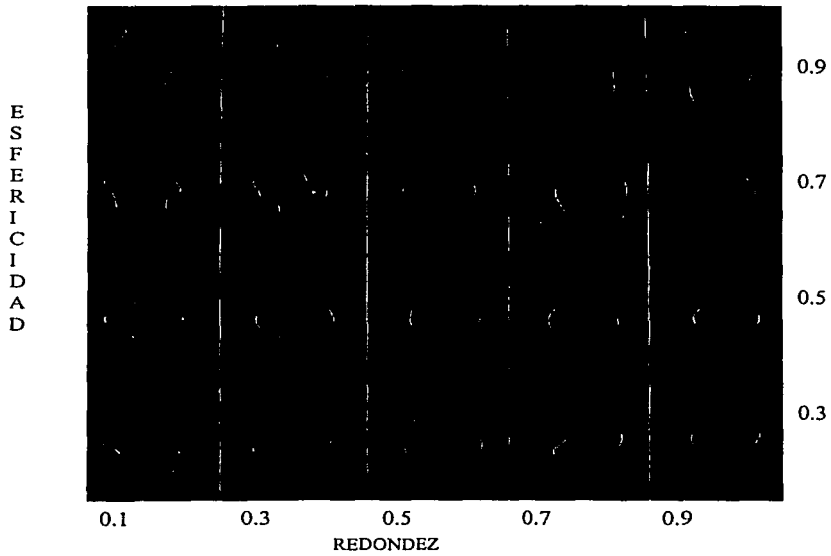


Fig. 2.6 Estimación visual de redondez y esfericidad (Krumbein y Sloss)

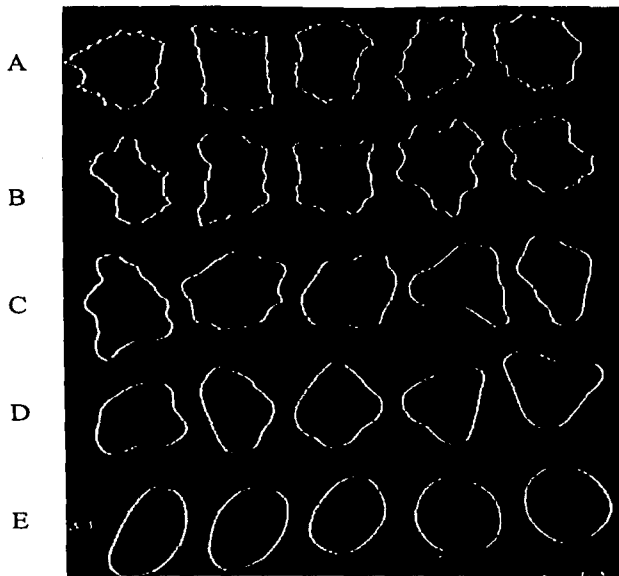


Fig. 2.7 Estimación visual de redondez (Schneiderhöhn)

A.- Anguloso

B.- Subanguloso

C.- Subredondeado

D.-Redondeado

E.- Bien redondeado

Mientras tanto el grado de redondez y esfericidad puede influir en el concreto, por ejemplo a mayor grado de redondez menor relación de vacíos, mientras que a un menor índice de este mismo parámetro reduce la capacidad de compactación (Neville, 1984).

La adherencia entre la pasta de cemento y un agregado generalmente aumenta a medida que las partículas cambian de lisas y redondeadas a rugosas y angulares, este incremento de adherencia se debe de considerar al seleccionar los agregados para los concretos en que sea importante la resistencia a la flexión o donde sea necesaria una alta resistencia a la compresión.

Las partículas planas y alargadas se deben evitar o al menos limitar aproximadamente a un 15% del peso total del agregado, tales partículas de agregados hacen necesario un incremento en el agua de mezclado, de esta forma se pueden afectar la resistencia del concreto, particularmente a la flexión, si no se ha conservado la relación agua - cemento. En la fig. 2.8 se muestran las formas básicas de las partículas.

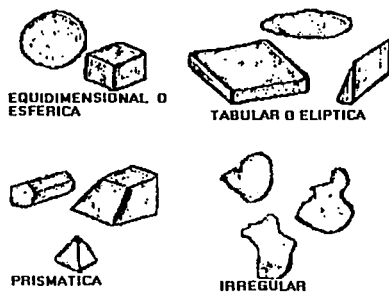


Fig. 2.8 Formas básicas de los agregados(Urbe; 1994)

#### II. 1. 4 Fragmentación y tipo de depósito

Como ya se mencionó, entre las características externas importantes de los agregados se incluye la forma, también dependiendo de su grado de redondez se le puede clasificar en bien redondeados, redondeados, subredondeados, subangulosos y angulosos.

Como es conocido el grado de redondez y tamaño de las partículas depende de factores como litología, tipo de intemperismo, agente de transporte, distancia de transporte y tiempo de intemperismo.

Dado que existen numerosas fuerzas y eventos de la naturaleza capaces de ocasionar la fragmentación de las rocas, los productos fragmentados también suelen presentar variadas características como consecuencia del distinto modo de actuar de las fuerzas y eventos causantes.

Esto, sumado a la diversidad de clases y tipos de rocas, da por resultado una amplia variedad de características de los agregados cuya fragmentación es de origen natural.

Algunas de las causas naturales que con mayor frecuencia producen la fragmentación de las rocas y la denominación que en ingeniería civil se da a los productos fragmentados, se indican a continuación.

1) Acción erosiva de las aguas pluviales combinada con la erosión hidráulica y mecánica producida por el acarreo de fragmentos a lo largo del curso de las corrientes de aguas superficiales.

Productos resultantes:

Aluviones que constan de cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas en depósitos fluviales y lacustres.

2) Acción expansiva del agua al congelarse, combinada con la erosión mecánica producida por el arrastre de fragmentos por medio de la nieve y el hielo en el cauce de los glaciares.

Productos resultantes:

Morrenas formadas por bloques, cantos rodados, gravas, arenas, limos y arcillas en depósitos glaciales.

3) Acción erosiva del agua de mar, combinada con la erosión mecánica producida por el arrastre y acarreo de fragmentos por medio del oleaje, las mareas y las corrientes marinas.

Productos resultantes:

Depósitos marinos como gravas, arenas, limos y arcillas depositados a lo largo de las costas, formando playas.

4) Acción desintegrante debida al intemperismo combinada con la erosión mecánica producida por el transporte de fragmentos por medio del viento.

Productos resultantes:

Depósitos eólicos de gravas, arenas finas, limos y arcillas que se depositan y acumulan formando dunas y médanos.

5) Fragmentación de la masa de roca fundida por efectos de las fuerzas que se generan en las erupciones volcánicas.

Productos resultantes:

Depósitos piroclásticos conformados por grandes fragmentos, bombas y bloques lapilli, ceniza, que se depositan en las zonas de influencia de los volcanes, de acuerdo con la magnitud de las erupciones.

Con respecto a los depósitos, a continuación se resumen, las condiciones locales de existencia y utilidad como agregados para concreto.

Los depósitos glaciales son prácticamente inexistentes en México, por que su situación geográfica no es propicia para la existencia de glaciares salvo en las laderas de ciertos volcanes cuyas cumbres tienen nieve perpetua.

Depósitos fluviales y lacustres: este tipo de depósito constituye la fuente más común de agregados naturales en México, excepto en las regiones como en la península de Yucatán y en las zonas desérticas y semidesérticas del norte y noroeste de la República. Los agregados naturales de esta fuente resultan especialmente útiles en general para todas aquellas obras que los tienen disponibles a distancias razonables. Aunque sus características granulométricas y de limpieza pueden ser muy variables de un depósito a otro, e incluso dentro del mismo depósito, mediante una acertada selección y un procesamiento adecuado, casi siempre es posible ponerlos en condiciones apropiadas para su utilización en el concreto. En circunstancias normales, se acostumbra dar preferencia al uso de estos agregados sobre los manufacturados, a menos que por requerimientos técnicos específicos de la obra o por razones económicas se justifique lo contrario.

Depósitos piroclásticos: la segunda fuente en importancia para la obtención de agregados naturales en el país, la representan los productos expulsados durante las erupciones volcánicas, (bloques, bombas, lapilli y cenizas). Por el carácter volcánico que prevalece en buena parte del territorio nacional, particularmente al occidente, centro y sur, es frecuente la existencia de este tipo de depósitos, si bien no siempre reúnen las características adecuadas (densidad, textura superficial y granulometría) para ser empleados como agregados del concreto de peso normal. No obstante estas limitaciones, hay ejemplos notables de utilización de agregados de esta naturaleza, como es el caso de las construcciones de concreto en la ciudad de México y zonas aledañas, en que tradicionalmente se han empleado gravas y arenas de depósitos piroclásticos del valle de México.

Depósitos marinos: no obstante la gran extensión de los litorales de la República Mexicana, los agregados naturales de origen marino se utilizan relativamente poco para la fabricación de concreto hidráulico por que llegan a presentar características inapropiadas como son: una distribución muy

errática sin grandes volúmenes bien definidos para su explotación; composición granulométrica inconveniente con tendencia a gravas muy grandes y/o arenas muy finas; alto contenido de cloruros cuya presencia es indeseable en el concreto reforzado; partículas con textura superficial demasiado lisa lo cual es desfavorable para su adhesión con la pasta de cemento.

Para salvar estos inconvenientes, hay ocasiones en que se someten a tratamiento estos agregados como son trituración parcial, lavado, mezcla con otros agregados a fin de aprovechar su disponibilidad, cuando ésta es económicamente favorable.

Depósitos eólicos: estos depósitos generalmente consisten en acumulaciones de arena muy fina en forma de lomeríos, en zonas desérticas (dunas) o cercanos a la costa (médanos). La utilidad de esta arena como agregados para concreto es bastante limitada debido a que es demasiado fina y suele estar muy contaminada con limo, arcilla y/o materia vegetal, a lo cual se suma su ubicación en sitios frecuentemente distantes de los centros de consumo.

### II. 1. 5 Agregados manufacturados

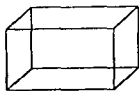
Las gravas producto de trituración, sin importar el origen de la roca, pertenecen al grupo de anguloso a subanguloso, aun cuando toda roca triturada presenta partículas planas y enlongadas.

Por otra parte, considerando la referencia de un cubo, las tres dimensiones que lo conforman (largo, ancho y espesor) así como las relaciones entre las mismas, darán como consecuencia los tres tipos básicos de forma geométrica de cualquier partícula.

Cuando las tres dimensiones son iguales, la partícula toma la forma de un cubo o una esfera.

Cuando el largo y el ancho tienen aproximadamente la misma dimensión difiriendo la dimensión del espesor la forma de la partícula será plana (laja).

Cuando el largo es muchas veces el tamaño del ancho y espesor y estos últimos de dimensión similar, se describe la partícula enlongada (aguja).



Equidimensional



Plana



Enlongada



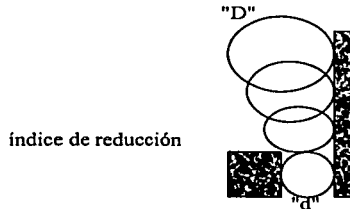
Como ya se dijo en el caso del concreto hidráulico, la presencia de cantidades excesivas de partículas planas o alargadas puede dar lugar a una mezcla poco trabajable, difícil de mezclar y de colar, esto se debe a que por su forma son partículas débiles, con mucha tendencia a fracturarse. En términos generales, la tendencia de buscar que la forma de las partículas sean lo más parecido a un cubo o a una esfera, es lograr concretos más manejables y con menores contracciones.

Las partículas con formas no equidimensionales tienden a darse cuando hay planos de intemperismo en rocas de origen natural, estos pueden incluir planos de estratificación en rocas sedimentarias y planos de foliación y lineación en rocas metamórficas.

Se ha visto que el tipo de maquinaria utilizado en las operaciones de trituración también influyen en la forma de la partícula, las máquinas más utilizadas en la trituración de partículas para la producción de concreto y otros usos emplean, los métodos mecánicos de reducción por compresión, impacto, desgaste y corte.

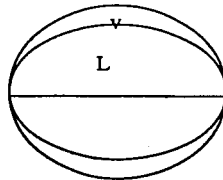
Dos de los conceptos que definen el comportamiento de las diferentes trituradoras son:

a) Índice de reducción, que se define como la relación entre el tamaño "D" del fragmento de la roca a la entrada de las trituradoras con el tamaño "d" del producto de la trituración a la salida



b) Coeficiente de forma, dado un fragmento de roca cuya dimensión mayor sea representada por "L" y sea "v" el volumen de dicho fragmento y "V" el volumen de la esfera cuyo diámetro sea "L", se define el coeficiente volumétrico de dicho fragmento como la relación:

$$CV = v / V$$



La operación de trituración se basa en impartir, al material que se va a triturar, tensiones superiores a su límite elástico que lleguen a provocar su fractura. Las máquinas empleadas para lograr este objetivo pueden ser clasificadas como:

- Máquinas que rompen la roca por compresión
- Máquinas que provocan la ruptura por impacto

Existen trituradoras que combinan ambos principios.

#### Trituración por compresión

En lo que al coeficiente volumétrico se refiere, cuando las trituradoras que funcionan por compresión han de triturar materiales de origen sedimentario o estratificado (calizas principalmente), el producto triturado tiende a salir en forma de laja que, aun cuando su espesor está limitado por la abertura de salida, las otras dimensiones ancho y largo, no tienen limitación práctica alguna, este tipo de trituradoras jamás pueden proporcionar partículas que se aproximen a la forma cúbica ideal.

Este tipo de trituradoras por compresión presenta poco desgaste y su empleo se favorece cuando trabaja con rocas intrusivas e hipabisales.

#### Trituración por impacto

En la trituración por impacto, los fragmentos de la roca se producen por el rápido golpe impartido por los elementos móviles sobre la misma, su forma de trabajo produce un alto porcentaje de finos.

La turbulencia que se provoca en la cámara de trituración da lugar a violentos choques entre las rocas y ayuda a eliminar aristas agudas y zonas débiles del producto triturado.

En este tipo de trituradoras existe poca posibilidad de dejar pasar lajas en materiales triturados así como de dejar una forma cúbica ideal al producto triturado.

En resumen, el valor del coeficiente volumétrico va a depender de las características de trituración y del material que va a ser triturado.

Tipo de trituradora	Índice de reducción	Coefficiente volumétrico
Por compresión	Bajo	Bajo: muchas lascas
Por impacto	Muy alto	Muy Bueno

Existen en el mercado normas para calcular el coeficiente volumétrico de grava como son:

Norma Británica B.S 812

Norma Francesa Anfor P 18301

Norma Mexicana NMA - C- s/n 1901

Esta última norma especifica que el coeficiente volumétrico apto para utilizarse en la construcción del concreto es de 0.27 (muy bueno).

Como ejemplo en México el IMCyC realizó el estudio del coeficiente volumétrico de dos agregados calcáreos de las compañías Apaxco y Adosa obteniendo los siguientes resultados.

Apaxco (Grava)	0.27 (diámetro de 19 mm)
Adosa (bco. la Palma)	0.22 (diámetro de 19 mm)

Se observa que la experiencia en el campo de la compañía Apaxco se refleja en la calidad de sus productos.

El siguiente esquema (fig.2.9) muestra cómo se relacionan los parámetros de angulosidad, redondez, manejabilidad y adherencia de los agregados en un concreto óptimo.

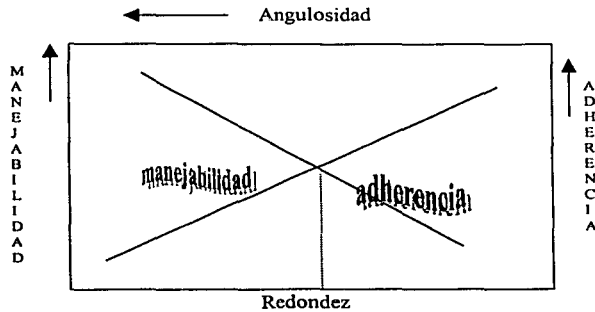


Fig.2.9 Relación propiedad y característica de un agregado

## II. 1. 6 Peso volumétrico y peso específico

### Peso volumétrico

También llamado peso unitario o densidad de masa de un agregado.

Es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado.

El peso volumétrico aproximado de un agregado usado en un concreto de peso normal varía de  $1,200 \text{ kg/m}^3$  a  $1,760 \text{ kg/m}^3$  (norma ASTM C-29).

### Peso específico

El peso específico (densidad relativa) de un agregado es la relación de su peso respecto al peso de un volumen absoluto igual de agua (agua desplazada por inmersión).

La mayoría de los agregados naturales utilizados en la industria de la construcción tienen densidades relativas entre 2.4 y 2.9 (norma ASTM C- 127, C-128).

El peso específico de una roca puede ser buen índice de su porosidad, pero no necesariamente de su calidad intrínseca, pues hay rocas con peso específico relativamente bajo que son aceptables como agregados para concreto siempre y cuando estén sanas y por el contrario hay rocas cuyo peso específico se considera normal y no obstante son inaceptables para esta aplicación por estar alteradas. De ahí que normalmente no se especifiquen límites de aceptación para el peso específico de los agregados.

Una característica importante en el concreto es su peso unitario, por que es índice de propiedades que a su vez influyen decisivamente en el empleo que se le da y dicha característica depende principalmente del peso específico de los agregados que lo integran.

Se indican cinco diferentes clases de concreto, con base en designaciones, pesos unitarios y usos común:

- a) Baja densidad, con peso unitario de  $300$  a  $800 \text{ kg/m}^3$  se usa comúnmente para aislamiento térmico y acústico, es un concreto de baja resistencia ( $< 70 \text{ kg/cm}^2$ )

- b) Ligero intermedio, con peso unitario de 800 a 1400 kg/m<sup>3</sup> de uso no estructural, es un concreto de baja resistencia (70 a 175 kg/cm<sup>2</sup>)
- c) Ligero estructural, con peso unitario de 1400 a 1900 kg/m<sup>3</sup> de uso estructural de mediana y alta resistencia (175 a 500 kg/cm<sup>2</sup>)
- d) Peso normal, con peso unitario de 2200 a 2250 kg/m<sup>3</sup> de uso variado, es un concreto de baja y alta resistencia (-70 a 1200 kg/cm<sup>2</sup>)
- e) Pesado, con peso unitario de 2600 a 5500 kg/m<sup>3</sup> se usa como blindaje contra radiaciones, contrapesos para puentes levadizos, con diversos requisitos de resistencia.

Como se ha mencionado, para producir el concreto denominado de peso normal (aquel cuyo peso unitario varía entre 2200 a 2250 kg/m<sup>3</sup>), deben emplearse agregados con peso específico comprendido entre 2.4 y 2.8 aproximadamente, que es el intervalo usual de las rocas que constituyen los agregados también llamados de peso normal.

De acuerdo a lo anterior, cuando el agregado manifiesta un peso específico que es menor a 2.4, esto suele ser motivo suficiente para dudar de su capacidad para producir concreto con peso normal.

## **II. 1. 7 Absorción y humedad superficial**

La cantidad de agua que contiene el agregado es muy importante, ya que afecta el contenido total de agua de la mezcla. Una porción de agregado húmedo hará más húmeda la mezcla de concreto y una mezcla demasiado húmeda produce un concreto débil.

Los agregados de grava generalmente están húmedos en el momento de la entrega, pero el exceso de agua puede escurrir fácilmente, el contenido de humedad no varía demasiado y por tanto, no ejerce gran efecto en la mezcla de concreto. De manera similar, los agregados gruesos de roca triturada, que casi siempre se entregan secos, no afectan mucho el contenido de agua de la mezcla de concreto.

La arena es la que más problemas causa por cambios en el contenido de agua.

La cantidad de agua utilizada en la mezcla de concreto se debe ajustar a las condiciones de humedad de los agregados de manera que cubra los requerimientos de agua.

Los áridos se ensayan de acuerdo a la norma ASTM C-70, C- 127, C- 128 y C-566

Existe un método para medir el contenido de humedad del agregado que es conocido como el método de la charola.

Ésta es quizá la manera más rápida y directa de medir el contenido de humedad de los agregados. Se necesita una charola o platillo de metal, algún aparato para calentar ligeramente, una varilla agitadora de vidrio o metal y una báscula para pesar hasta 2 kg. Una vez que se tiene el equipo hay que pesar 2kg de agregado grueso o 0.5kg de arena, después colocar la muestra en la charola o platillo de metal y calentarla ligeramente, agitándola con frecuencia con la varilla hasta que toda la humedad de la superficie de los fragmentos de agregados parezca haberse evaporado.

La superficie del agregado grueso está seca cuando desaparece su brillo; la superficie de la arena está seca cuando ésta fluye libremente.

Cuando el agregado esté seco, hay que volverlo a pesar inmediatamente; la diferencia entre el peso inicial (W) y el peso seco (Wd), es el peso de la humedad que estaba en la superficie de las partículas del agregado. Hay que dividir esta diferencia entre Wd, multiplicar el resultado por cien y se obtendrá el porcentaje del contenido de humedad por peso.

$$\% \text{ de humedad} = [(W - Wd) / Wd] \times 100$$

El agregado grueso y fino generalmente tienen niveles de absorción de 0.2% a 4% y de 0.2% a 2% respectivamente.

Si el contenido de agua de la mezcla de concreto no se mantiene constante, la resistencia a la compresión y la trabajabilidad varían de una revoltura a otra.

## **II. 1. 8 Resistencia al desgaste**

La resistencia al desgaste de un agregado a menudo se emplea como índice general de su calidad. Se utiliza la prueba de Los Ángeles (método del tambor giratorio, norma ASTM C-131, C-535).

Los agregados con altas pérdidas en estas pruebas se degeneran fácilmente y resulta difícil mantener su curva granulométrica intacta durante los procesos de manejo industrial (producción, transporte,

almacenamiento, mezclado) incluso en el caso de que la pérdida sea extrema, se pueden crear problemas por cambio de granulometría y formación de finos durante el mezclado del concreto o bien durante la colocación y compactación del producto en su condición de exposición final.

Los agregados de este tipo también pueden desintegrarse rápidamente cuando se exponen al tránsito.

Agregados constituidos por minerales de dureza baja (<3) o agregados cuyos cristales están débilmente unidos o cementados, como pueden ser algunas areniscas que se disgregan con facilidad, cuando se utilizan en la producción de concreto disminuyen rápidamente la calidad superficial de un elemento, piso o pavimento expuesto a la abrasión.

Dicha tasa de deterioro de los agregados está influida por la dureza, composición mineralógica, porosidad, textura superficial y sus discontinuidades, sólo la última no corresponde a la calidad física intrínseca del material, ya que se debe al origen y ambiente de depósito natural de los materiales.

Los agregados gruesos de calizas pueden tener una textura inicial de adhesión aceptable después del triturado (<0.5mm), pero debido a que están compuestos por minerales de dureza baja (calcita) son fácilmente pulidos; en condiciones de tránsito estos agregados no pueden mantener su textura por un largo periodo; en cambio, los agregados obtenidos de areniscas a menudo tienen esta textura y pueden mantenerse en condiciones aceptables de tránsito, esto se debe a que pueden estar constituidas esencialmente por granos de cuarzo.

Las rocas ígneas, tienen generalmente el potencial para proveer de una adecuada fricción a un pavimento.

El agregado ideal debe estar compuesto de un mineral duro (dureza de 6-7) y un mineral de dureza media (4-5), al tener dos componentes relativamente duros se puede obtener bajos niveles en el grado de desgaste del agregado.

## II. 1. 9 Limpieza y sanidad

La arcilla, el lodo o los finos presentes en el agregado por causa de un lavado insuficiente en el banco, producen concretos de resistencias bajas. Por la misma razón, tampoco debe permitirse que la basura contamine los agregados.

Los agregados de roca triturada muy rara vez contienen arcilla, lodo o finos, pero algunos particularmente las calizas trituradas, pueden contener cierta proporción arcillas por la naturaleza de su formación (calizas con micrita).

Al igual que con el agregado grueso, es importante que la arena esté limpia. Como prueba inicial, hay que frotar un poco de arena entre las palmas de las manos, si éstas permanecen limpias, probablemente la arena sea adecuada; si quedan manchadas, la arena puede ser inapropiada y debe efectuarse la prueba de la cantidad de finos presentes.

### Sanidad

Entre los atributos que permiten definir la calidad física de las rocas que constituyen los agregados, tiene mucha importancia la sanidad, que se define como la condición de un sólido que se halla libre de grietas, defectos (poroso) y fisuras características que le permiten soportar o no la acción agresiva a que se exponga (intemperismo), por lo que existe una estrecha relación entre la sanidad de los agregados con y la durabilidad del concreto en ciertas condiciones.

A manera de síntesis, en la tabla 2.1 se relacionan las principales características de los agregados y los correspondientes aspectos del comportamiento del concreto en que ejercen mayor influencia, tanto para el caso del concreto recién mezclado como ya endurecido.

### Muestreo de agregados

Lo más importante al tomar la muestra de agregado es que debe ser de tamaño apropiado y representativa. Si la muestra se va enviar a un laboratorio, las cantidades mínimas necesarias son:

Agregado fino	13 kg
Agregado grueso	
de diámetro máximo de 20 mm	25 kg
de diámetro máximo de 40 mm	50 kg



Para pruebas de granulometría las cantidades mínimas son:

Agregado fino 0.2 kg

De diámetro máximo de 20 mm 2.0 kg

Para lograr que la muestra sea la justa al reducir su tamaño, se debe aplicar el método del "cuarteo".

CARACTERÍSTICA	EFECTO	
	CONCRETO FRESCO	CONCRETE ENDURECIDO
Granulometría	Manejabilidad, requerimiento de agua	Resistencia mecánica, cambios volumétricos
Limpieza (materia orgánica, limos, arcillas)	Requerimiento de agua, contracción plástica	Durabilidad, cambios volumétricos
Densidad	Peso unitario	Peso unitario
Absorción y porosidad	Pérdida de revenimiento	Durabilidad, permeabilidad
Forma	Manejabilidad, requerimiento de agua	Resistencia mecánica

Tabla 2.1 Características y efectos de un agregado en el concreto

## II. 1. 10 Control de calidad de los agregados en un proyecto

Para tener un adecuado control de calidad es necesario concebirlo como una parte integral de cualquier proyecto.

Durante la etapa de exploración se deben localizar todas las posibles fuentes de agregados (fluvial o triturados) dentro de ellas se deberá seleccionar aquella que tenga en orden de importancia las siguientes condiciones:

- tipo de agregado
- características físicas dentro de los estándares
- economía
- volumen
- consideraciones de posibles variaciones de las características del banco

Para los efectos de explotación de cada banco se deberá tomar en cuenta los siguientes factores:

- equipo adecuado de explotación
- capacidad de producción y almacenaje
- condición de almacenamiento
- sistema de muestreo rutinario
- ensayos de laboratorio

El manejo de los agregados deberá impedir o reducir al mínimo cualquier posibilidad de contaminación que puede tener lugar durante el transporte y almacenaje o en el sitio de producción del concreto.

**Operación:** Si el control de calidad de los agregados se ha llevado correctamente en las etapas anteriores no se deberá tener ningún problema en el concreto fabricado en esta forma, pero esto no siempre ocurre así, entonces es necesario considerar:

- el sitio donde será colocado el concreto para determinar en lo mayor posible sustancias nocivas para los agregados
- pueden ocurrir cambios en los agregados una vez que se encuentran en el concreto y cambiar así las condiciones en el mismo

## **II. 1. 11 Actividad química de los agregados**

La combinación del cemento portland con el agua en el seno del concreto, genera un medio altamente alcalino en el que se hallan permanentemente inmersas las partículas de rocas que constituyen los agregados. En estas condiciones, algunas rocas reaccionan químicamente para dar lugar a la formación de un gel, que al absorber agua se expande y crea presiones capaces de desintegrar el concreto.

Se conocen actualmente tres modalidades de la reacción álcali - agregado: 1) álcali - sílice, 2) álcali - silicato y 3) álcali - carbonato.

La primera reacción es la más frecuente; en ella participan agregados de uso común que contienen sílice amorfa y criptocristalina principalmente. La segunda reacción es poco conocida, pues

involucra particularmente rocas que contienen vermiculita. En la tercera reacción, cuya frecuencia es intermedia, son participes algunas calizas, las cuales sufren un proceso de dolomitización por efecto de los álcalis.

En el siguiente capítulo se describirán las reacciones álcali - sílice y álcali - carbonato y principalmente la primera por ser la más común y de mayor riesgo.

#### Materiales perjudiciales

Dentro de las sustancias perjudiciales que pueden estar presentes en los agregados, se incluyen las impurezas orgánicas, limo, arcilla, óxidos de hierro y carbón.

En la tabla 2.2 se presenta la relación de algunos materiales nocivos en los agregados y su efecto en el concreto

Sustancia	Efecto en el concreto
Impurezas orgánicas	Afectan el fraguado y el endurecimiento
Material más fino que la malla N° 200	Afectan la adherencia, aumenta la cantidad de agua requerida
Carbón, lignito y otros materiales ligeros	Afectan la durabilidad, puede causar manchas
Partículas suaves	Afectan la durabilidad
Terrones de arcilla y partículas deleznales	Afectan la trabajabilidad y durabilidad
Agregados reactivos con los álcalis	Expansión anormal, agrietamiento, erupciones

Tabla 2.2 Efecto de una sustancia en el concreto

Además como ya se mencionó, ciertas rocas y minerales como el cuarzo deformado y dolomitas son reactivas con el álcalis del cemento.

De las sustancias reactivas con el álcali del cemento consideradas por la Comisión Federal de Electricidad se tienen:

Andesitas	Ópalo
Dacitas	Pizarras opalinas
Riolitas	Gneiss granítico

Material Volcánico  
 Vidrio ácido  
 Grauvacas  
 Argilitas  
 Cristobalita  
 Tridimita  
 Calcedonia

Filitas  
 Cuarzitas  
 Esquistos cuarzofeldespáticos  
 Cuarzo deformado  
 Traquitas

Varias de las rocas enlistadas reaccionan muy lentamente y bien pueden no mostrar evidencia de un grado nocivo de reactividad hasta que el concreto tiene más de 20 años de edad.

Sustancias reactivas en la reacción álcali - carbonato

Dolomitas  
 Calizas dolomíticas

Los agregados son potencialmente dañinos si contienen compuestos que reaccionen químicamente con el cemento portland y que produzcan: (1) cambios significativos en el volumen de la pasta o del agregado o de ambos; (2) interfieran en la hidratación normal del cemento. En la tabla 2.3 se dan las características comunes de los principales tipos de rocas utilizadas como agregados para concreto.

Roca	Textura superficial	Porosidad	Discontinuidades	Samidad	Dureza
Riolitas	Lisa	Nula - baja	Escasas	Buena	(6 - 7)
Andesita	Áspera, cristalina	Baja	Fracturas	Buena	(6)
Basalto	Áspera, porosa	Baja - alta	Fracturas	Buena	(6)
Diorita	Áspera, cristalina	Nula - baja	Fracturas	Buena	(5.5 - 6)
Granito	Cristalina	Nula - baja	Crucero	De mala a buena	(3 - 6.5)
Toba riolítica	Áspera, terrosa a lisa	Nula - alta	Fracturas y pseudoestratificación	De mala a buena	(4 - 7)
Caliza	Lisa, áspera, porosa, cristalina, terrosa	Alta - baja	Estratificación y fracturas	De mala a buena	(3 - 4)
Mármol	Lisa, cristalina	Baja	Crucero	Regular	(3 - 4)
Arenisca	Áspera, granular	Alta - baja	Estratificación	De mala a buena	(4 - 7)
Aluvi6n	Lisa, áspera	Alta	No presenta	De mala a buena	(4 - 7)

Tabla 2.3 Características comunes de los principales tipos de rocas utilizadas como agregados para concreto

Para definir la composición mineralógica y el origen geológico de las rocas que integran los agregados y para hacer una estimación preliminar de su calidad físico-química, se acostumbra realizar el examen petrográfico (NOM C-256 / ASTM C 259). Con base en ésta se citan a continuación las características de los principales minerales que de ordinario se hallan presentes en las rocas que son fuente de agregados y se hace un resumen de la composición mineralógica y otras características comunes de dichas rocas.

#### Minerales de sílice

Variedades: Cuarzo, ópalo, calcedonia, tridimita y cristobalita.

El ópalo, la calcedonia, tridimita, cristobalita y algunas formas de cuarzo deformado e intensamente fracturado, se consideran como reactivos con los álcalis en el concreto.

#### Feldespatos

Variedades: Feldespatos potásicos (ortoclasa, sanidino, microclina), feldespatos sódico - calcicos (albita, andesina, oligoclasa, labradorita, bitownita y anortita).

Constituyen el grupo más numeroso de minerales que componen las rocas de la corteza terrestre.

#### Ferromagnesianos

Variedades: Anfíbolos, piroxenos, olivino, biotita.

Son muy comunes en rocas de todos los orígenes y en las gravas y arenas naturales.

#### Minerales micáceos

Variedades: muscovita, biotita, cloritas.

Son frecuentes en rocas de todo tipo y se presentan trazas en gravas y arenas naturales.

#### Minerales arcillosos

Variedades: Illita, caolín, montmorrillonita.

Son indeseables en los agregados por que se desintegran en contacto con agua y por que provocan cambios volumétricos en el concreto.

#### Zeolitas

Variedades: heulandita, natrolita, laumontita.

Son indeseables como agregados en el concreto: las dos primeras por que pueden liberar álcalis y la última por que manifiesta cambios volumétricos.

### Carbonatos

Variedades: Calcita, dolomita.

Algunas dolomías arcillosas son reactivas con los álcalis en el concreto.

### Sulfatos

Variedades: Yeso, anhídrita.

Representan riesgo de ataque por sulfatos al concreto.

### Sulfuros de hierro

Variedades: Pirita, marcasita, pirrotita.

Pueden manchar y producir expansiones puntuales (picaduras) en el concreto.

### Óxidos de hierro (anhídros e hidratados)

Magnetita, hematita, limonita, goetita, ilmenita.

Son minerales accesorios de muchas rocas: Algunas rocas que los contienen en abundancia se utilizan como agregados para elaborar concreto pesado.

### Granitos (s.l.), sienitas, gabros y peridotitas

En forma general no reaccionan con los álcalis del cemento.

### Riolitas, dacitas, andesitas y traquitas

Las texturas porfídicas son comunes en las rocas de este grupo. Cuando tienen textura microcristalina o contienen vidrio de composición ácida se consideran rocas reactivas con los álcalis en el concreto.

### Basalto

Normalmente no es reactivo con los álcalis, pero excepcionalmente puede serlo si contiene vidrio ácido.

### Obsidiana, pumicita, escoria basáltica

En forma general no reaccionan con los álcalis del cemento.

### Perlita

Expandida por calentamiento se utiliza como agregado ligero.

En general todo el vidrio volcánico ácido, se considera reactivo con los álcalis en el concreto.

#### Conglomerados y areniscas

Son de composición variable, el cementante puede contener cuarzo, ópalo, calcita, dolomita, óxidos de hierro y/o matriz arcillosa. Dependiendo entonces del porcentaje de sus componentes, se consideran como reactivas o inocuas en la elaboración del concreto.

#### Lutitas y limolitas

Estas rocas son indeseables en los agregados por que se degradan en contacto con el agua y por que incrementan la contracción por secado del concreto. Ciertas limolitas que contienen cuarzo pueden ser reactivas con los álcalis en el concreto.

#### Rocas carbonatadas (calizas, dolomías, margas)

La calidad física de las calizas es muy variable, desde muy mala hasta muy buena calidad en términos generales, las calizas con dolomita pueden ser reactivas con los álcalis en el concreto, mientras que las margas son inadecuadas como agregado por su relativa suavidad.

#### Pedernal

Es considerado como reactivo con los álcalis del concreto, aún en baja proporción dentro de los agregados del concreto.

#### Pizarra y filita

No es deseable como agregado por que se fragmenta en forma tabular o laminar.

#### Esquistos

Inconveniente como agregado para concreto por su textura foliada.

#### Gneiss

Pueden reaccionar con los álcalis del concreto

Aunque es posible encontrar todas las clases de rocas enlistadas, en México como tendencia general predominan las de origen ígneo, particularmente en toda la porción occidental del país; en segundo término se hallan las rocas sedimentarias que abundan en las regiones centro - norte, oriente y sur - sudeste

De acuerdo a Melvin (et al 1984), un estudio petrográfico deberá considerarse como ayuda preventiva en el empleo de agregados para concreto. Esta información otorga al técnico en concreto un panorama generalizado de los agregados, permitiéndole así un juicio certero sobre el mismo; en el caso de diagnosticar alguna característica que pueda provocar problemas, permite la elección de alguna prueba para cuantificar la magnitud del problema, de tal forma que le permita rechazar el agregado en cuestión o bien darle el uso más adecuado.

Características como porosidad, fisuramiento, superficie textural, presencia de material arcilloso y sustancias deletéreas son identificables con cierta facilidad por medio de un estudio petrográfico.

Con las características explicadas de los agregados en este capítulo, se puede satisfacer de forma conveniente los parámetros establecidos en la norma ASTM - C- 856 en su apartado de agregados, la cual sugiere las siguientes observaciones:

#### Agregado grueso

##### Composición

Máxima dimensión en pulgadas o milímetros

##### Tipo

- 1 Grava
- 2 Roca fracturada
- 3 Combinación de 1 y 2
- 4 Otro
- 5 Combinación de 1,2 y 4

Si el tipo es homogéneo o heterogéneo

##### Litología

Porcentaje mayor a 20, 30, 40, o 50% del total

##### Fábrica:

- Redondez
- Distribución
- Forma
- Empaque
- Granulometría
- Paralelismo entre las partículas



## **Agregado fino**

### **Tipo**

- 1 Arena natural
- 2 Arena manufacturada
- 3 Mezcla
- 4 Otro
- 5 Combinación ente 1, 2 y 4

Si el tipo es homogéneo o heterogéneo

### **Fábrica**

- Distribución
- Redondez
- Forma
- Granulometría
- Orientación preferencial

En ambos casos establecer la variación de tamaños y el tamaño promedio del agregado grueso y fino, o bien definir si existe una deficiencia en el tamaño de agregado establecido.

Se debe reportar si existen o no fracturas o rompimientos en los bordes de los agregados y el contacto entre estos y la pasta cementante.

De igual forma se debe establecer si los agregados presentes se consideran como materiales reactivos o inocuos en alguna reacción tipo sílice-agregado.

En la figura 2.10 se resumen las actividades y decisiones correspondientes en la etapa inicial del proceso tendiente a identificar y verificar el carácter reactivo con los álcalis de un agregado propuesto para la fabricación de concreto de acuerdo con la Comisión federal de Electricidad.

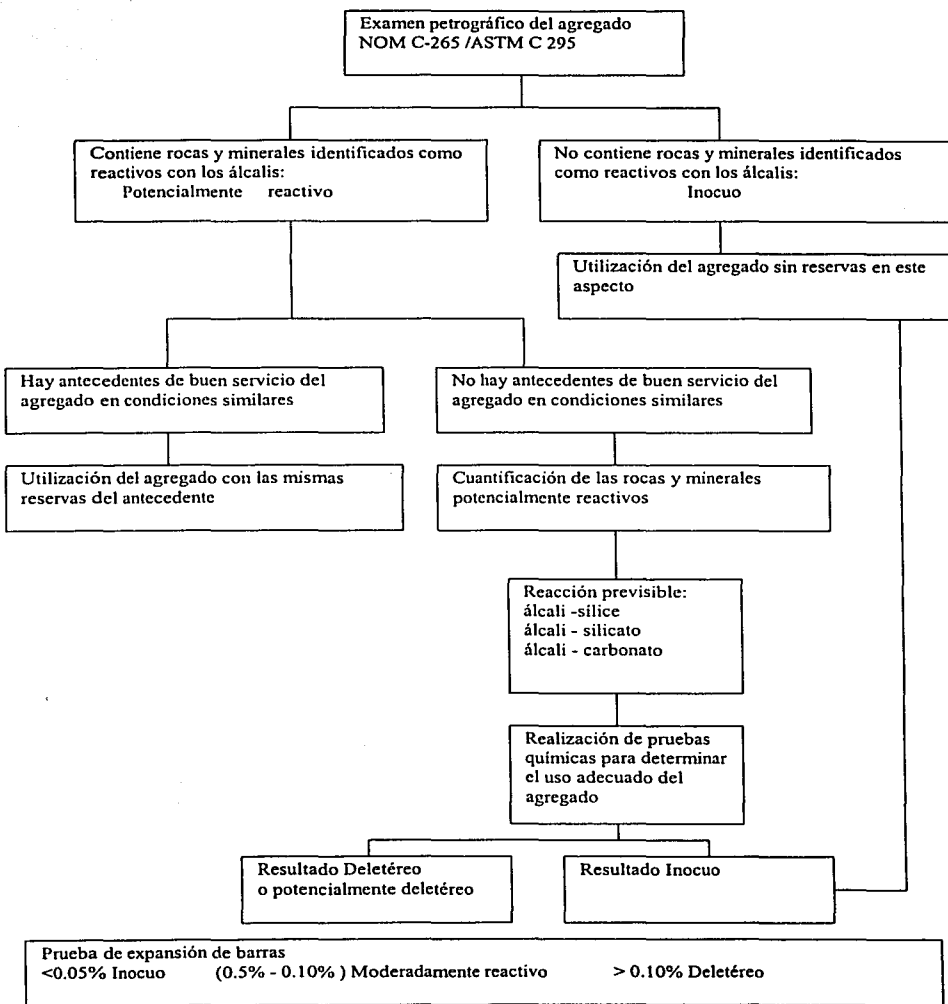


Fig. 2.10 Algoritmo en la examinación petrográfica del agregado para el concreto (CFE)

## **CAPITULO III**

### **Agua, poros y concretos especiales**

#### **III. 1 Agua de mezclado para el concreto**

Como componente del concreto convencional, el agua suele representar aproximadamente entre 10 y 25 por ciento del volumen del concreto recién mezclado, lo que depende del tamaño máximo del agregado que se utilice y del revenimiento que se requiera. Esto le concede una influencia importante a la calidad del agua de mezclado para el comportamiento y las propiedades del concreto, pues cualquier sustancia dañina que contenga, aún en proporciones reducidas puede tener efectos adversos significativos en el concreto.

En relación con su empleo en el concreto, el agua tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de las mezclas y como medio de curado de las estructuras recién construidas. En el primer caso, es de uso interno como agua de mezclado, y en el segundo, se emplea exteriormente cuando el concreto se cura con agua.

Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga un sabor u olor pronunciado se puede utilizar para producir concreto.

La tabla 3.1 muestra seis análisis típicos de suministros de agua y de agua de mar. Estas aguas semejan en su composición las de los suministros de agua doméstica en los Estados Unidos de Norte América y Canadá. Una fuente de abastecimiento cuyo análisis sea parecido a alguno de las aguas que aparecen en la tabla será probablemente satisfactoria para ser utilizada en la elaboración del concreto.

Si el agua no procede de una fuente de suministro de agua potable, se puede juzgar su capacidad como agua para concreto mediante los requisitos físicos - químicos contenidos en la Norma Oficial Mexicana NOM C - 122, recomendados especialmente para aguas que no son potables

Los efectos indeseables que el agua de mezclado de calidad inadecuada puede producir en el concreto, son a corto, mediano y largo plazo. Los efectos a corto plazo normalmente se relacionan con el tiempo de fraguado y las resistencias iniciales, los de mediano plazo con las resistencias

posteriores y los de largo plazo pueden consistir en el ataque de sulfatos y la corrosión del acero de refuerzo.

Las impurezas excesivas en el agua no sólo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto sino también pueden ser causa de florescencia, manchado, corrosión del refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad.

	1	2	3	4	5	6	Agua de Mar
SiO <sub>2</sub>	2.4	0.0	6.5	9.4	22.0	3.0	—
Fe	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	—
Ca	5.8	15.3	29.5	96.0	3.0	1.3	50-480
Mg	1.4	5.5	7.6	27.0	2.4	0.3	260-1410
Na	1.7	16.1	2.3	183.0	215.0	1.4	2190-12200
K	0.7	0.0	1.6	18.0	9.8	0.2	70-550
HCO <sub>3</sub>	14.0	35.8	122.0	334.0	549.0	4.1	—
SO <sub>4</sub>	9.7	59.9	5.3	121.0	11.0	2.6	580-2810
Cl	2.0	3.0	1.4	280.0	22.0	1.0	3960-20000
NO <sub>3</sub>	0.5	0.0	1.6	0.2	0.5	0.0	—
Sólidos disueltos	31.0	250.0	125.0	983.0	564.0	19.0	35000

Tabla 3.1 Análisis típicos de suministros de agua a ciudades y de agua de mar (partes por millón).

El agua que contiene menos de 2,000 ppm de sólidos disueltos totales generalmente puede ser utilizada de manera satisfactoria para elaborar el concreto, el agua que contiene más de 2,000 ppm de sólidos disueltos deberá ser ensayada para investigar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado.

En lo que se refiere a las características fisicoquímicas del agua para concreto, no parece haber consenso general en cuanto a las limitaciones que deben imponerse a las sustancias e impurezas cuya presencia es relativamente frecuente, como puede ser el caso de algunas sales inorgánicas (cloruros, sulfatos), sólidos en suspensión, materia orgánica, dióxido de carbono disuelto etc., Sin embargo, en lo que sí parece haber acuerdo es en que no debe tolerarse la presencia de sustancias que son francamente dañinas, como son grasas, aceites, azúcares y ácidos.

### III. 2 Porosidad en el concreto

Las operaciones de mezclado y colocación dan lugar a que se atrape aire, lo que aumentará inevitablemente los espacios vacíos en el concreto endurecido, y permite la creación de tres clases de poros en el concreto: poros de aire, de agua y microporos (poros capilares).

#### Poros capilares

Para dosificar el concreto se necesita agua en un 40% a 80% del peso del cemento, sin embargo para reacciones químicas de fraguado del cemento es suficiente de un 18% a un 25%.

Para que el cemento se moje formando una masa plástica se precisa del 25% al 30% de su peso y para mojar los agregados es necesario elevar la cantidad indicada, para la adecuada preparación del concreto.

Después de la colocación del concreto, las partículas de cemento, por hidrólisis se recubren de un gel y se soldan entre sí, el agua sobrante de la reacción química en forma de gotas se eleva - por su menor peso- hacia superficie libre del concreto, con la exudación correspondiente, da lugar a un extenso sistema de canales capilares, cuya finura y cantidad dependen en gran parte del excedente de agua de mezclado.

Entre las diversas clases de poros, los capilares son los que ocupan mayor volumen; el mismo es del 8% al 15% del volumen total del concreto.

En las dosificaciones pobres (15 a 200 gr/cm<sup>2</sup>) el volumen de poros capilares es de 1.9 a 1.3 veces mayor que el volumen sólido de la matriz (cemento - agua). En dosificaciones más altas, los poros capilares ocuparán un espacio menor. En dosificaciones de 250 gr/cm<sup>2</sup> son iguales ambas partidas. Los poros capilares son prácticamente invisibles, por ser muy finos y están comunicados unos con otros formando el sistema de canales del concreto, en los que puede moverse el agua.

#### Poros de aire

Se presentan durante la fabricación del concreto, como la tensión superficial del agua es muy grande, estas burbujas de aire no son estables, se reúnen formando grandes burbujas, que se deshacen al preparar y colocar el concreto, se hallan en comunicación con los poros capilares, un

concreto plástico normal puede contener de 1% a 3% de poros de aire cuyo diámetro en algunos casos llega hasta 10mm.

En consecuencia, su importancia disminuye al aumentar la docilidad del concreto y al emplear medios de vibración o colocación adecuados.

#### Poros de agua

Son acumulaciones que se forman principalmente durante la eliminación del agua sobrante de mezclado, pueden encontrarse especialmente debajo de los agregados grandes y planos; afectan sobre todo la resistencia del concreto al congelamiento, estos elementos influyen grandemente en la permeabilidad del concreto.

En un reporte petrográfico se debe indicar la distribución, forma y porcentaje de los poros observados.

### **III. 3 Relación agua/cemento (w/c)**

La relación agua/cemento es sencillamente el peso del agua, dividido entre el peso del cemento.

El más sencillo e importante parámetro en términos de durabilidad y calidad del concreto es la relación de agua con respecto al volumen de cemento. La baja calidad en un concreto joven y el análisis de un concreto deteriorado se puede determinar con la relación agua/cemento (w/c).

Actualmente no existe un método directo que pueda determinar la relación agua/cemento en concreto endurecido, pero una alternativa es la de estimar la relación w/c por medio del análisis de una sección delgada impregnada con resina epóxica fluorescente. El método de preparación de muestras y fenómenos ópticos relacionados se reportan en el Scandinavian Estándar NT Build 361.

Con este método es posible determinar la relación w/c de concretos fabricados con cemento portland.

El análisis de la sección delgada es con un microscopio petrográfico que usa la combinación de un filtro azul y un filtro amarillo (fig.3.1).

Con el método de luz fluorescente por medio de resina fluorescente los poros y fracturas se observan de color amarillo, mientras tanto la pasta se observa en color verde y los áridos se presentan de color negro. Ahora bien, la pasta presenta diferentes tonalidades del color verde dependiendo de la porosidad capilar del concreto.

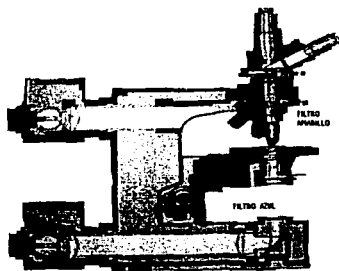
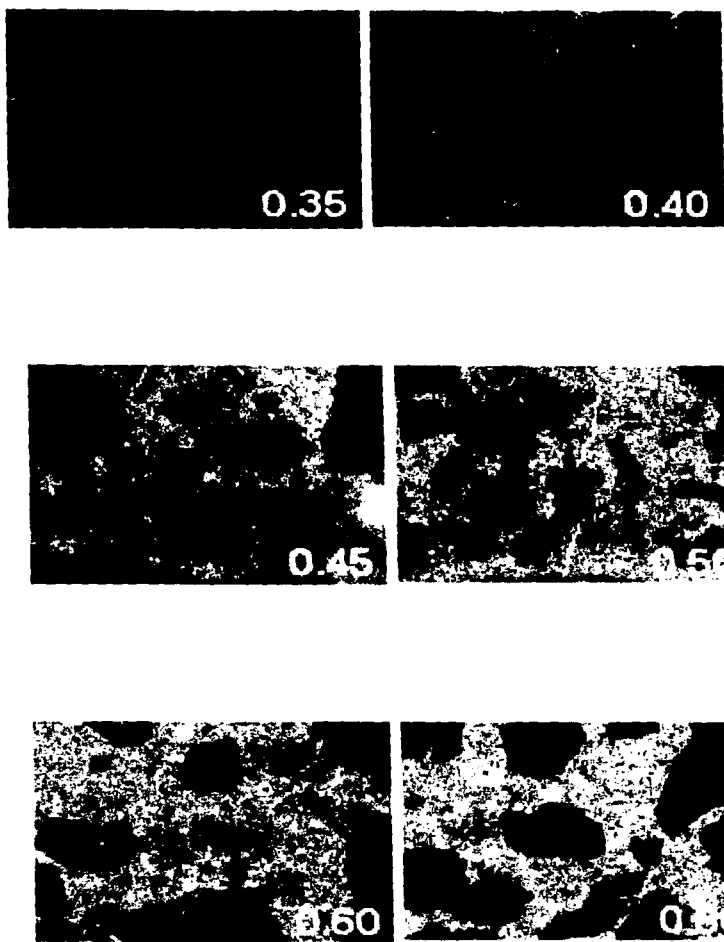


Fig. 3.1 Microscopio petrográfico con filtro azul y amarillo para fluorescencia

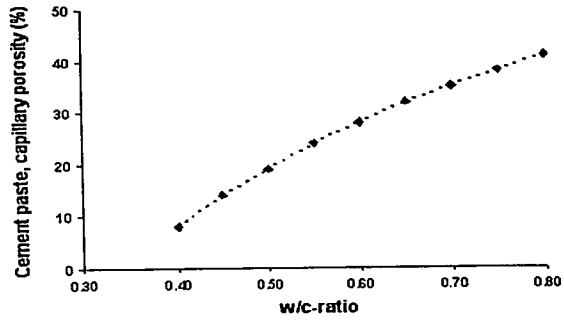
Por ejemplo en una relación baja de  $w/c$  se observa la pasta de color verde oscuro (baja intensidad de fluorescencia), mientras que en una relación alta de  $w/c$  la pasta presenta un color verde claro (alta intensidad de fluorescencia). La intensidad de fluorescencia idónea se puede comparar utilizando concretos con relación  $w/c$  estándar. El cambio de intensidad del color verde de acuerdo a la relación  $w/c$  de 0.35 a 0.80 son ilustradas en la fotografía 3.1, tomadas del Scandinavian Stándar NT B 361 (SS NT B 361).

Es importante recordar que el cambio de tonalidad depende de la porosidad capilar, la cual está en función de la relación  $w/c$ , de tal forma que con  $w/c$  de 0.40 a 0.45 se incrementa la porosidad capilar, mientras que con  $w/c$  de 0.6 a 0.65 se tiene 14% de incremento en la porosidad capilar (gráfica 3.1 y 3.1a).

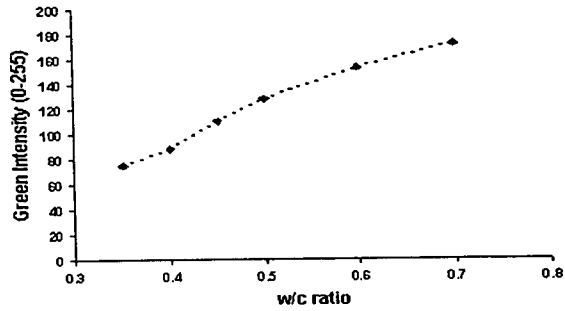


Fotografía 3.1; Fotomicrografías que muestran la intensidad de verde con respecto a la relación w/c al ser observadas con filtro amarillo (SS NT B 361).





Gráfica 3.1 Relación porosidad vs. w/c (SS NT B361)



Gráfica 3.1a Relación porosidad vs. w/c (SS NT B361)

Las relaciones de agua/cemento máximas para diversas condiciones de exposición son las siguientes:

Concreto expuesto a agua dulce	0.50
Concreto expuesto a agua salobre o de mar	0.45
Concreto expuesto a congelación:	
- guarniciones o cunetas	0.45
Concreto expuesto a la corrosión	0.40

### III. 4 Proporciones de la mezcla y propiedades del concreto

A continuación se dan dos tablas (3.1 y 3.2) en las que se muestran las proporciones y propiedades adecuadas o idóneas par un concreto elaborado en forma normal y otro con aire incluido.

#### Concreto normal

Mezcla	Propiedades
256 kg/cm <sup>3</sup> de cemento tipo I o II	11.5 cm de revenimiento
134 litros de agua	1.4% de contenido de aire
780 kg de agregado grueso (1" máximo)	2400 kg/cm <sup>3</sup>
644 kg de agregado fino	30°C de temperatura
	$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$
	0.52 relación agua/cemento

Tabla 3.1 Propiedades de un concreto normal (IMCYC)

#### Concreto con aire incluido

Mezcla	Propiedades
256 kg/cm <sup>3</sup> de cemento tipo I o II	14 cm de revenimiento
121 litros de agua	3.5% de contenido de aire
780 kg de agregado grueso (1" máximo)	2360 kg/cm <sup>3</sup> de peso unitario
622 kg de agregado fino	30°C de temperatura
120 gr/cwt reductor de agua tipo A	$f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$
24 gr/cwt agente inclusor de aire	0.47 de relación agua/cemento

Tabla 8 Propiedades de un concreto con aire incluido (IMCYC)

### **III. 5 Concretos especiales**

En ocasiones es necesario fabricar concretos que cumplan con requisitos o características especiales, ya sea que posean mayor resistencia, menor densidad o simplemente mayor fluidez, por lo cual las proporciones de mezcla agua/cemento o tipo de agregado deben adecuarse para cumplir con las características deseadas y éste es el caso de los concretos especiales.

#### **III. 5. 1 Concretos de alto desempeño**

El término Concreto de Alto Desempeño [CAD] (en inglés High Performance Concrete - HPC) fue usado por primera vez por Mehta y Ajtcin para describir mezclas de concreto que poseían tres características que son: muy buena trabajabilidad, alta resistencia y gran durabilidad.

El concreto de alta resistencia ( $> 420 \text{ kg/cm}^2$ ) se usó por primera vez en edificios de marcos de concreto reforzado con 30 o más pisos.

La diferencia entre un concreto de alto desempeño y el concreto usual radica: primero en que el concreto de alto desempeño con frecuencia contiene humo de sílice, mientras que el concreto ordinario por lo regular no lo incluye.

El concreto de alto desempeño generalmente, aunque no siempre, contiene ceniza volante o escoria de alto horno (granulada y molida) o ambos materiales. Este agregado debe ser escogido cuidadosamente y tiene un tamaño máximo más pequeño que en el caso del concreto ordinario; el tamaño máximo es por lo regular de 10 a 14 mm. Existen dos razones para esto: primero con un tamaño máximo más pequeño, los esfuerzos diferenciales en la interfase de la pasta, agregado - cemento (lo que podría llevar al microfracturamiento) son menores. En segundo lugar, las partículas del agregado más pequeño son más fuertes que las grandes, esto se debe al hecho de que la trituración de la roca remueve las imperfecciones más grandes, que son las que controlan la resistencia.

Puede ser útil dar una idea de las proporciones típicas de la mezcla de concreto de alto desempeño. Usualmente, se emplea cemento tipo I, pero si se requiere de alta resistencia temprana puede utilizarse el cemento tipo III, el contenido total de los materiales cementantes es muy alto (400 a

550 kg/m<sup>3</sup>), la masa del humo de sílice cuando se utiliza representa de 5 a 15% de la masa total del material cementante, siendo 10% lo más típico.

El valor de la relación de la masa de agua con la masa total del material se ubica generalmente entre 0.35 y 0.25.

En la práctica las proporciones de la mezcla varían, dependiendo de las propiedades de los ingredientes individuales y de las propiedades deseadas del concreto en servicio.

Como ya se dijo, el agregado no debe tener un tamaño máximo muy grande, el agregado grueso tiene que tener cierto número de características: debe ser fuerte y estar absolutamente limpio, es decir libre de arcilla o polvo adherido, no debe contener sílice reactivo y tiene que ser equidimensional en su forma, con muy pocas excepciones se utiliza agregado triturado. En cuanto al agregado fino, debe tener una granulometría en un módulo de finura de 2.7 a 3.0.

En la tabla 3.3 se muestran los detalles de algunas mezclas de concreto de alto desempeño

kg /m <sup>3</sup>	E. U.	CANADA	FRANCIA
Cemento portland	513	163	450
Humo de sílice	43	54	45
Ceniza volante	--	--	--
Escoria	--	325	--
Agregado fino	685	730	736
Agregado grueso	1080	1100	1118
Agua total	139	136	143
Relación W/C	0.25	0.25	0.29

Tabla 3.3 Composición de un concreto de alto desempeño (IMCYC)

La consideración más importante para utilizar ceniza volante y escoria en la fabricación de concreto radica en que estos materiales generalmente son más baratos que el cemento portland, se hidratan o reaccionan químicamente un poco más tarde que aquél.

### III. 5. 2 Concreto ligero (Perlita expandida)

Perlita (Carlita) es el término petrográfico para una roca sílica definida como vidrio volcánico, se distingue de otros vidrios debido a que cuando se calienta a ciertas temperaturas, se puede expandir de 4 a 20 veces de su volumen original; esta expansión se debe a que su estructura molecular tiene en forma combinada del 2 a 16 % de agua, en su estado natural, la cual pierde peso por evaporación en el proceso de calentamiento.

Cuando se calienta a una temperatura que puede variar de 650 a 750 °C se infla como las palomitas de maíz creando incontables y pequeños globos o celdillas en las partículas calentadas. Estas celdillas cerradas incrementan el volumen pero el peso específico baja, al igual que provoca un aislamiento térmico, durante el proceso de "inflado", la perlita adquiere una de las características que más la distingue, su color blanco. El color de algunas perlitas expandidas varía de un blanco nieve a un blanco grisáceo, pero el de la carlita es un blanco nieve.

La perlita se puede producir tan ligera como de 35 a 70 kg/m<sup>3</sup>, sin embargo los agregados de perlita para concretos ligeros (foto 3.2) tienen una variante de densidad de 120 a 250 kg/m<sup>3</sup>.

Debido a su mayor área de superficie por m<sup>3</sup>, la perlita requiere más agua en su mezclado, esta agua retenida superficialmente seca rápidamente, en consecuencia los concretos hechos con perlita requieren un contenido más bajo de agua que redundan en una mayor resistencia y en su fraguado más rápido.

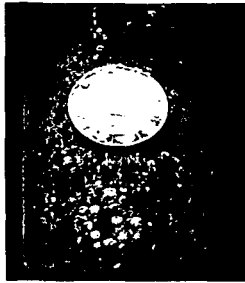
De las principales aplicaciones que tiene este producto como agregado en la industria de la construcción son:

- Concreto estructural ligero, aislante térmico y acústico
- Concreto para muros divisorios
- Recubrimiento de estructuras metálicas contra incendios

En el Distrito Federal la carlita como agregado ha sido utilizado en algunas obras como son:

- Torre Latinoamericana
- Palacio de los Deportes

- Edificio de Mexicana de Aviación
- Alberca Olímpica
- Hotel de México.



Fotografía 3.2 Núcleo de concreto ligero donde se observa perlita

### III. 5. 3 Suelo - Cemento

El suelo - cemento se define en terminología del cemento y del concreto, como una mezcla de suelo y cantidades medidas de cemento portland y agua, compactado con una gran densidad. Adicionalmente se puede definir como la combinación, compactación y curado de una mezcla de suelo / agregado, cemento portland, posiblemente aditivos y agua, para formar un material endurecido, con propiedades técnicas específicas.

El suelo - cemento difiere del concreto del cemento portland en varios aspectos. Uno de los más significativos es la manera en que los agregados o las partículas del suelo se mantienen unidas, una mezcla de concreto contiene la pasta suficiente para adherirse en una capa al área superficial de todos los agregados y llenar sus vacíos. En las mezclas de suelo - cemento la pasta es insuficiente para llenar dichos vacíos y formar una capa sobre todas las partículas, lo que da como resultado una matriz de cemento que aglomera a los nódulos de material no cementado (fig. 3.2).

Otra diferencia es el tipo de granulometría de los agregados aceptables para cada material. las especificaciones para el concreto requiere de una combinación bien definida de agregados gruesos y finos, generalmente con no más del 2% de material que pasa a través de la malla N° 200, mientras que casi cualquier tipo inorgánico de suelo es adecuado para el suelo - cemento, el contenido de

finos típicamente varía del 5 al 35%. Materiales como escoria, cenizas, conchas y superficies asfálticas viejas también se han incorporado con éxito a las mezclas de suelo - cemento.

La aplicación principal de suelo - cemento es como material de base que sirva de capa de apoyo a los pavimentos asfálticos y de concreto y a estacionamientos, así como protección de taludes.

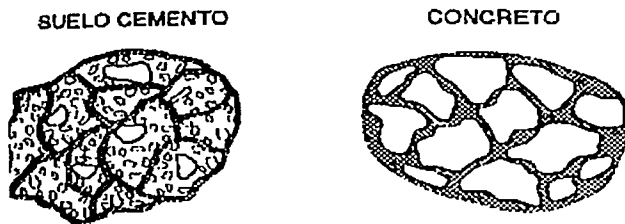


Fig. 3.2 Comparación de la distribución de las pastas para el suelo-cemento y el concreto

## **CAPITULO IV**

### **Patología de las obras civiles**

Se puede definir la durabilidad del concreto hecho con cemento hidráulico, como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, además debe mantener su forma original, calidad y características de servicio.

Por patología estructural se entiende la rama de la ingeniería que estudia el mal o buen comportamiento o el mal o buen desempeño de una estructura u obra civil. Lamentablemente no existe ningún método directo y simple para determinarlo, por lo que es necesario seguir una serie de pasos para poder establecer si existe un mal comportamiento de la estructura y si requiere un estudio más detallado.

A principios del siglo XIX se consideraba a los agregados como cuerpos inertes, es decir, elementos que proporcionaban únicamente volumen (relleno) al concreto, además se aceptaban sólo dos agentes que podían causarle daño: congelación - deshielo y el agua de mar; se desconocían las reacciones de la pasta y los agregados. Estas reacciones, en general, tienen efectos perjudiciales que normalmente dan origen a expansiones nocivas para la integridad de las estructuras de concreto.

Actualmente, se sabe que las condiciones de servicio que generan los daños más comunes que afectan al concreto en su durabilidad están expresadas por el ataque de sulfatos, la exposición al agua de mar, el ataque ácido, la carbonatación, la abrasión, la corrosión del acero o de refuerzo y las reacciones químicas.

En la determinación de cada parámetro, las condiciones de exposición deben ser integradas a la posición geográfica, el carácter del lugar y el medio de contacto.

La degradación y mal mantenimiento de las obras son un objeto de constante preocupación, ya que causan considerables gastos y graves perjuicios, estos temas señalan dos acciones fundamentales que son: prevenir y reparar, de las cuales la primera es más importante.



Cuando una estructura presenta algún tipo de degradación o patología, el usuario deberá decidir entre abandonar la obra, repararla o reemplazarla por una nueva.

Para llevar a cabo un estudio de patología o evaluación para una estructura, existen diferentes métodos y técnicas que coadyuvan a lograr un mejor esquema general de trabajo.

Es muy importante que para cualquier estudio se tome muy en cuenta lo siguiente:

- Describir la degradación o patología del inmueble
- Determinar la causa o fuente
- Evaluar la estabilidad de la obra en su estado actual
- Determinación del tipo de reparación aplicable

#### **IV. 1 Condiciones climáticas**

Como se ha mencionado, las condiciones de exposición de cualquier elemento que se deben evaluar en atención al medio ambiente dependen de la posición geográfica. Las características del medio de contacto corresponden al suelo, agua o cualquier otra sustancia sólida, líquida o gaseosa que eventualmente pueda tener contacto con la estructura.

En México el clima está determinado por varios factores, entre los que se encuentran la altitud sobre el nivel de mar, la latitud geográfica, las diversas condiciones atmosféricas y la distribución existente de tierra y agua. Por lo anterior, el país cuenta con una gran diversidad de climas, los cuales de manera muy general pueden clasificarse, según su temperatura, en cálido y templado; y de acuerdo con la humedad existente en el medio en: húmedo, subhúmedo y muy seco (fig.4.1).

El clima seco se encuentra en la mayor parte del centro y norte del país; esta región, que comprende el 28.3% del territorio nacional, se caracteriza por la circulación de los vientos, los cuales provocan escasa nubosidad y precipitaciones de 300 a 600 mm anuales, con temperaturas en promedio de 22° a 26°C en algunas regiones y en otras de 18° a 22°C.

El clima muy seco registra temperaturas en promedio de 18° a 22°C, con casos extremos de más de 26°C, se presentan precipitaciones anuales de 100 a 300 mm en promedio, se encuentra el 20.8% del país.

El clima cálido se subdivide en cálido húmedo y cálido subhúmedo. El primero de ellos ocupa el 4.7% del territorio nacional y se caracteriza por tener una temperatura media anual entre 22° y 26°C y precipitaciones de 2,000a 4,000 mm anuales. Por su parte, el clima cálido subhúmedo se encuentra en el 23% del país; en él se registran precipitaciones entre 1,000 y 2,000 mm anuales y temperaturas que oscilan de 22° a 26°C, con regiones en donde superan los 26°C.

Finalmente, el clima templado se divide en húmedo y subhúmedo; en el primero de ellos se registran temperaturas entre 18° y 22°C y precipitaciones promedio de 2,000 a 4,000 mm anuales; comprende el 2.7% del territorio nacional. Respecto al clima templado subhúmedo, se encuentra en el 20.5% del país, el cual manifiesta en su mayoría, temperaturas entre 10° a 18°C y de 18° a 22°C, sin embargo en algunas regiones puede disminuir a menos de 10°C; este clima registra precipitaciones de 600 a 1,000 mm en promedio durante el año.

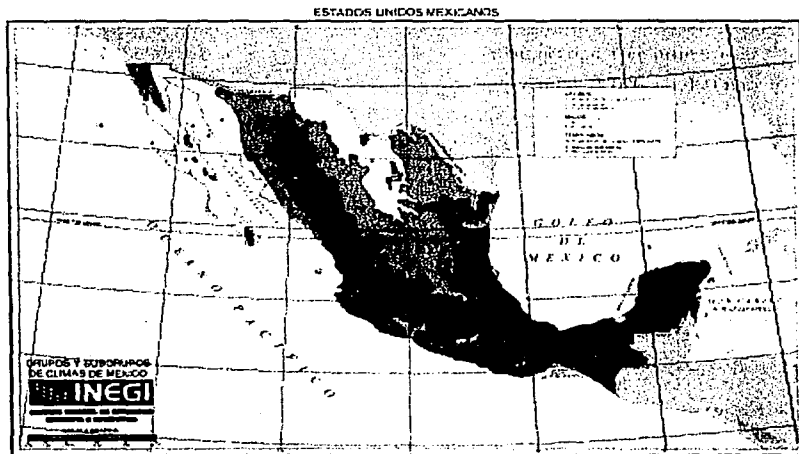


Figura 4.1 Climas en la República Mexicana

Cálido húmedo	■	Seco	■	Templado subhúmedo	■
Cálido subhúmedo	■	Muy seco	□	Templado húmedo	■

Para la elaboración de concreto en las condiciones climatológicas se tiene como un grupo de variables importantes, las cuales pueden ser identificadas y agrupadas en tres categorías:

- 1 ) intervalo de baja temperatura
- 2 ) intervalo de temperaturas moderadas
- 3 ) intervalo de altas temperaturas

Esta última categoría representa, en el caso de la República Mexicana, la condición más desfavorable para la producción de concreto.

En la figura 4.2 se presenta un mapa de la República Mexicana con la distribución de temperaturas medias anuales elaborado por el INEGI.

La definición de clima caluroso del comité ACI 305 indica que es una combinación de las siguientes condiciones que tienden a perjudicar la calidad del concreto fresco o endurecido: alta temperatura del concreto, baja humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar.

En virtud de la combinación de factores que intervienen en la valoración de un clima caluroso por parte de la U.S. Bureau of Reclamation, se especifica para estructuras ordinarias una temperatura máxima de 27°C, cuando el clima es caluroso pero no seco y menor a 32°C en clima húmedo.

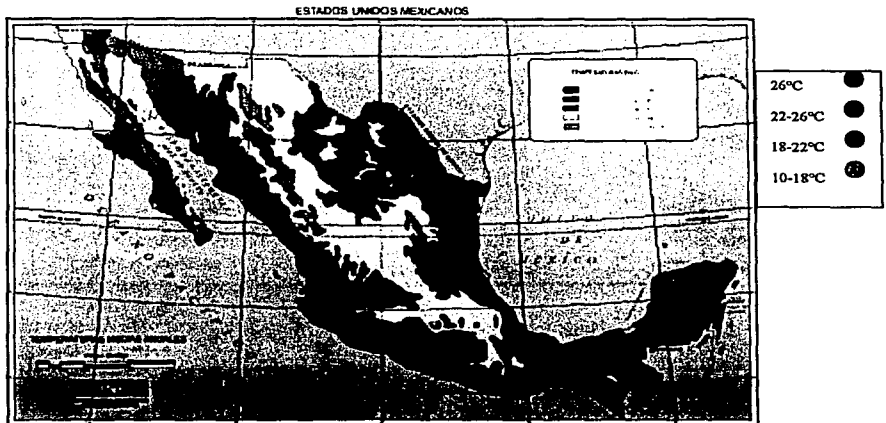


Figura 4.2 Temperaturas media anuales en la república Mexicana

Se sabe que el agrietamiento derivado de la contracción del secado en condiciones climáticas desfavorables ocurre cuando la velocidad crítica de evaporación del agua superficial alcanza 1 kg/m<sup>2</sup>/h.

#### **IV. 2 Congelamiento y deshielo**

El concreto se expande levemente conforme la temperatura se eleva y se contrae a medida que ésta baja, aunque se puede expandir ligeramente cuando el agua libre en el concreto se congela.

En temperaturas bajas el concreto continúa contrayéndose a medida que la temperatura se reduce por debajo de la congelación. La cantidad de cambio volumétrico a temperaturas bajo cero es afectada fuertemente por el contenido de humedad, el comportamiento del agua y el tipo de agregado.

Para poder establecer una zona de la República Mexicana, en donde pueda ocurrir el proceso conocido como congelamiento y deshielo, es útil tomar como punto de partida un plano de isotermas, en el cual se consideren temperaturas mínimas medidas durante un intervalo de tiempo, de tal forma que se puede dividir a la República Mexicana en cuatro grandes zonas con diferentes intensidades de presentar este fenómeno:

- Región de alta intensidad; esta zona comprende las regiones de temperaturas inferiores a -16°C y que se localizan en la porción norte de la República, fundamentalmente en el estado de Chihuahua. Fisiográficamente corresponde a la mayor parte de la Sierra Madre Occidental
- Región de intensidad media; esta región queda limitada por las temperaturas entre -16°C y -10°C que ocupan en forma parcial la zona Norte y Noroeste de la República, ubicándose en forma total el estado de Coahuila y de manera parcial los estados de Sonora, Chihuahua, Nuevo León, Durango y Zacatecas. Fisiográficamente incluyen parcialmente el Desierto Sonorense, la Sierra Madre Occidental, las Sierras y Llanos del Norte, la Sierra Madre Oriental, la Llanura de Norteamérica y la Meseta Central.
- Región de baja intensidad; esta área limita las zonas cuyas temperaturas se ubican entre -10°C y 0°C que abarcan de manera irregular las porciones Noroeste, Noreste y Centro de la República y que fisiográficamente corresponden a partes de la Península de Baja California, el Desierto Sonorense, la Llanura Costera del Golfo Norte y el Eje Neovolcánico.

- Región sin cambios; esta superficie delimita las regiones cuyas temperaturas sea superior a 0°C y que se localiza en la porción Sur y Sudeste de la República y fisiográficamente se trata de las provincias de la Sierra Madre del Sur, Llanura Costera del Golfo Sur y la Sierra de Chiapas.

Otro factor que influye de manera importante en la diversidad de climas, es la humedad, por tal motivo el IMCyC utiliza un mapa de temperaturas mínimas y máximas con relación a la humedad relativa de cada región (fig. 4.3).

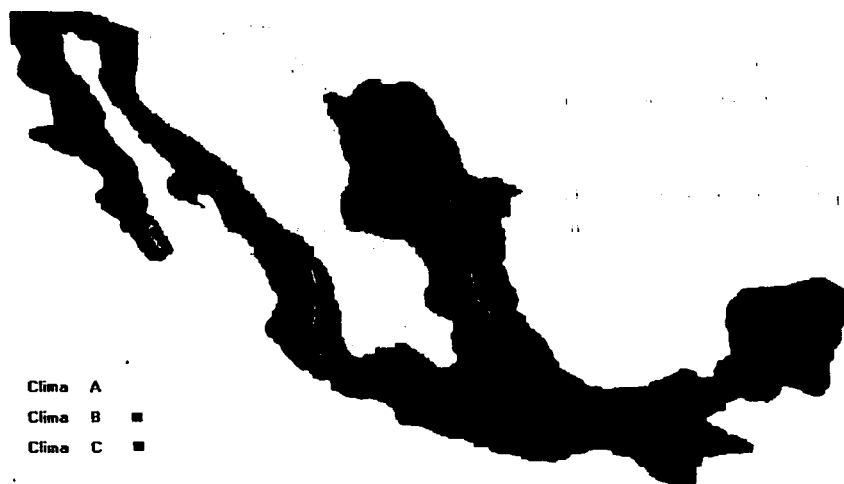


Fig. 4.3 Zonas con diferente condición climática en relación con la humedad relativa (Uribe 1994)

Conceptos (límites probables)	A	B	C
Temperatura mínima absoluta en invierno, °C	-22 / -8	-12 / 0	0 / 12
Temperatura máxima absoluta en verano, °C	36 / 50	36 / 48	40 / 46
Humedad relativa media anual %	30 / 40	40 / 60	60 / 80

### **IV. 3 Carbonatación**

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y altera al hidróxido de calcio, que tiene un pH más neutral.

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto en todo el mundo.

En los concretos que no contienen acero de refuerzo, la carbonatación es generalmente un proceso de pocas consecuencias. Sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inocuo, avanza lenta y progresivamente hacia adentro desde la superficie expuesta del concreto y asalta al acero de refuerzo causando corrosión.

El concreto es altamente alcalino con un pH dentro del intervalo de 12 a 13, de tal forma que gracias a esta característica protege al acero de refuerzo, que se encuentra inmerso en este ambiente alcalino, de la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero. Cuando progresa la carbonatación hacia la profundidad de refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH debajo de 9.5, es posible que empiece la corrosión, que culmina en el agrietamiento y astillamiento del concreto.

Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar.

Es muy importante identificar la presencia de la carbonatación cuando también hay cloruros en el concreto. En el concreto nuevo, como ya se mencionó, tiene un pH de 12 a 13, se requiere aproximadamente de 7,000 a 8,000 ppm de cloruros para comenzar la corrosión del acero inmerso. Sin embargo, si el pH baja a un intervalo de 10 a 11, la cantidad de cloruros para provocar la corrosión del acero disminuye significativamente a 100 ppm o menos. Por esta razón, una investigación de la condición para la mayoría de las estructuras de concreto en proceso de corrosión, debe incluir un análisis de la profundidad de carbonatación.

La manera más fácil de determinar la carbonatación en una estructura, es romper un pedazo de concreto en donde se sospeche que hay carbonatación. Después de soplar el polvo residual se rocía

una solución de 1 0 2% de fenolftaleína en alcohol sobre el concreto. Las áreas carbonatadas del concreto no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor que 9 adquirirán un color rosa brillante. Este cambio muy apreciable de color muestra cuán profundamente ha progresado el frente de carbonatación dentro del concreto.

Otro método consiste en realizar estudios petrográficos, en el cual se observa el comportamiento de la pasta, de tal manera que la zona afectada por carbonatación presentará características fácilmente diferenciables a la de un concreto con pasta normal. De acuerdo a la Norma ASTM C 295 una pasta con características normales es de color pardo claro u oscuro con luz paralela y comportamiento isotrópico con doble polarización, en la cual se encuentran distribuidos aleatoriamente finos cristales tabulares de hidróxido de calcio. Mientras que para una pasta que presenta efectos de carbonatación, se observa un comportamiento anómalo con doble polarización ya que presenta color de birrefringencia amarillo de segundo orden (fotografía 4.1).

Por medio de este tipo de estudios se puede dar una profundidad más exacta del área o profundidad de afectación por procesos de carbonatación del concreto.

Tal como se mencionó anteriormente, el proceso de carbonatación es completamente natural. También se ve afectado por variables naturales que se encuentran en el concreto. El aumento de carbonatación depende, en gran medida del contenido de humedad y permeabilidad del concreto.

Para que tenga lugar la carbonatación, debe haber presencia de humedad.

En las construcciones en general y en las de concreto en particular, la presencia de agua o humedad tienen los siguientes orígenes:

- La humedad natural del suelo, aspirada por las fuerzas capilares
- El agua empleada en la preparación del concreto
- La humedad de la atmósfera, condensada en el interior o en la superficie del concreto
- La lluvia que penetra más o menos en el interior de la estructura

La reacción de carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa en el concreto se encuentra entre 50 y 55%. A humedad más baja, no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio. Por encima de 75% de humedad, la situación se revierte y los poros se bloquean progresivamente con agua. Aunque esto

permite que se disuelva libremente el hidróxido de calcio, evita en gran medida el ingreso de dióxido de carbono. Así se explica por qué diferentes lados de la fachada de un edificio de concreto, por ejemplo, puede variar grandemente la profundidad de sus frentes de carbonatación. Una fachada expuesta al mar puede tener poca carbonatación debido a su contenido constantemente alto de humedad, mientras que la carbonatación puede haber avanzado a niveles más profundos en los otros lados del edificio.

Por otra parte el concreto permeable se carbonatará rápidamente, estos incluyen los que presentan relaciones altas de agua/cemento, ya que los poros permiten la circulación más fácil del dióxido de carbono entre ellos.

La carbonatación puede inclusive causar problemas de corrosión aun en concretos de alta calidad. Un recubrimiento bajo del concreto y defectos de la superficie tales como grietas y pequeños hoyos proporcionan una ruta directa al acero de refuerzo.

Reacciones básicas de carbonatación en el concreto

*Fase 1*

Los poros normales de concreto contienen agua y cal libre ( $H_2O$  y  $Ca(OH)_2$ )

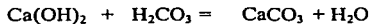
*Fase 2*

Cuando el dióxido de carbono en el aire entra en los poros de concreto se forma ácido carbónico.



*Fase 3*

El ácido carbónico neutraliza la cal libre y forma un carbonato de calcio sólido con un pH neutral, liberándose agua.







Fotografía 4.1; fotomicrografía en la que se observa la pasta carbonatada en la superficie de un concreto, la carbonatación aparece de color pardo naranja con doble polarización

#### IV. 4 Reacciones álcali - agregado

Actualmente se considera que son muchas las causas que pueden provocar el agrietamiento en el concreto; las principales son: deficiencias en el diseño, construcción, esfuerzos térmicos, contracciones por secado, congelación - deshielo y ataque químico. Pueden actuar solos o en combinación y es difícil determinar cuál de estos factores influyen más en el deterioro del concreto, por lo anterior es importante distinguir entre el daño ocasionado por estos factores y la reacción álcali - agregado; ésta se caracteriza por la presencia de un gel que se forma al reaccionar los álcalis del cemento con los agregados que contienen formas inestables de sílice o magnesio. Los daños en la estructura son provocados por la expansión del gel que se produce después de absorber humedad, al principio de la reacción los aumentos de volumen del gel pueden hallar acomodo en los poros de los agregados y de la pasta hidratada y en los espacios intersticiales entre ambos, pero si la reacción continúa y hay suficiente aporte de agua, la subsecuente expansión del gel origina tensiones internas que agrietan el concreto, lo que puede ser agravado por las condiciones del ambiente, por la combinación aparentemente inadecuada de materiales y por las condiciones de exposición desfavorables que pueden afectar más que las deficiencias en el daño, a menos que sean consideradas en esa etapa.

De 1920 a 1930 un gran número de estructuras de concreto en California, Estados Unidos, comenzaron a desarrollar un severo agrietamiento, poco después de su construcción, a pesar de que cumplían ampliamente con las especificaciones marcadas en los códigos vigentes de diseño, construcción y calidad de los materiales; motivados por encontrar una respuesta real al fenómeno de

agrietamiento, un amplio grupo de investigadores se dieron a la tarea de estudiar el comportamiento inexplicable hasta ese momento del concreto.

En el año de 1940 el investigador Thomas Stanton pudo demostrar la existencia de la reacción llamada álcali - agregado, como un proceso intrínseco en la degradación del concreto; por tanto las condiciones del medio ambiente en que se encuentran las estructuras son tan importantes como el cemento y los agregados. Con esto se reafirma el verdadero papel que los agregados utilizados en la elaboración del concreto desempeñan como componentes activos.

Estudios posteriores de Stanton mostraron que el agrietamiento y expansiones del concreto tuvieron su origen en la combinación de cemento con alto contenido de álcalis y en el agregado opalino utilizado.

Blank y Meissner estudiaron el deterioro en el concreto de la presa parker y fueron capaces de mostrar el producto de la reacción álcali - sílice en el concreto; observaron que los componentes reactivos en el agregado fueron alterados por fragmentos de andesitas y riolitas que juntas solamente representaban cerca del 2% del agregado total.

Durante las décadas siguientes, el fenómeno fue estudiado en diferentes laboratorios de diversos países tales como Australia, Canadá, Francia, Nueva Zelanda, China, Sudáfrica y Dinamarca. Las investigaciones, que han experimentado un rápido progreso en distintas direcciones, logrando identificar los tipos de agregados que son susceptibles a intervenir en dicha reacción, mecanismos de desarrollo y métodos de diagnóstico.

Por lo complejo de la geología de los países involucrados, se logró la identificación de la reactividad álcali - sílice como una reacción química entre los hidróxidos de álcalis y alguna forma de sílice reactiva en el agregado.

La participación de geólogos ayudó a concebir al concreto como un ente activo, de esta forma, se garantizó la incorporación de los exámenes petrográficos de los agregados para formar parte del sistema de examen preventivo y también de investigación en la naturaleza de las reacciones y sus efectos en el concreto.

Muchos han sido los aportes al tema realizados por investigadores de todo el mundo, pero quizá cuatro de los nombres más significativos en este campo de la investigación y que sus trabajos son considerados de gran importancia son: Stanton (1940) de Estados Unidos, quien demostró la existencia de la reacción álcali - agregado, Swenson (1974) de Canadá, quien identificó la reacción álcali - agregado en el cual estaban involucrados agregados de carbonato (álcali - carbonato), Idorn de Dinamarca, quien fue uno de los primeros en estudiar el deterioro del concreto debido a la reacción álcali - sílice, y Vivian de Australia, que explicó los mecanismos de la reacción.

Se ha realizado una serie de reuniones internacionales desde 1974 en diferentes países y el conjunto de publicaciones de estas conferencias es la fuente más importante de información disponible hasta el momento.

#### **IV. 4. 1 Mecanismos de la reacción álcali - agregado**

La expansión y el deterioro que sufre el concreto a causa de la reacción álcali - agregado, es el resultado de una interacción química entre los hidróxidos alcalinos, los cuales se derivan usualmente (pero no siempre) del cemento y los componentes reactivos en las partículas del agregado empleado en la fabricación del concreto.

Diversos estudios han mostrado que hay diferentes rocas y minerales que producen interacciones químicas en el concreto, éstas pueden ser descritas en forma genérica como reactividad álcali - agregado. Existen dos formas conocidas de reactividad álcali - agregado que son:

1. Reactividad álcali - carbonato
2. Reactividad álcali - sílice

A primera vista, el análisis en forma general indica que el problema de la reacción álcali - agregado puede no ser distinta a otros procesos de deterioro que afectan al concreto. Así como otros problemas, la reactividad álcali - agregado es un fenómeno dependiente del tiempo que abarca la vida útil de la estructura y con frecuencia después de varias décadas de un buen comportamiento, la estructura comienza a mostrar daños externos ocasionados por problemas internos.

La reactividad álcali - agregado es un fenómeno muy complejo, ya que existen muchos parámetros interactivos e interdependientes que influyen en su aparición, e incluso actualmente, no existe un examen que pueda garantizar que una estructura nunca será afectada por dicho fenómeno. Sin

embargo, la reacción álcali - agregado no es un fenómeno que atemorice si se toman las medidas pertinentes, pero puede llegar a ser devastadora cuando se presenta en una estructura si existen las condiciones favorables para su desarrollo.

Lo que hace a este proceso de deterioro del concreto, poco común y más complejo que otros procesos es que la reacción álcali - agregado es más difícil de reconocer, identificar y monitorear. Además frecuentemente provee un medio para que otros mecanismos de deterioro se desarrollen y operen, quedando ésta en segundo término respecto a la importancia de las degradaciones.

La reacción álcali - agregado es un fenómeno imprevisible y poco común. Los factores que envuelven el inicio de la reacción son muy complejos, el medio ambiente al igual que los ingredientes básicos juegan un papel importante en su desarrollo.

#### IV. 4. 2 Reacción álcali - carbonato

Esta reacción fue la primera en ser descrita por Swenson en 1957. En realidad se conoce poco de este tipo de deterioro del concreto a nivel mundial ya que no es frecuente.

La reacción álcali - carbonato involucra una reacción entre los álcalis del cemento y ciertas rocas de caliza dolomítica. En condiciones de humedad se presenta una expansión en el concreto similar a la causada por la reacción álcali - sílice. la reacción de desdolomitización es descrita por la siguiente ecuación:



donde M representa al potasio (K) o sodio (Na). La calcita y la brucita se consideran insolubles.

La reacción álcali - carbonato se presenta únicamente en agregados como calizas dolomíticas de grano fino que producen expansiones significativas; con frecuencia se forman zonas de reacción del orden de 2mm alrededor de las partículas reactivas. En esos contornos se desarrollan grietas tipo mapa que ocasionan pérdida de adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. La causa no está propiamente entendida, pero se ha sugerido que la desdolomitización de los cristales en las partículas del agregado abre canales permitiendo que la humedad sea absorbida por la arcilla presente en la caliza anteriormente seca; la dilatación provocada por esta absorción causa

expansiones irreversibles de la roca y el subsecuente agrietamiento del concreto. En esta reacción los álcalis se regeneran y probablemente por esta razón las puzolanas no son efectivas para controlar la expansión álcali - carbonato. Afortunadamente, las rocas con carbonato reactivo no son muy comunes y por lo general, se pueden evitar.

Los agregados que se consideran propensos a la reacción álcali - carbonato tienen más del 20% del peso de la roca como carbonato reactivo (carbonato de magnesio) en el agregado grueso o por lo menos 15% de roca reactiva entre el agregado grueso y fino. Las rocas de carbonato altamente reactivas contienen aproximadamente iguales cantidades de calcita y dolomita y de 10 a 40% de residuos insolubles compuestos principalmente de arcilla.

Las rocas que normalmente intervienen en esta reacción son las calizas dolomíticas, las calizas arcillosas y dolomías. Sin embargo, debido a que estas rocas suelen hallarse intercaladas en formaciones constituidas por rocas similares pero no reactivas (calizas, pedernal, areniscas y lutitas) el grado de reactividad del material explotado en conjunto en una misma formación, depende de la proporción en que se encuentre la fracción reactiva. Por tal motivo, una de las medidas preventivas que suele recomendarse para evitar esta reacción, consiste en efectuar la explotación selectiva del banco o por lo menos reducir el agregado reactivo a no más del 15% del agregado total en el concreto.

#### **IV. 4. 5 Regiones con rocas propensas a la reacción álcali - carbonato**

Dado lo irregular de la distribución del material potencialmente reactivo dentro de las formaciones existentes en cada provincia fisiográfica, resulta muy difícil tratar de hacer una delimitación de regiones con distinto grado de reactividad potencial. En consecuencia, se intenta en el siguiente mapa de la República Mexicana señalar aquellas provincias fisiográficas o zonas donde suelen hallarse rocas carbonatadas del tipo considerado como potencialmente reactivo, sin pretender calificar su grado de reactividad. Esto debe ser motivo de un estudio detallado en cada banco o cantera en particular, previo a su explotación para obtener los agregados del concreto.

Región de agregados inocuos: Esta región está formada por las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Oriental, Sierra de Chiapas y la Sierra del Sur en su fracción sedimentaria, en particular en la subprovincia de la plataforma Morelos - Guerrero, las cuales no cuentan con un gran porcentaje de materiales reactivos, pero sí tienen una amplia distribución a lo largo de ellas.

En las provincias mencionadas, es posible encontrar materiales como calizas dolomíticas y calizas arcillosas, que se consideran las principales rocas que generan la reacción álcali - carbonato.

Región de agregados reactivos(fig.4.4): Este grado de reactividad es muy difícil limitarlo, ya que los materiales reactivos no se encuentran concentrados, además de que están combinados con una gran cantidad de materiales inocuos que ayudan a diluir la posible concentración de los agregados reactivos.

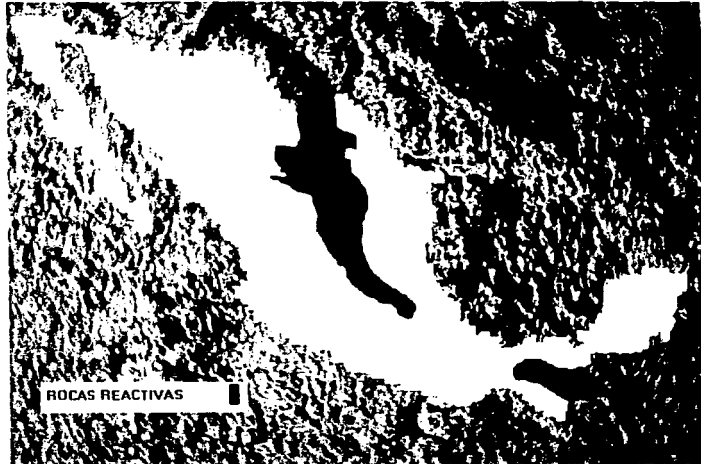


Figura 4.4: Mapa de agregados reactivos en la reacción álcali - carbonato (Urbe 1994)

#### IV. 4. 4 Reacción álcali - sílice

De los dos tipos de reacciones, la más frecuente es la reacción álcali - sílice. La actividad álcali - sílice es una reacción química interna entre los hidróxidos de álcali y ciertas formas de sílice en el agregado del concreto. La reacción es esencialmente expansiva ya que tiene la capacidad de

desarrollar suficiente presión de dilatación para fisurar y romper el concreto; la reacción progresa lentamente durante algunos años antes de que los efectos de la expansión y del daño interno que lleguen a ser visibles y tiene la particularidad de producir un gel "álcali - sílice": Este último tiene un efecto higroscópico y es el resultado de la interacción de los álcalis - solubles en el concreto y los elementos integrantes de las partículas del agregado que, por sus características de ser hidrofílico, absorbe humedad e incrementa su volumen.

Como la reacción álcali - sílice es interna, química y expansiva, la evidencia más directa y visible es el agrietamiento; el concreto afectado por esta reacción muestra cambios importantes en sus características físicas, mecánicas y microestructurales. En la práctica para que la reacción álcali - sílice tenga lugar deberá estar presente alguna forma de sílice reactivo en el agregado, una fuente de álcalis ya sea interna o externa y la presencia de agua. Además, la solución de álcalis debe entrar en contacto con el sílice reactivo, lo que puede ser de la siguiente manera:

*Etapa 1.* Desarrollo del agrietamiento en el concreto, el agrietamiento es el resultado de la interacción de varios factores, que se desarrolla lentamente durante varios años.

*Etapa 2.* El agua penetra por las grietas, principalmente en los meses de lluvia, o por alguna otra fuente continua de humedad, como es el caso de las pilas de puentes, cortina de presas, etc. Además en teoría la sal del deshielo puede reaccionar con la portlandita de la pasta de cemento, esto produce la solución alcalina, agregándose a los álcalis presentes en la solución de poro de la pasta de cemento.

*Etapa 3.* Si hay un agregado de sílice reactivo en el concreto, la solución de álcali se difunde en las partículas del agregado. Una reacción química entonces tiene lugar entre la solución de álcali y el sílice reactivo del agregado y se forma el gel álcali - sílice, una vez formado el gel, el cual es higroscópico por lo que tiene la capacidad de absorber agua y expandirse.

*Etapa 4.* Continúa la formación y la expansión del gel álcali - sílice esto produce presiones internas, las cuales agrietan las partículas del agregado junto con la pasta de cemento que la rodea. El agrietamiento es de tipo expansivo y puede ser observado por la naturaleza de la grieta y por el desplazamiento de los fragmentos del agregado.

*Etapa 5.* En esta etapa el gel álcali - sílice es capaz de fluir fuera del agregado a través de la pasta de cemento a lo largo de las microgrietas que se han formado como resultado de las expansiones.

El desarrollo de más gel y el incremento de las expansiones llevan a un mayor agrietamiento.

La presión producida por el gel puede ser observada en la pasta de cemento adyacente a las microgrietas en donde se observa que se encuentra manchada fuertemente como resultado de la inyección del gel.

Las evidencias del mecanismo de la reacción álcali - sílice pueden observarse para el caso de la etapa 1, mediante inspección visual de las estructuras; las etapas 2 y 3 no pueden ser descubiertas rápidamente por que los cambios son más químicos que físicos. Las etapas 4 y 5, sin embargo, pueden ser observadas por examinación de secciones delgadas de concreto afectado (fotografías 4.2a, 4.2b, 4.3c).



a



b



Fotografía 4.2: Fotomicrografías que muestran el gel producto de la reacción álcali-agregado en un poro de aire con fracturamiento ordinario, a) luz polarizada, b) doble polarización, c) con placa de  $1/4$  de lambda.

En el límite de la partícula del agregado con la pasta de cemento, el gel llena completamente la grieta y muestra un área muy fina. En la pasta de cemento el gel es encontrado de nuevo como un depósito en la periferia de la microgrieta, que se ha desarrollado en una red compleja alrededor de las partículas finas del agregado.



La pasta de cemento en el borde de la microgrieta se encuentra fuertemente manchada, probablemente como resultado de la inyección a alta presión del gel. En el centro de las partículas reactivas el gel desarrolla fuerzas de expansión causando agrietamiento.

Una vez que el agrietamiento ha ocurrido, el gel comienza a emigrar del sitio de la reacción de la red de microfracturamiento y deja solamente partes del gel en las partículas.

Cuando se expone una grieta de una muestra de concreto afectada al medio ambiente, se observa que el gel es generalmente transparente y resinoso en apariencia, con una viscosidad entre el aceite delgado para motor y la resina (Fragoso, 1995). Algunas muestras son muy fluidas y permiten al gel desplazarse a lo largo de las grietas y llenar total o parcialmente los vacíos del concreto.

El gel se carbonata con el tiempo y la exposición al aire lo que le imparte un color blanco y duro en las grietas secas. A menudo la deshidratación del gel en la superficie de una hendidura del concreto es menos visible. Los núcleos tomados de estructuras afectadas por la reacción son comúnmente cubiertos con capas de película adherible y selladas en polietileno para mantener la muestra húmeda, este procedimiento permite que el gel (si está presente) sea identificado en la superficie del núcleo.

La viscosidad del gel puede producir una presión de hasta  $112 \text{ kg/cm}^2$  por lo que puede agrietar el concreto, en circunstancias raras, tal expansión puede ser hasta de 2 a 3%, debido a la capacidad del esfuerzo de tensión del concreto que es únicamente de 150-200 vs (microesfuerzos) y rara vez excede los 500vs.

El tipo de reacción y la expansión que resultan críticas para una estructura de concreto, dependen del tamaño de la partícula, volumen y tipo de agregado reactivo.

La evidencia más directa y visible de la reacción es el agrietamiento en la superficie del concreto. Si un elemento de concreto está sujeto a pequeños esfuerzos, la trayectoria de la grieta desarrolla la forma de polígonos irregulares que recuerdan la división política de un mapa, por lo que es referida como agrietamiento tipo "mapa".

Las grietas tomarán primero la forma de una estrella de tres o cuatro picos, conforme la reacción continúa, más grietas se desarrollan hasta que se juntan para formar el agrietamiento de mapa, se

debe señalar que otros procesos como la contracción por secado, congelación o expansión pueden provocar patrones de grietas similares.

Este patrón de agrietamiento puede ser alterado por los esfuerzos o el refuerzo. Así en vigas de concreto armado las grietas frecuentemente reflejan la línea del acero principal de refuerzo, en vigas pre-esforzadas y en columnas en donde se encuentran bajo esfuerzos pre-existentes las grietas se desarrollan paralelas a la dirección del esfuerzo, a lo largo de la longitud de la estructura.

El proceso de la reacción álcali - sílice claramente involucra un sólido (el gel reactivo) y un líquido (solución de poro) y es como una reacción heterogénea sólido - líquido. Esta reacción es inusual debido a que el líquido está restringido en los poros del sólido y el componente sólido de la reacción es una pequeña parte irregularmente distribuida del total del sólido, esto complica el estudio de la reacción.

El transporte de masa es una característica esencial; las partículas del agregado, normalmente consisten de sílice y son inestables en el medio ambiente del concreto. La reacción comienza con una reducción en la energía libre del sistema.

Esta reacción o esta serie de reacciones son acompañadas por el transporte de masa de iones de  $\text{OH}^-$  y álcalis. El fluido de poro se encuentra en contacto íntimo con los productos de la hidratación del cemento así como con las partículas del agregado y sirve como el agente principal de transporte.

La microestructura del cemento consiste de los productos de hidratación (fig. 4.5), se muestra en sus dos características distintivas, las plaquetas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de calcio) y la liga de fibras o la estructura similar a listones de C-S-H (hidrato de calcio, gel de tobermorita). Los productos de la hidratación no son normalmente espacios llenos, de modo que un considerable volumen de poro se genera (microporos). Cuando el agregado es situado en un medio rico de hidroxil su potencial para experimentar la hidroxilación se incrementa. La temperatura acelera la reacción, los agregados susceptibles reaccionan más rápido que el cuarzo cristalino, hasta en temperaturas normales.

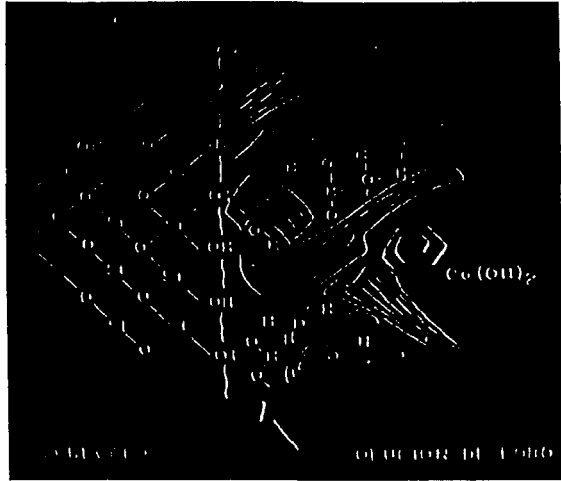


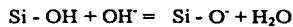
Fig. 4.5 Esquema del principio de reacción álcali - sílice (Fragoso 1995)

Dent-Glasser (19981) señala que el gel es similar a capas de constitución indefinidas en la interfase del agregado - pasta de cemento. El gel absorbe agua e iones solubles, principalmente en las orillas susceptibles de las partículas del agregado síliceo. El gel suave puede también ser exudado por las presiones mecánicas de la expansión.

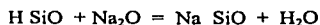
En la primera etapa, el elevado pH del fluido de poro reacciona con Si-O-Si (silicio-oxígeno-silicio) que une a las formas del silanol.

El agregado de sílice hidratado puede contener un importante grado de afinidad con el silanol. El silanol es un ácido según la definición de Lewis y participa fácilmente en reacciones posteriores con la solución de poro.

El silicón con un sitio de coordinación anteriormente ocupado por OH puede ser abreviado como Si-OH y en la segunda etapa de la reacción, además del hidroxil, se libera más agua en el proceso.

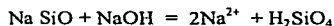
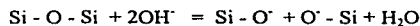


La carga negativa Si-O atrae a las cargas positivas, rápidamente abundan el sodio, potasio y el calcio se difunde en el gel en un número suficiente para balancear la carga en el grupo de cargas negativas. Dent-Glasser y Kataoka (1981) lo han representado como:



En donde la carga de compensación es lograda por el  $\text{Na}_2\text{O}$ , aunque, por supuesto, la implicación es que otros cationes puedan participar.

En la tercera etapa ocurren el ataque de los puentes de siloxano Si-O-Si y la desintegración del sílice.



El principal silicato soluble es  $\text{H}_2\text{SiO}_4$ . El gel mismo tiene significativamente un mayor volumen específico que el  $\text{SiO}_2$ , el cual es reemplazado, esto es lo que crea las presiones y expansiones que son características de la reacción álcali - sílice.

La extensión de la expansión es difícil de predecir, el gel de sílice tiene contenidos de agua y densidades que son variables sobre intervalos amplios y existe la posibilidad adicional para absorber del agua iones de sodio y potasio, esto provoca que la densidad y el volumen específico varíen ampliamente.

Es cierto que el gel álcali - sílice es semipermeable y que contiene álcalis, calcio, etc. pero no son los álcalis los que realmente inician la reacción, más bien son los iones de OH y la susceptibilidad específica de la partícula del agregado que condiciona el potencial de la reacción.

Si el contenido de álcalis es bajo, solamente una cantidad limitada de iones hidratados de Na, K y OH, pueden penetrar en el grano, esto es, debido al tamaño de los iones de Ca. Si la concentración de álcalis es alta, pequeños iones hidratados de Na, K y OH, podrán penetrar en el grano reactivo sin problemas. Esta penetración de los iones de Na, K y OH provocará la ruptura de los lazos de Si-O-Si, de este modo se abre el grano y posteriormente ocurre la penetración de los iones de Ca, además de los iones de Na, K y OH.

Una presencia excesiva de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de calcio) y una concentración alta de álcalis, limita la cantidad de  $\text{SiO}_2$  que puede difundirse fuera del agregado, la expansión ocurre cuando más material de Na, Ca, K, OH y agua penetran en los granos de sílice esparcido.

Diferentes estudios de la composición del gel álcali - sílice reportados por Fragozo en 1995, muestran un alto contenido de CaO, como se observa en la figura 4.6.

Como se comentó anteriormente la reacción álcali - sílice tiene lugar en el concreto cuando una solución alcalina originada ya sea de la disolución de poro de la pasta de cemento o de alguna otra fuente, reacciona con cierto tipo de sílice en el agregado para formar el gel álcali - sílice.

Si la solución de álcalis proviene de la pasta de cemento, el proceso puede ser representado en forma directa por la siguiente reacción química.

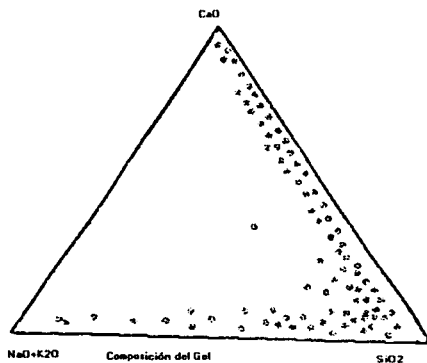
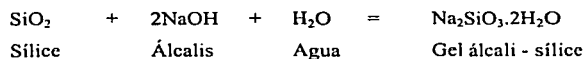
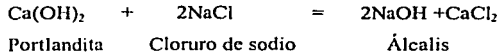


Fig. 4.6 Composición del gel álcali-sílice

Teóricamente si la solución de álcalis proviene de la infiltración de sales, entonces primero tiene que haber una reacción entre la sal (NaCl) y la portlandita (Ca(OH)<sub>2</sub>) presente en la pasta de cemento. Esta reacción puede ser representada por:



Independientemente del proceso que se haya seguido para la formación del gel, éste tiene la capacidad para absorber agua y posteriormente expandirse; la expansión ejerce una presión que puede agrietar tanto las partículas del agregado como la pasta de cemento que rodea y finalmente puede afectar al concreto.

Ahora bien, además de los compuestos principales mencionados en la fabricación del clinker, existen algunos compuestos menores como son MgO, TiO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O y Na<sub>2</sub>O, que generalmente no sobrepasan de un pequeño porcentaje del peso del cemento, se debe descartar que los terminos menores se refiere principalmente a la cantidad, pero no necesariamente a su importancia. De estos compuestos revisten interés los óxidos de sodio y potasio, conocidos como álcalis, su presencia en el cemento depende de las materias primas y del proceso de fabricación, usualmente la fracción arcillosa y el carbón (si éste es utilizado para fuego del horno) son los constituyentes que aportan estos elementos. Si el material arcilloso utilizado como materia prima contiene mica o arcilla del tipo de la illita, entonces el clinker producido puede contener más sodio o potasio o ambos, dependiendo de la composición del feldespato en la materia prima. La porción final de los álcalis presentes en el clinker será dependiente de las porciones de mica e illita o feldespato en la alimentación del horno.

Por el proceso de fabricación del cemento las fases de álcalis tienden a ser una fracción volátil en el ambiente del horno y alrededor de un 50% se volatilizará durante el proceso de calcinación. Muchos de estos álcalis son redepositados en la cadena de sección del horno y en los precalentadores, precipitadores de polvos y filtros.

Como se ha señalado; los álcalis pueden ser aportados por diferentes fuentes a la del cemento: agua de mezclado, agregados, la sal de deshielo. Debido a esto, se ha sugerido que cuando se utilizan agregados reactivos, se debe evaluar el contenido de álcalis en la mezcla de concreto; para la

aplicación de este criterio, se han propuesto límites de 2.1 a 2.5 kg de álcalis como máximo en un metro cúbico de concreto (0.2 kg/m<sup>3</sup>).

Debido a los diversos factores que influyen en la reacción, la determinación real del potencial de reactividad de los agregados es solamente posible a través de programas de pruebas de laboratorio; además es necesario un criterio para interpretar los resultados para que se pueda predecir el riesgo de la reacción de los agregados en el concreto.

Los métodos utilizados para la determinación de la reacción álcali - agregado son:

- Examen petrográfico ASTM C 295
- Método químico ASTM C 289
- Método de la barra de mortero ASTM C 227
- Método del prisma de concreto CAN/CSA A23.2-14\*

La duración de estas pruebas varían desde un día hasta 1 año según el tipo de método empleado.

Para este trabajo lógicamente el método que interesa es el petrográfico con base a la Norma ASTM C 295. En el examen petrográfico de los agregados se evalúa la potencialidad de éstos para reaccionar con el álcali del concreto; es una inspección que establece la presencia y cantidad de formas de sílice reactiva dentro de las partículas del agregado. Los minerales que pueden producir expansiones nocivas son identificados por el microscopio petrográfico en núcleos de concreto tomados de los especímenes o de estructuras afectadas. El análisis petrográfico generalmente reconoce minerales tales como el ópalo, cristobalita, tridimita, vidrio volcánico, pedernal, calcedonia y cuarzo microcristalino, que como se mencionó en capítulos anteriores, se consideran como agregados deletéreos en la elaboración de concreto.

Las técnicas complementarias al estudio petrográfico incluyen la difracción de rayos X y la microscopía electrónica y fluorescente (fotografía 4.3a , 4.3b y 4.4).

El examen petrográfico no puede proveer información en cuanto a la expansibilidad del concreto, sin embargo, un petrógrafo experimentado puede predecir el comportamiento probable de los agregados en el concreto. Este análisis es a veces suficiente para aceptar o rechazar el agregado para

su empleo en la fabricación del concreto, si hay duda en los resultados, ayuda a seleccionar las pruebas adicionales que deben realizarse, de acuerdo a la naturaleza de los agregados bajo estudio. Esto permite reducir el tiempo de realización de las pruebas. Es importante reconocer que el examen petrográfico y demás estudios complementarios son únicamente el primer paso en la evaluación de la susceptibilidad del agregado en un medio alcalino como el concreto.



Fotografía 4.3; Microfotografía en la que se observa:  
a) rompimiento de un agregado, b) gel en un poro de aire observado con luz fluorescente



Fotografía 4.4; Fotomicrografía donde se muestra la estructura del gel observada con microscopio electrónico



#### **IV. 4. 5 Regiones con rocas propensas a la reacción álcali - sílice**

A continuación se incluye la descripción de las regiones cuyas características fisiográficas son comunes en cuanto a la probable existencia de rocas y minerales reactivos que pueden producir la reacción álcali - sílice y cuya delimitación de carácter general de ninguna manera excluye la posibilidad de la existencia de agregados potencialmente reactivos fuera de ellas (fig. 4.7). Tal accidente ocurre con los agregados que son acarreados y depositados fuera de su zona de origen por diferentes agentes de transporte como pueden ser los ríos, el viento o las fuerzas que se liberan en las erupciones volcánicas.

**Región de agregados inocuos:** Esta zona ocupa las regiones Norte, Noreste, Sudeste de la República Mexicana y abarca las provincias fisiográficas de la Sierra Madre Oriental, Llanura Costera del Golfo, (Norte y Sur), Mesa del Centro, Sierras de Chiapas y Península de Yucatán, las cuales en forma muy general están constituidas por calizas, dolomías, margas, limolitas, lutitas, areniscas, conglomerados, brechas y de manera muy dispersa y poco abundante, algunos materiales volcánicos que en su mayoría son de composición basáltica.

**Región de agregados moderadamente reactivos:** Abarca la porción más al Noroeste de la República, así como la porción sur de la misma, ocupando parcialmente las provincias fisiográficas de Baja California y del desierto de Sonora, en donde suelen hallarse rocas volcánicas y rocas metamórficas de muy variada composición. En la sierra madre del sur, es posible encontrar toda clase de rocas (ígneas volcánicas y plutónicas, sedimentarias de origen químico y mecánico y gran diversidad de rocas metamórficas de los complejos Xolapa, Acatlán y Oaxaqueño).

**Región de agregados altamente reactivos:** Comprende la porción sur de la Península de Baja California y las provincias fisiográficas de la Llanura Costera del Pacífico, la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico. En esta región predominan las rocas de origen volcánico con diferentes contenidos de sílice amorfa y vidrio que comprenden basaltos, andesitas, dacitas y riolitas con sus respectivas tobas.

A manera de resumen se presentan en la tabla 10, las rocas y minerales considerados como deletéreos en alguna de las reacciones álcali - agregado, tomando como base la tabla citada por Krynine (1961).

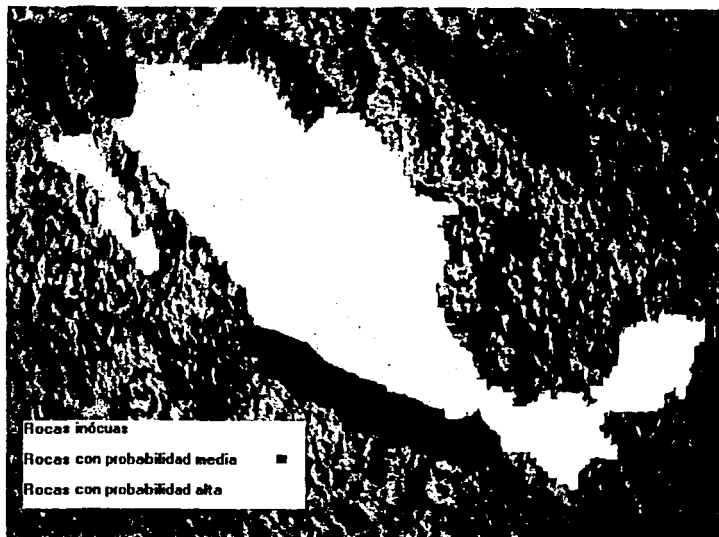


Fig. 4.7 Mapa de agregados reactivos en la reacción álcali - sílice (Uribe 1994)

#### IV. 4. 6 Situación del efecto álcali - agregado en la República Mexicana

Como el tiempo en que tarda en manifestarse la reacción es muy variable (1 a 30 años) y además de que no es fácilmente identificable, no es posible establecer si en los países en donde dicho fenómeno no se ha registrado no es que realmente no se esté llevando a cabo en estos momentos.

México no ha permanecido ajeno al deterioro que sufre el concreto ocasionado por la reacción álcali - agregado, ya que las condiciones para que el fenómeno se presente y se desarrollen están dadas, debido a que con frecuencia se utilizan agregados que contienen sílice reactiva y se emplean cementos con un alto contenido de álcalis debido a los nuevos sistemas de producción del cemento.

En México son pocas las estructuras en las que científicamente se ha probado que han sido afectadas por la reacción álcali - agregado. Desafortunadamente la información y las experiencias

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

que se han obtenido en cada uno de estos casos permanece restringida, debido a que estos estudios no han sido publicados ya que permanecen con un carácter confidencial.

A manera de resumen en la tabla 4.1 se mencionan las principales rocas y su carácter reactivo con el álcalis del concreto y su existencia en México.

Tipo de roca	Componente reactivo	Existencia en México
<b>1. Reacción álcali-sílice</b>		
Rocas que contienen ópalo, (ciertas pizarras, areniscas y pedernal)	Ópalo, tridimita, calcedonia	Reducida
Rocas volcánicas vítreas (riolitas, dacitas, latitas, andesitas y sus tobas, ignimbritas)	Sílice amorfa, vidrio	Muy frecuente
Rocas de alto contenido de sílice (ortocuarcitas, areniscas, aplita, ciertos esquistos)	Cuarzo (sólo reactivo si es microcristalino o está muy deformado)	Regular
Grauvacas, argilitas, Filitas, algunos esquistos y pizarras	Illita	Regular
<b>2. Reacción álcali-carbonato</b>		
Calizas dolomíticas, calizas arcillosas y dolomia	Dolomita y tal vez calcita criptocristalina	Regular

Tabla 4.1 Rocas reaccionantes en el concreto

#### IV. 5 Efectos de temperaturas en el concreto

Históricamente, hay muchos ejemplos de ciudades que han sido virtualmente consumidas por el fuego, algunas de ellas han experimentado más de una devastación de este tipo. Por ejemplo se puede citar los siniestros ocurridos en Chicago en 1871, en San Francisco en 1906 después del gran temblor; Londres, etc. Estos siniestros que tan solo forman parte de una estadística histórica

sirvieron de base para desarrollar investigaciones sobre el comportamiento del concreto cuando se enfrenta a este tipo de siniestro.

Para entender y prevenir desastres que pueden afectar una estructura de concreto es necesario conocer el comportamiento de ésta cuando es sometida a un incendio.

#### **IV. 5. 1 Temperaturas ordinarias de servicio**

En condiciones de exposición a la intemperie, las temperaturas ordinarias de servicio de concreto pueden ser muy variables, pues dependen de las características climatológicas del lugar. Si se consideran situaciones geográficas y climas opuestos, cabe suponer temperaturas tan bajas como  $-20^{\circ}\text{C}$  en la superficie de estructuras cubiertas por la nieve en sitios de muy alta latitud y tan elevadas como  $60^{\circ}\text{C}$  en la superficie de estructuras expuestas al sol en regiones tropicales. Sin embargo, debido a que el concreto posee una moderada conductividad térmica, estas temperaturas extremas son más bien superficiales, de modo que en el interior de la estructura, los límites en que fluctúan las temperaturas ordinarias de servicio abarcan un intervalo más reducido; en casos excepcionales las estructuras voluminosas pueden alcanzar temperaturas mayores debido a la acumulación del calor de hidratación del concreto que trabaja a temperaturas elevadas. En las centrales nucleares son inconvenientes que deben evitarse con el uso de medidas preventivas adecuadas.

Los efectos inmediatos que producen en el concreto las variaciones de temperatura dentro de los límites operativos ordinarios, corresponden a los cambios de volumen de origen térmico que se manifiestan como expansiones cuando la estructura se calienta y como contracciones cuando se enfría. En las condiciones comunes en que las estructuras no tienen completa libertad para los cambios de volumen, las expansiones restringidas provocan en el concreto esfuerzos de compresión en tanto que las contracciones restringidas las producen de tensión. Debido a la escasa capacidad del concreto para trabajar a tensión, los cambios de volumen por contracción son los que más preocupan; por tanto deben evaluarse para que, en concordancia con ellos, adoptarse las medidas de diseño que permitan evitar agrietamientos indeseables en la estructura. La evaluación de la contracción de origen térmico, se realiza en función del intervalo predecible de la temperatura y del coeficiente de expansión térmica del concreto de uso previsto.

De acuerdo a lo anterior, mediante un diseño adecuado, que tome en cuenta las condiciones térmicas de exposición y servicio y las características de la estructura y del concreto, es factible

paliar los efectos de los cambios de temperatura que ocurren dentro del intervalo ordinario, de modo que la estructura no sufra daño por este motivo; pero esto no se cumple si la temperatura del concreto se ubica fuera de los límites ordinarios, en cuyo caso el concreto y la estructura pueden sufrir efectos de deterioro.

#### **IV. 5. 2 Temperaturas extraordinarias**

Al referirse a la predicción del coeficiente de expansión térmica del concreto, el informe del comité ACI 209 (American Concrete Institute) considera que éste sólo varía linealmente con la temperatura en el intervalo de 0° a 60°C, en la condición adicional de que el contenido de humedad en el concreto sea estable. Esta limitación aplicada a la temperatura puede justificarse porque a valores bajo 0°C el agua libre del concreto comienza a congelarse y esto provoca cambios volumétricos que se manifiestan en forma proporcional a la disminución de temperatura; en el otro extremo, a temperaturas mayores a 60°C aproximadamente, se producen aumentos diferenciales de volumen en los componentes del concreto, que generan presiones y microfisuramientos internos capaces de afectar sus propiedades mecánicas y su comportamiento térmico.

Cabe hacer notar que el concreto puede ser razonablemente protegido contra los efectos dañinos de las bajas temperaturas, pero no así contra los efectos detrimentales de las temperaturas elevadas; asimismo, es pertinente señalar que la congelación del concreto es un acontecimiento prácticamente normal durante el invierno en lugares de clima muy frío, en tanto que el calentamiento excesivo del concreto es un suceso ocasional en las estructuras comunes, que sólo se produce como consecuencia de incendios.

Los daños que pueden producir un incendio sobre una estructura de concreto, dependen tanto de factores relacionados con las características de la estructura afectada como del propio incendio. En cuanto a las características que definen un incendio, son importantes su magnitud, duración y temperaturas alcanzadas, si bien existe normalmente cierta correspondencia entre ellas; es decir, un incendio de gran magnitud suele tener larga duración y producir temperaturas más altas y viceversa. La gran variedad de situaciones que pueden ocurrir en este aspecto y la evidente dificultad para evaluarlas en un incendio real, han conducido a reglamentar lo que se denomina un "incendio estándar", con el fin de poder medir y juzgar comparativamente sobre la misma base, la resistencia al fuego que oponen diferentes tipos estructurales, hechos con diferentes tipos clases de concreto.

Por convención, un incendio estándar corresponde a la generación de calor que se produce al quemarse a nivel de piso 10 libras de materiales combustibles de uso común (telas, papel, madera) por hora y por cada pie<sup>2</sup> de área. De acuerdo con el método de prueba ASTM E 119, la evolución del incendio estándar se define por una curva de calentamiento en función del tiempo, a la que corresponden las siguientes temperaturas alcanzadas a partir del inicio del fuego:

<i>Tiempo transcurrido</i>	<i>Temperatura alcanzada °C</i>
5 minutos	538
10 minutos	704
30 minutos	843
1 hora	927
2 horas	1010
4 horas	1093
8 o más horas	1260

Para evaluar experimentalmente la resistencia del concreto al fuego, se ensayan elementos estructurales que son sometidos a las cargas de diseño, se introducen en grandes hornos donde se exponen a la acción de un incendio simulado, en condiciones estándar de calentamiento.

#### **IV. 5. 3 Efectos de las altas temperaturas en el concreto**

El concreto es un material incombustible, pero cuando es sometido a temperaturas que exceden el límite ordinario de servicio, se afectan sus propiedades; esto significa que después de sufrir un calentamiento a elevada temperatura, el concreto puede conservar su apariencia pero no así sus características y propiedades originales. Durante el calentamiento del concreto, sus componentes se dilatan en función de sus respectivos coeficientes de expansión térmica; de este modo, al exceder una temperatura del orden de 60 a 70°C, la incipiente evaporación del agua libre del concreto origina expansiones diferenciales que aunadas a las producidas por el gradiente térmico, generan presiones internas que lo microfisuran. Al rebasar los 100°C, en que prácticamente toda el agua evaporable se elimina, el concreto ya seco continúa expandiéndose de una manera sensiblemente proporcional a las temperaturas hasta alcanzar un nivel aproximado de 300°C, a partir del cual se producen alteraciones intrínsecas que incrementan desproporcionadamente su dilatación y pueden ocasionar su completa ruptura y desintegración si la temperatura continúa incrementándose.

Al recuperar su temperatura original, el concreto permanece con una expansión residual debida al microfisuramiento que le produjo el aumento de temperatura.

Paralelamente a las variaciones dimensionales que se manifiestan en el concreto con el aumento de temperatura, también ocurren cambios en sus propiedades térmicas y mecánicas. En el aspecto térmico, procede referirse a la conductividad térmica, la cual es la medida de su disposición para conducir el calor y cuya magnitud en el concreto de peso normal húmedo, a la temperatura ambiente, normalmente oscila entre 2 y 4 w/m<sup>2</sup>c (7 a 14 kj/mhr °c) según la naturaleza de los agregados. Al comenzar el incremento de la temperatura se manifiesta un aumento de la conductividad térmica del concreto que alcanza el máximo a una temperatura del orden de 60°C, a partir de la cual comienza a descender a medida que continúa incrementándose la temperatura; este descenso de la conductividad, se debe primero a la pérdida por evaporación del agua libre del concreto y después a la ruptura interna que resulta de la excesiva expansión térmica. Al llegar la temperatura a 300°C aproximadamente, la conductividad térmica del concreto disminuye a cerca de la mitad de su valor original, aunque esta disminución de la conductividad se vuelve menos significativa conforme sigue aumentando la temperatura después de los 300°C. Es pertinente hacer notar, que este efecto de la temperatura sobre la conductividad térmica beneficia el comportamiento del concreto sometido a la acción del fuego, pues retrasa la penetración del calor a través de su espesor; De este modo, se menciona que en una típica columna de concreto reforzado expuesta a la prueba de incendio estándar durante dos horas, las temperaturas superiores a 300°C sólo alcanzan a penetrar en los 50 mm superficiales.

Al considerar los efectos que las altas temperaturas producen en las propiedades mecánicas del concreto, es posible convenir en que son dañinas en todos aspectos, aunque en diverso grado. Con carácter representativo de esta tendencia general, puede hacerse referencia al detrimento que manifiesta la resistencia mecánica del concreto (a compresión y tensión) como consecuencia de su calentamiento a temperaturas elevadas, según se producen los incendios. Al ser sometido a temperaturas que se incrementan a partir de la del medio ambiente hasta algo más de 400°C y debido a la influencia que ejercen las características de las rocas que constituyen los agregados.

Al referirse específicamente a la evolución de la resistencia a la compresión, se ha observado que al comenzar el calentamiento del concreto se produce un primer descenso de la resistencia que alcanza un mínimo inicial a una temperatura comprendida entre 60 y 90° C, aproximadamente. A partir de esta temperatura se manifiesta una recuperación de resistencia que puede llegar a restituir

al concreto en su resistencia original a una temperatura entre 150 y 200° C; pero a continuación de éstas se indica un segundo descenso de la resistencia, que es irreversible y conduce al concreto a perder resistencia de manera prácticamente proporcional al aumento de la temperatura.

Es conveniente recordar que, a una temperatura de 300° C, el concreto todavía conserva una resistencia a compresión que puede hallarse entre 75 y 100% de su resistencia original, dependiendo de las características de los agregados; sin embargo su resistencia a tensión a 300° C puede haber descendido hasta el 50% de su valor original. Esto significa que en un concreto que ha soportado temperaturas del orden de 300° C, debe confiarse menos en su resistencia a tensión que su resistencia a la compresión.

Debido a la relativamente baja conductividad del concreto y por el hecho de que ésta disminuye aún más conforme aumenta la temperatura, el acero de refuerzo recibe protección del concreto que lo recubre contra los incrementos de temperatura que se originan en el exterior de la estructura.

En lo que concierne al deterioro del acero de refuerzo después de un incendio, la presencia de deformaciones notables en los elementos estructurales que aparentemente resistieron al fuego, puede considerarse como un síntoma de que la varilla de refuerzo fue sometida a una temperatura mayor de 600° C, en cuyo caso es necesario verificar experimentalmente las propiedades mecánicas de dichas varillas. Otra situación que induce a la verificación experimental del acero de refuerzo, es cuando las varillas se observan al descubierto por desprendimiento del recubrimiento del concreto y también cuando el color del concreto a la profundidad del refuerzo hace sospechar que fue sometida a una temperatura mayor de 600° C.

Existen diversos factores que influyen en el comportamiento de una estructura de concreto al ser expuesta a las elevadas temperaturas de un incendio, entre los cuales cabe destacar: 1) el proceso térmico a que se expone la estructura, definido por la velocidad, duración y temperatura máxima de calentamiento, 2) el nivel de esfuerzo a que se encuentra sometido el concreto durante la acción del proceso térmico, 3) la naturaleza y porosidad de los agregados y 4) el estado de humedad del concreto, previo al calentamiento. A estos factores deben añadirse otros que son propios de cada estructura en lo individual, tales como las dimensiones, condiciones de refuerzo, espesores de recubrimiento y restricciones para el cambio de volumen de los elementos estructurales. En estas circunstancias, lo que en términos prácticos procede después de un incendio, es verificar el estado del concreto, el acero de refuerzo y las deformaciones de cada uno de los elementos que resistieron



el fuego y con esta información hacer una revisión estructural que permita dilucidar si la estructura: 1) si puede continuar prestando el servicio con una simple restauración, 2) si requiere una rehabilitación estructural y si ésta es factible o 3) si su grado de afectación es tal que debe ser demolida, parcial o totalmente.

Con relación al proceso térmico y a nivel de esfuerzo aplicado, es pertinente evocar las condiciones que normalmente prevalecen durante un incendio. En tales condiciones, al iniciarse el incendio, los elementos estructurales sometidos a sus respectivas cargas de servicio comienzan a incrementar su temperatura hasta cierto nivel y duración que dependen de las características del incendio y de las condiciones de exposición al fuego de cada elemento en particular. Si la temperatura máxima es suficientemente alta y sostenida, el concreto y/o acero de refuerzo pueden experimentar una degradación tal que haga fallar al elemento en cuestión bajo la acción de las cargas que soporte. Si no es así y el elemento no falla, al extinguirse el incendio comienza a descender su temperatura hasta recuperar el equilibrio con la del medio ambiente, de esta manera, aunque aparentemente resistió el incendio, la estructura puede haber sufrido un efecto detrimental cuya magnitud es necesario determinar.

En un elemento de concreto reforzado expuesto al fuego, el concreto es más susceptible de sufrir daño que el acero de refuerzo por varias razones: 1) la acción del fuego es directa sobre el concreto, en tanto que sobre el acero de refuerzo es amortiguado por el espesor del recubrimiento, 2) a igualdad de temperaturas, el concreto se demerita más en sus propiedades mecánicas que el acero de refuerzo y 3) la degradación del acero de refuerzo con el calentamiento tiende a ser reversible. es decir, al recuperar su temperatura inicial también recupera gran parte de sus propiedades originales, lo cual no ocurre en el concreto, cuyo deterioro de resistencia mecánica al calentarse es prácticamente irreversible. Debido a ello, es frecuente que las primeras indagaciones acerca de los daños por incendio se orienten hacia la verificación experimental del estado del concreto que estuvo expuesto al fuego. Si el concreto no manifiesta deterioro significativo y si además no existen deformaciones estructurales u otros aspectos visibles que lo justifiquen, puede suponerse que el acero de refuerzo tampoco haya sufrido merma permanente de propiedades. De lo contrario, también será necesario verificar experimentalmente el estado resultante de las varillas de refuerzo en las zonas afectadas por el incendio.

En el caso de la verificación del concreto, es particularmente útil definir si su temperatura no sobrepasó los 300°C, pues normalmente se admite que a temperaturas inferiores a 300° C el

concreto no manifiesta excesiva pérdida de resistencia a la compresión. Si se considera la reducida conductividad térmica del concreto en altas temperaturas, cabe esperar que se produzca una afectación decreciente de la resistencia a partir de la superficie de concreto expuesta al fuego, en función del gradiente térmico que se establezca con el tiempo a través del espesor.

Para evaluar el estado del concreto a diferentes profundidades, el medio usual consiste en extraer núcleos por barrenación, en los cuales puede aplicarse tres procedimientos complementarios para la obtención de datos que sirvan como elementos de juicio: 1) examen visual, 2) determinación de la resistencia mecánica y 3) examen petrográfico.

En la ejecución del examen visual, un aspecto importante se refiere a la identificación y delimitación del concreto por zonas de acuerdo con su coloración. Esto resulta útil porque se sabe que al aumentar la temperatura de calentamiento por fuego, el concreto cambia de color y pierde resistencia a la compresión de un modo que aproximadamente es como se indica en la siguiente tabla (4.2):

Intervalo aproximado de la temperatura ° C	Coloración del concreto	Resistencia residual del concreto a compresión % de la original
Menos de 300	Sin cambio	100 a 80
300 a 600	Rosa o rojo	80 a 40
600 a 900	Gris	40 a 20
Más de 900	Ocre	20 a 0

Tabla 4.2 Cambio de color y disminución de la resistencia a compresión del concreto al aumentar la temperatura

De esta manera, al determinar en los núcleos la profundidad a la cual termina el concreto de color rosa y principia el concreto con su color original, es posible estimar aproximadamente el espesor de concreto superficial que sufrió temperaturas mayores a 300° C y por consiguiente debería ser eliminado y repuesto con un nuevo concreto, en caso de optarse por la rehabilitación de la estructura. Así mismo, observando el color del concreto a la profundidad en que se halla colocado el acero de refuerzo, es también posible hacer una estimación aproximada de la temperatura a que éste fue sometido durante el incendio.

De hecho el examen visual del concreto y en especial la determinación de sus cambios de color por el fuego, es de ordinario parte integrante del examen petrográfico del concreto endurecido cuando se realiza de conformidad con la Norma ASTM C 856. En éste, para hacer la estimación de las temperaturas a las que estuvo sometido el concreto durante un incendio, se utiliza la siguiente escala aplicable a concretos con agregados sedimentarios y metamórficos y que es similar a la tabla anterior.

Color del concreto	Temperatura ° C
Normal (sin cambio)	Menos de 290
Rosado o rojo	De 290 a 590
Gris	De 590 a 900
Ocre	Más de 900

Mediante el mismo examen petrográfico se determinan, además de los cambios de coloración, otras características del concreto relacionadas con las temperaturas que soportó durante el incendio; por ejemplo, algunos datos que se emplean como elementos de juicio, son: 1) el concreto se deshidrata a 100 ° C, sólo pierde el agua libre, 2) la deshidratación del concreto es completa cuando se somete a 540 ° C, 3) el hidróxido de calcio del concreto se convierte a óxido de calcio a una temperatura entre 450 y 500° C (fotografía 4.4).

De acuerdo a la Norma ASTM C 856 las características que se pueden observar y reportarse cuando el concreto ha sido expuesto se citan a continuación:

**Característica: Dureza de la superficie**

Causa y efecto: La deshidratación a 100°C remueve el agua libre, la deshidratación se completa esencialmente a 540°C, el hidróxido de calcio se transforma a óxido de calcio a temperaturas de 450 a 500°C. La pasta se expande con efectos de coeficiente termal y entonces se contrae, se rompe, decrepita y empieza a ser blanda.

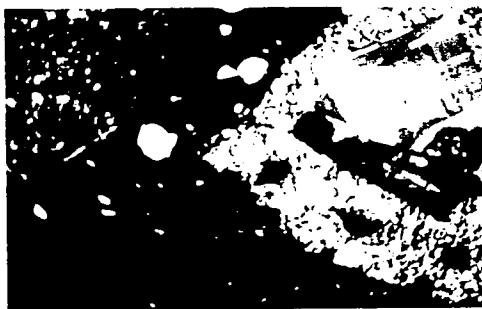
**Característica: Rompimiento**

Causa y efecto: Fracturamiento perpendicular a la cara interna, cuando se calienta o enfría causa exceso de presión y/o tensión, puede penetrar hasta 10 cm.

**Característica: Cambio de color**

Causa y efecto: Concretos fabricados con agregados sedimentarios o metamórficos presentan permanentes cambios de color al calentarse de acuerdo a la temperatura de

exposición. A temperaturas de 573°C el cuarzo alfa, se convierte en cuarzo beta con un incremento de 0.85% en su volumen observándose estructuras similares a las de las palomitas de maíz.



Fotografía 4.4: Fotomicrografía que muestra la pasta de un concreto expuesto a fuego, donde se observa el comportamiento completamente opaco de la pasta y microfracturamiento de la muestra, a) con luz polarizada, b) con doble polarización.

## CONCLUSIONES

♣ Hasta la fecha la participación del ing. geólogo en la industria de la construcción y en especial en lo relacionado con el concreto ha sido escasa; pero realmente la injerencia que tiene en la producción del cemento, la elaboración del concreto y en el monitoreo de las estructuras de concreto es fundamental.

♣ Para la producción de cemento es necesario localizar bancos de materiales que sirvan como proveedores de materia prima con características adecuadas par poder elaborar el cemento y la calidad de las rocas se determina en gran medida por métodos petrográficos.

♣ En la de producción de clinker, un método de control de calidad, se efectúa mediante estudios petrográficos.

♣ En la elaboración de concreto, se debe utilizar agua que cumpla con las Normas oficiales establecidas, por lo que es necesario localizar acuíferos que la provean.

♣Una vez construida la estructura de concreto es necesario realizar monitoreos de control de calidad, por métodos petrográficos, que permitan emitir una opinión de la condición en la que se encuentra la estructura, de tal forma que con la participación de especialistas en concreto determinar el futuro próximo de la estructura.

♣ En toda etapa de construcción es necesario llevar una bitácora en la cual se deberá incluir los resultados de los estudios petrográficos efectuados a los agregados y al concreto.

♣En la asignatura de Petrología Sedimentaria de la carrera de Ing. Geólogo se puede contemplar incluir los aspectos Petrográficos del Concreto

## BIBLIOGRAFIA

- Ames. J. A., "Cement and Cement raw Materials" Withey Morton, N.Y. 1954
- Arce F. Alvaro, 1994, "Impermeabilizantes hidrófugos", Rev. Construcción y Tecnología, vol. VI, n° 71, IMCYC, México.
- Ariza S. Iran, 1999, "Coeficiente volumétrico del agregado: modificaciones al comportamiento del concreto", Rev. Construcción y Tecnología, vol. XI, n° 130, IMCYC, México.
- Barker Daniels S., 1983, "Igneous Rocks", Pretince Hall, E.U.
- Campbell Donal. Ph., 1986, "Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clincker", Construction Technology Laboratories, Portland Cement Association, E.U.
- Carver E. Roberto, 1971, "Procedures in Sedimentary Petrology", John Wiley and Sons, Inc. N.Y.
- Castillo V. H., 1992, "Estudio de los efectos del agua tratada en el concreto premezclado", Rev. Construcción y Tecnología, vol. IV, n° 48, IMCYC, México .
- Comisión Federal de Electricidad, 1994, "Manual de Tecnología del Concreto", Ed. Limusa, Vol. I, II y III, México.
- Cottier Caviades J.L., 1993, "Efectos de la Reacción Alkali-Agregado en el Concreto", Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Cottier Caviades J.L., 1991, "Patología en las obras", Rev. Construcción y Tecnología, vol. IV, n° 40, IMCYC, México
- Dent-Glasser, and Katakoo, N., 1981, " The Chemistry of Alkali-Agregate Reaction" Fifth International Conference on Alkali-Agregate reactions, E.U.
- Flores Bustamante A., 2000, "Concretos de alta resistencia", Rev. Construcción y Tecnología, vol. XIII, n° 151, IMCYC, México.
- Fire Proteccion Planning Report Building Construction Information, 1991, "Protección contra fuego", Rev. Construcción y Tecnología, vol.IV, n° 43, IMCYC, México.
- Fragoso Estrella R., 1995, "Efectos de la Reacción Alkali-Agregado en el Concreto", Tesis de Maestría Fac. Ing. UNAM, México.
- Hatch F. H. and Wells A. K., 1973, "Petrology of the Igneous Rocks", Hafner Press, Great Britian.
- Heinrich E. WM., 1972, "Petrografía microscópica", Edicines Omega, Barcelona.

- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 1992, "**Agregados: Suministro y Almacenamiento**" El Concreto en la Obra, Fomento Editorial IMCYC, México.
- Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, 1994, "**Resistencia al fuego de muros con bloques de concreto**", Rev. Construcción y Tecnología, vol. VII, n° 78, IMCYC, México.
- Jacobs Frank, 2000, "**Hacia un concreto ecológico**", Rev. Construcción y Tecnología, vol. XII, n° 141, IMCYC, México.
- Jones, F.E, and Tarleton, R.D, 1958, "**Reaction Between Aggregates and Cement**", National Building Research, paper 25, London.
- Kerr Paul F., 1959, "**Optical Mineralogy**", McGraw-Hill, N.Y.
- Kosmatka Steven H, 1992, "**Diseño y Control de Mezclas de Concreto**", Fomento Editorial IMCYC, México
- Kosmatka Steven H. 1986, "**Petrographic analysis of concrete**", Concrete Technology Today, pl 862b, Portland Cement Association. E.U.
- Kumar Metha P., 2000, "**Avances en la tecnología del concreto**", Rev. Construcción y Tecnología, vol.XIII, n° 149, IMCYC, México.
- Krynini Dimitri P., 1961, "**Principios de geología y geotecnia para ingenieros**", ed. Omega, Barcelona.
- Lea, F.M, 1971, "**The Chemistry of Cement and Concrete**" E. Arnold Publ. Ltd. London.
- Lopez Ramos E., 1979, "**Geología de México**", Vol. II y III, México
- Mena F. M, 1993, "**Reacción Alkali-Silice en el Concreto: Causa, Efectos y medios de prevención**", Rev. Construcción y Tecnología, vol. VI, IMCYC, México.
- Milovski A.V y Kónonov O.V., 1982, "**Minerlogía**" Ed. Mir Moscú.
- Montani R., 2000, "**La carbonatación, enemigo olvidado del concreto**" Rev. Construcción y Tecnología, vol. XIII, n° 151, IMCYC, México.
- Moran Zenteno D., 1984, "**Geología de la República Mexicana**" INEGI, México.
- Moreno J 1996, "**Cementos con poca demanda de agua**", Rev. Construcción y Tecnología, vol. VIII, n° 94, IMCYC, México.
- Natesaiyer, K. and Hover, K.C., 1988, "**Insitu Identification of Alkali-Silica Reaction Products in Concrete**", Cement Concrete Res., E.U.
- Neville M. Adams., 1992, "**Tecnología del Concreto**", Fomento Editorial IMCYC, México.

Obla Karthik H., 2001 "**Propiedades del concreto que contiene ceniza volante ultrafina**", Rev. Construcción y Tecnología, vol. XIII, n° 153, IMCYC, México.

Pettijohn F. J., 1975, "**Sedimentary Rocks**", Harper and Row, Publishers, London.

Reineck H.E. and Singh I.B., 1975, "**Depositional Sedimentary Environments**" Springer-Verlag N.Y.

Rodríguez V. Victor, 1994, "**Agregados y aditivos para los concretos estructurales**" Rev. Construcción y Tecnología, vol. VI, n° 71, IMCYC, México.

Saldivar M. Hector, 1994, "**Método para la identificación de la reacción alcali-silíce**", Rev. Construcción y Tecnología, vol. VII, n° 77, IMCYC, México.

Swamy, R. N., 1992, "**The alkali-Silica Reaction in Concrete**", Blackie Glasgow, First published, London.

Swamy, R. N., 1990, "**Alkali-Silica Reaction and Concrete Structures**", Structural Engineering Review, Vol 2, E.U.

Turner Francis J., 1982, "**Petrography, An Introduction to the Study of Rocks in the Sections**", Freeman and Company N.Y.

Uribe Affif, R., 1991, "**El Control de Calidad en los Agregados para Concreto**", Rev. Construcción y Tecnología, Vol. IV, n° 38, IMCYC, México.

Vásquez Rojas A., 2001, "**Elaboración de concretos con agua tratada**", Rev. Construcción y Tecnología, Vol. XIII, n° 155, IMCYC, México.

Wolfram O. B., 1994, "**Importancia del diseño en la protección contra incendios**", Rev. Construcción y Tecnología, vol. VI, n° 70, IMCYC, México.

#### **Sitios WEBS y Normas**

<http://www.concrete-experts.com>

<http://www.cruzazul.com.mx>

<http://www.cmoctezuma.com.mx>

<http://www.cemex.com.mx>

<http://www.gcc.com>

<http://www.inegi.gob.mx>

<http://www.imcyc.com>

<http://www.portcement.org>



<http://www.members.aol.com/crushtone/>

<http://www.amazon.com>

<http://www.sorrel.humboldt.edu>

ASTM C 856 "Examination of Hardened Concrete"

ASTM C 295 "Practice for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete"

NOM-C-111, "Industria de la Construcción -Concreto-Agregados-Especificaciones".

NOM -C-265, "Industria de la Construcción-Agregados para Concreto-Examen Petrográfico-Método de Prueba".