



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

SUSTANCIAS REACTIVAS NOCIVAS EN LOS AGREGADOS PARA CONCRETO

Diana Carolina Sierra Lemus

Asesorada por el Ing. Emilio Beltranena Matheu

Guatemala, marzo de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SUSTANCIAS REACTIVAS NOCIVAS EN LOS AGREGADOS
PARA CONCRETO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

DIANA CAROLINA SIERRA LEMUS

ASESORADA POR EL ING. EMILIO BELTRANENA MATHEU

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MARZO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Manuel Galván Estrada
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**SUSTANCIAS REACTIVAS NOCIVAS EN LOS AGREGADOS
PARA CONCRETO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 22 de enero de 2003.

Diana Carolina Sierra Lemus

ACTO QUE DEDICO A

DIOS

Que con su gran amor ha estado a mi lado cada día de mi vida, ayudándome a alcanzar mis metas.

MIS PADRES

Mario Sierra López y Carmen Lemus de Sierra, con suma gratitud por su entrega, amor, esfuerzo y sacrificio.

MIS HERMANAS

Nancy, Karen y Laura, con cariño por su apoyo y comprensión

MIS ABUELOS

Egidio Lemus
Victoria de Lemus (†)
Carlos Sierra (†)
Guadalupe de Sierra (†)
por su afecto y fe en Dios

MI NOVIO

Angel Mario González, por su amor y apoyo.

MIS FAMILIARES Y

AMIGOS EN GENERAL

Especialmente a mi cuñado y sobrino, gracias por su cariño y amistad.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Emilio Beltranena Matheu

Por el tiempo y asesoría brindada para la realización de este trabajo.

Al Centro de Investigaciones de
Cementos Progreso, S.A.

En especial a las personas que me brindaron su ayuda y confianza para el desarrollo del estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
GLOSARIO	V
RESUMEN	IX
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
JUSTIFICACIÓN	XV
1. FUNDAMENTOS SOBRE EL CONCRETO	01
1.1 Composición del concreto	01
1.2 Cualidades deseables del concreto	02
1.2.1 Trabajable – manejable	02
1.2.2 Uniforme	02
1.2.3 Resistente	03
1.2.4 Volumétricamente estable	03
1.2.5 Durable	04
1.3 Durabilidad del concreto	04
1.3.1 Requisitos para la obtención de un concreto durable	08
2. AGREGADOS PARA CONCRETO	11
2.1 Generalidades	11
2.2 Clasificación de los agregados	12
2.2.1 Composición entre agregados naturales y artificiales	13
2.3 Composición mineralógica	14
2.4 Designación y tamaños del agregado	15
2.4.1 Granulometría de los agregados	16

3. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO	21
3.1 Propiedades físico-mecánicas	21
3.2 Propiedades químicas	22
4. SUSTANCIAS EN LOS AGREGADOS QUE AFECTAN QUÍMICAMENTE LA DURABILIDAD DEL CONCRETO	27
4.1 Impurezas orgánicas de origen vegetal	27
4.2 Material fino objetable	29
4.3 Componentes mineralógicos con sílice amorfa reactiva	29
4.3.1 Síntomas visuales de una reacción expansiva álcali - sílice	31
4.3.2 Identificación de un agregado potencialmente reactivo	35
4.4 Carbonatos reactivos	37
4.4.1 Síntomas visuales de una reacción expansiva álcali – carbonato	38
4.4.2 Identificación de un agregado potencialmente reactivo	40
4.5 Ataque por sulfatos	42
4.5.1 La etringita en el concreto y sus formas	44
4.5.2 Pruebas sobre resistencia a sulfatos	46
4.6 Cloruros	46
4.7 Sulfuros	48
5. RESULTADOS OBTENIDOS	51
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFIA	71
APÉNDICE	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Composición del concreto	01
2.	Causas de la pérdida de durabilidad y del deterioro	05
3.	Factores que influyen en la durabilidad del concreto armado	06
4.	Agregado fino	15
5.	Agregado grueso	15
6.	Tamaño de las partículas de un agregado obtenidas por tamizado	16
7.	Tamiz con aberturas cuadradas	16
8.	Deterioro del concreto por reactividad álcali – agregado	30
9.	Expansión causada por una ASR	32
10.	Agrietamiento de un pavimento	32
11.	Erupciones causadas por un agregado fino	33
12.	Erupciones causadas por un agregado grueso	34
13.	Decoloración del concreto a través de las grietas	34
14.	Agrietamiento del concreto causado por una ACR	38
15.	Oquedad o agujero en el concreto relleno de gel carbonatado causado por una reacción ACR	39
16.	Reactividad álcali - carbonato	42
17.	Esquema de posibles ataques internos de sulfatos en el concreto	43
18.	ASTM C289 (arena fuente A)	53
19.	ASTM C289 (arena fuente B)	54
20.	ASTM C289 (arena fuente C)	55
21.	ASTM C289 (arena fuente D)	56
22.	ASTM C289 (piedrín fuente A)	57
23.	UNE 146507-2 (dolomita fuente E)	59
24.	UNE 146507-2 (dolomita fuente F)	60

TABLAS

I.	Requisitos de granulometría para los agregados gruesos	17
II.	Requisitos de granulometría para los agregados finos (ASTM C33)	18
III.	Límites permitidos de sustancias nocivas en los agregados finos	19
IV.	Contenido máximo de finos en el agregado	20
V.	Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión	48
VI.	Materia orgánica (ASTM C40)	51
VII.	Azul de metileno (AASHTO TP57-99)	52
VIII.	Reactividad álcali – sílice (ASTM C289)	52
IX.	Reactividad álcali – sílice (ASTM C1260)	58
X.	Reactividad álcali – carbonato (ASTM C586)	58
XI.	Reactividad álcali – carbonato (UNE 146807-2)	59
XII.	Análisis petrográfico	61
XIII.	Sulfatos solubles en ácido (EN 1744-1)	62
XIV.	Cloruros solubles en agua (EN 1744-1)	62
XV.	Masa mínima de la sub-muestra preliminar (EN 1744-1)	87

GLOSARIO

ACR	Reacción álcali – carbonato.
ASR	Reacción álcali – sílice.
Aditivo	Material añadido en pequeñas cantidades con relación a la masa del cemento, antes o durante la mezcla del mortero, de manera que aporten a sus propiedades determinadas modificaciones bien definidas.
Aglomerante	Material para unir o enlazar los materiales pétreos naturales o artificiales de mampostería o albañilería.
Agregados	Materiales pétreos “inertes” resultantes de la desintegración natural de las rocas, u obtenidos de la trituración de las mismas o de otros materiales inertes suficientemente duros.
ASTM	Siglas de la Sociedad Americana para los Ensayos y los Materiales (American Society for Testing and Materials), actualmente designada como ASTM Internacional.
AASHTO	Siglas de la Asociación Americana de Oficiales Estatales de carreteras y del transporte (American Association of State Highway and Transportation Officials).
Coguanor	Siglas de la Comisión Guatemalteca de Normas.

Densidad	Expresión que relaciona el peso y el volumen de un producto.
Dolomía	Roca caliza, carbonato doble natural de cal y magnesia.
Eflorescencia	Depósitos cristalinos, usualmente blancos de sales solubles en agua, sobre la superficie o en los poros de una construcción.
Exudación	Migración del agua libre a través del mortero en estado plástico, hacia la superficie.
Granulometría	Distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, tal como se determina por análisis de tamices (norma ASTM C136).
Lixiviación	La disolución selectiva de un componente en una mezcla sólida, mediante un disolvente líquido.
Mortero	Mezcla de uno o varios aglomerantes, minerales, agregados y agua y a veces adiciones y/o aditivos.
Norma	Regla general que debe seguirse o debe ajustarse a un proceso, producto o servicio que se repite múltiples veces con idéntico resultado.
PH	Por conveniencia la concentración del ión hidrógeno se expresa como PH, que se define como el logaritmo negativo de la concentración del ión hidrógeno.
PPM	Partes por millón.

Tamiz

Cedazo muy tupido.

Trabajabilidad

Medida de la habilidad de un mortero en estado plástico, a ser manejado por una cuchara o pala de albañil. Además de adherirse, deslizarse y desplegarse fácilmente en las unidades de mampostería.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación pretende destacar la importancia de determinar la presencia de sustancias reactivas nocivas, de los agregados y tomarlas en cuenta para evaluar la calidad de los mismos, con el objeto de comparar los valores contenidos de estas sustancias, con las especificaciones establecidas en las normas ASTM y otras complementarias como AASHTO, UNE o EN.

Se evaluaron cinco muestras al azar de agregados típicos de los que se emplean actualmente en Guatemala, tres muestras de arenas de ríos del área metropolitana de Guatemala y dos muestras de arenas y piedrín de canteras del área metropolitana de Guatemala.

Para evaluar la presencia de sustancias reactivas nocivas en los agregados muestreados se realizaron diversos análisis de laboratorio, utilizando las siguientes normas: materia orgánica ASTM C40, azul de metileno AASHTO TP57-99, reactividad álcali – sílice ASTM C289, reactividad álcali – sílice ASTM C1260, reactividad álcali – carbonato ASTM C586, reactividad álcali – carbonato UNE 146507-2, análisis petrográfico ASTM C295, sulfatos solubles en ácido EN 1744-1 y cloruros solubles en agua EN1744-1.

Los resultados obtenidos se compararon con las especificaciones establecidas para cada sustancia nociva reactiva, para ver si existió una variación significativa entre ambos, y determinar el grado del daño a la durabilidad del concreto al utilizar los agregados analizados.

OBJETIVOS

General

Evaluar los contenidos de sustancias reactivas nocivas en los agregados para concreto, mediante ensayos de laboratorio normalizados.

Específicos

1. Obtener y evaluar los contenidos de sustancias reactivas nocivas de cuatro agregados para concreto, existentes en el área metropolitana de la ciudad de Guatemala.
2. Analizar dichos resultados con los requerimientos necesarios para satisfacer las normas ASTM y otras complementarias como AASHTO, UNE o EN.

INTRODUCCIÓN

El concreto es una piedra artificial formada por materiales conglomerantes (cemento hidráulico o mezclas de cemento hidráulico y otros materiales cementantes), agua y agregados. Los conglomerantes al reaccionar con el agua y endurecer, funcionan como un pegamento que aglutina y cohesiona a los agregados.

El concreto, gracias a su relativo bajo costo, su disponibilidad, versatilidad y adecuadas propiedades ingenieriles y arquitectónicas, es sin duda el material de construcción más usado en el mundo. Esto se puede apreciar en la variedad de estructuras y construcciones en el que se emplea, desde carreteras, puentes y edificios hasta pisos, banquetas e incluso obras de arte.

Son muchos los factores internos y externos que determinan la calidad y desempeño del concreto, pero definitivamente las propiedades físicas, químicas y el contenido de sustancias reactivas nocivas de los agregados, tienen una influencia importante, ya que los mismos constituyen del 60% al 75% del volumen del concreto.

Los agregados para concreto, tanto los gruesos (gravas y piedrines) como los finos (arenas naturales, manufacturadas o productos de trituración) pueden tener características y comportamientos variables, dependiendo tanto de su composición mineralógica y química, como de su tamaño máximo, graduación de tamaños, forma, textura y presencia en los mismos de materiales o sustancias perjudiciales, materia orgánica vegetal, partículas de baja densidad, suaves o friables (deleznables), planas, alargadas y reactivas (que contienen sílice soluble, álcalis, carbonatos, sulfatos, sulfuros u otras sustancias que puedan ser nocivas al concreto).

La evaluación de los agregados para concreto se hace con base en métodos de ensayo normalizados. En América Latina y Guatemala, los más usados son los de la ASTM (American Society for Testing and Materials) y los de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), entre los cuales hay muy pocas diferencias. Otro grupo importante de métodos de ensayo normalizados son los europeos y los de ISO, que por lo general son muy similares entre sí.

Las normas nacionales COGUANOR están basadas en normas ASTM, pero no hay a la fecha normas para agregados.

En el presente trabajo se usarán normas ASTM principalmente y normas europeas (EN) o españolas (UNE) en casos donde no haya normas ASTM aplicables.

En general, los agregados se han evaluado más que todo por sus propiedades físicas y mecánicas, y se ha dado poca atención a sus propiedades químicas, especialmente en países en vías de desarrollo, debido a que en el concreto se ha dado mucha importancia a la resistencia y si había buena resistencia se daba por aceptado que era durable.

No obstante, en la época actual ya se ha reconocido la importancia de la durabilidad del concreto y la evaluación de su impacto ambiental, asimismo se busca una utilización y optimización de recursos compatibles con el modelo de desarrollo sostenible. Esto ha traído como consecuencia que de unos años a la fecha se de mucho mayor importancia a factores que puedan contribuir al deterioro del concreto.

El presente trabajo pretende destacar la importancia de determinar la presencia de sustancias reactivas nocivas de los agregados, y tomarlas en cuenta para evaluar la calidad de los mismos.

JUSTIFICACIÓN

El estudio sobre las sustancias reactivas nocivas de los agregados para concreto, y la descripción y discusión de los ensayos normalizados ASTM, EN o UNE que se realizan para determinarlas, tiene la finalidad de exponer a todo el gremio de la construcción, tanto ingenieros como constructores, técnicos, productores o proveedores, la importancia de la determinación de dichas sustancias y su influencia decisiva en la calidad del concreto.

En el caso de Guatemala y la mayoría de países latinoamericanos, todas las regiones centrales de la Cordillera de los Andes y vertientes de la misma hacia el Océano Pacífico son de formaciones volcánicas de diversa índole, predominando como agregados los materiales de rocas volcánicas extrusivas en depósitos aluviales o eólicos.

En Guatemala, en toda la franja central y sur de la cordillera central, y casi toda la costa sur, predominan los materiales volcánicos. En el Progreso, las Verapaces e Izabal hay mucho material sedimentario y de origen metamórfico. En el norte de Huehuetenango, Quiché y El Petén, predominan los materiales sedimentarios. En San Marcos y Quetzaltenango hay algunos depósitos y formaciones de rocas intrusivas (granitos), pero predominan las rocas volcánicas extrusivas.

En el propio valle de Guatemala, las arenas y gravas de todos los ríos y vertientes de aguas fluviales o de desagües, son predominantemente volcánicas y contienen una relativamente alta proporción de material piroclástico (pómez).

Los materiales volcánicos pueden contener minerales reactivos con los álcalis del cemento, o contenidos en los propios agregados o el concreto, produciendo reacciones expansivas destructivas. La presencia de estos materiales se detecta por un examen petrográfico y sus efectos por varios métodos de ensayo para determinar la reactividad potencial álcali-sílice.

También entre los materiales sedimentarios, algunos agregados de calizas dolomíticas pueden ser susceptibles a reacciones expansivas álcali-carbonato, y puede ser detectada la presencia de carbonatos potencialmente reactivos y su grado de reactividad.

Hay algunas rocas metamórficas que pueden contener piritas, marcasitas u otros sulfuros que causan reacciones destructivas. Asimismo la presencia de sulfatos en los agregados es perjudicial porque pueden reaccionar con la cal libre o cal de hidrólisis de los cementos, además de contribuir a daños físicos por expansión en los poros del agregado o del concreto, de las cristalizaciones de sales de sulfatos (muy solubles en agua), procedentes de suelos o aguas en contacto con el concreto.

La presencia de cloruros en los agregados, agua de mezcla o en el cemento es dañina porque favorece y acelera la oxidación del refuerzo del acero del concreto reforzado.

La materia orgánica de origen vegetal se encuentra frecuentemente en agregados naturales sacados de ríos y lagos. Puede causar retardo en la reacción de los cementos con el agua y retardo en el desarrollo de resistencia de morteros y concretos.

De lo anterior se deduce que para nuestro país y en especial para el área metropolitana de la ciudad de Guatemala, es necesario y de gran beneficio conocer y aplicar los ensayos que detectan las sustancias reactivas nocivas de los agregados para evaluar su calidad.

1. FUNDAMENTOS SOBRE EL CONCRETO

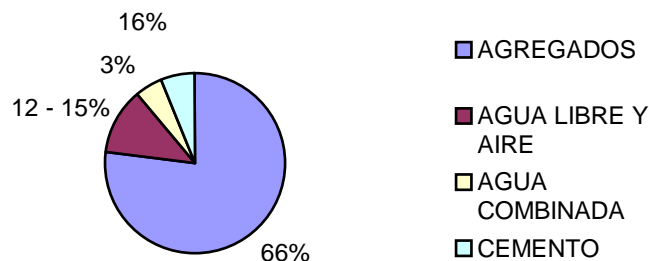
El concreto es una piedra artificial, formada por una parte de materiales aglutinantes o aglomerantes (cemento, agua, pasta de cemento) y por otra parte de materiales agregados. Los aglutinantes o aglomerantes al fraguar primero y endurecer más tarde, funcionan como una cola que vincula a los últimos entre sí, comunicándoles una cohesión que no poseían antes en su estado suelto natural. (9-1)

1.1 Composición del concreto

Los 5 componentes básicos del concreto son (Figura 1):

- Cemento
- Agua
- Aire
- Agregado fino
- Agregado grueso

Figura 1. Componentes básicos del concreto (3-1)



1.2 Cualidades deseables del concreto

1.2.1 Trabajable – Manejable

La facilidad de colocar, consolidar y acabar el concreto recién mezclado se denomina trabajabilidad. El concreto debe ser trabajable pero no se debe segregar ni exudar excesivamente. La exudación es la migración del agua hacia la superficie superior del concreto recién mezclado provocada por el asentamiento de los materiales sólidos – cemento, arena y piedra – dentro de la masa. El asentamiento es consecuencia del efecto combinado de la vibración y de la gravedad.

El aire incluido mejora la trabajabilidad y reduce la tendencia del concreto fresco a segregarse y exudar. Gracias a esta mejora de trabajabilidad, el contenido de agua y de arena se puede reducir de manera muy notoria

1.2.2 Uniforme

Para asegurarse que los cinco componentes básicos del concreto estén combinados uniformemente se requiere de esfuerzo y cuidado. La secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora representa un papel importante en la uniformidad del producto terminado. Sin embargo, se puede variar esa secuencia y aún así producir concreto de calidad. Las diferentes secuencias requieren ajustes en el tiempo de adicionamiento de agua, en el número total de revoluciones del tambor de la mezcladora, y en la velocidad de revolución. (9-2)

1.2.3 Resistente

La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia a compresión medida de un espécimen de concreto o de mortero a carga axial. Generalmente se expresa en Newtons por milímetro cuadrado, Megapascales o en Libras por pulgada cuadrada a la edad especificada, generalmente veintiocho días y se designa como $f'c$.

Los principales factores que afectan a la resistencia son la relación agua-cemento y la edad, o el grado al que haya progresado la hidratación.

1.2.4 Volumétricamente estable

El concreto endurecido presenta ligeros cambios de volumen debido a variaciones en la temperatura, en la humedad y en los esfuerzos aplicados. Estos cambios de volumen o de longitud pueden variar aproximadamente 0.01% hasta 0.08%. En el concreto endurecido los cambios de volumen por temperatura son casi los mismos que para el acero.

El concreto que se mantiene continuamente húmedo se dilatará ligeramente. Cuando se permite que seque, el concreto se contrae. El principal factor que influye en la magnitud de la contracción por secado es el contenido de agua del concreto recién mezclado. La contracción por secado aumenta directamente con los incrementos de este contenido de agua. La magnitud de la contracción también depende de otros factores, como las cantidades de agregado empleado, las propiedades del agregado, tamaño, forma de la masa de concreto, temperatura y humedad relativa del medio ambiente, método de curado, grado de hidratación y tiempo. (9-10)

1.2.5 Durable

El concreto debe ser capaz de mantener su integridad y desempeño durante todo el período de su vida útil, en las condiciones de servicio previstas. Esto implica capacidad de resistir las acciones físicas, mecánicas, químicas y biológicas aisladamente, o combinadas a las que haya de estar sujeto. La durabilidad entendida en esa forma es causada por el deterioro o envejecimiento progresivo al que están sujetas las estructuras por los agentes mencionados. Hay otro concepto involucrado en la durabilidad de las estructuras que es la obsolescencia o anticuamiento, derivadas de las mejoras y avances tecnológicos en materiales, el cual no será considerado en el presente trabajo. En el numeral 1.3 se trata el tema de la durabilidad en forma más amplia.

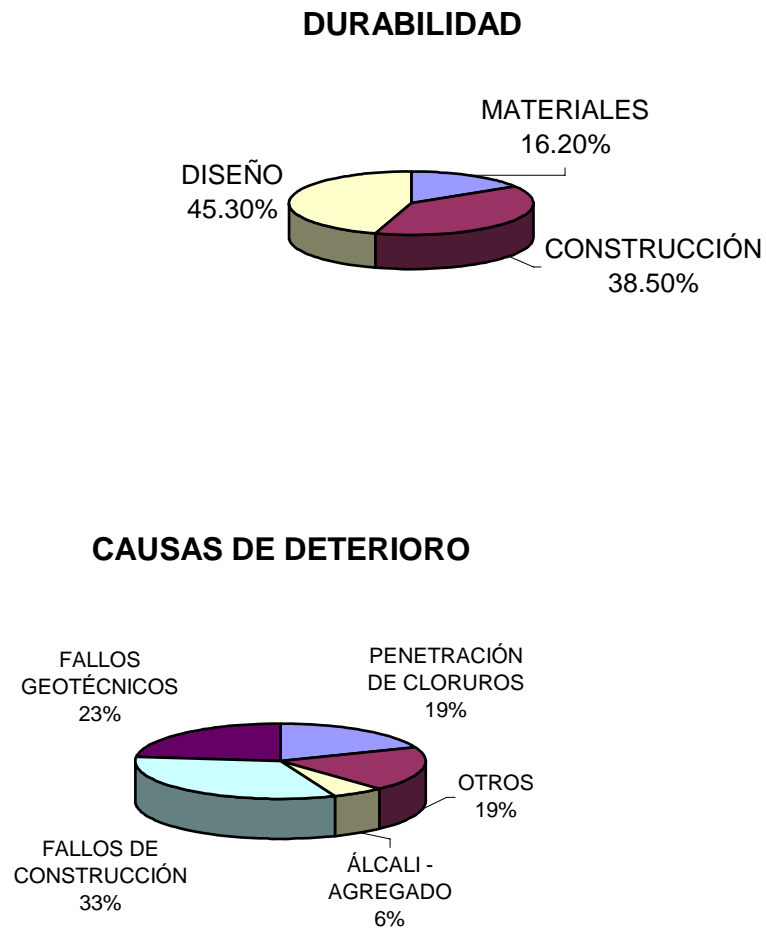
1.3 Durabilidad del concreto

Se entiende por durabilidad del concreto a su resistencia a las influencias de los factores internos y externos a los cuales está expuesto durante su período de vida útil y en las condiciones normales de servicio previstas.

Depende de la capacidad de los materiales y elementos constructivos para cumplir con los requerimientos previstos durante dicho período bajo las condiciones ambientales de servicio y ocupación normales.

Aunque es difícil realizar un estudio estadístico fiable sobre las causas que producen problemas de durabilidad en estructuras de concreto, se han realizado algunos estudios que tratan de dar una idea de la situación española a principios de los años 80, en los que se atribuye el fallo a defectos en la calidad de los materiales un 16.2%, siendo los errores de ejecución el 38.5% y más del 40% a errores de diseño y/o cálculo (Figura 2). Otros estudios más recientes elevan al 30% la inadecuada selección del material como la causa de falta de durabilidad. Esto da una idea de la importancia que tiene la buena selección de los materiales ya desde la fase misma del proyecto.

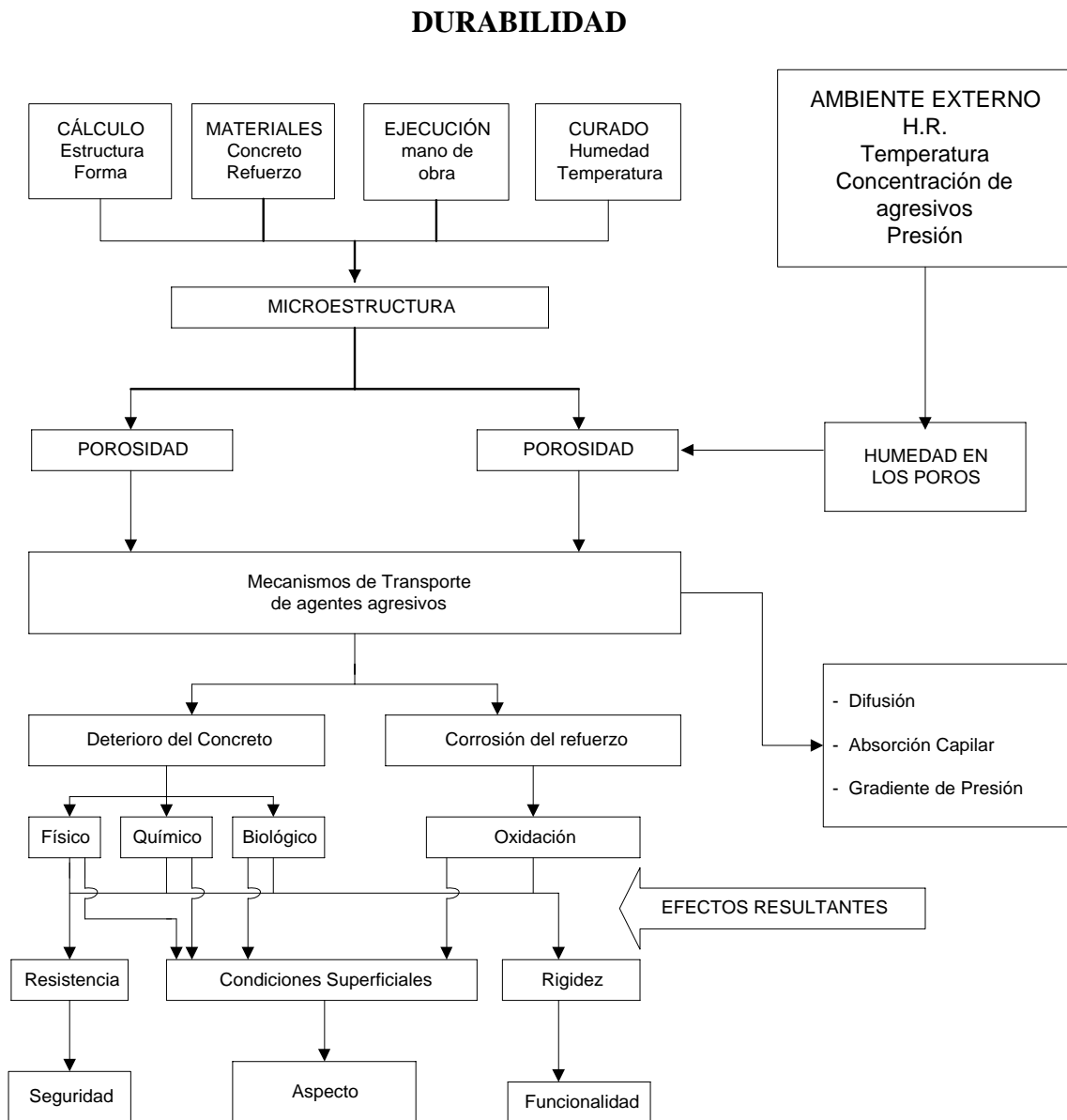
Figura 2. Causas de la pérdida de durabilidad y del deterioro (12-1)



En el caso de la durabilidad del concreto hay que recordar que puede experimentar alteraciones como consecuencia de la acción de agentes agresivos internos o externos, los cuales se caracterizan por producir efectos nocivos que se manifiestan en forma de erosiones, fisuras, expansiones, etc.

En el concreto reforzado (armado) la durabilidad dependerá tanto de las características del concreto y del acero como de la interrelación entre ambos (Figura 3). Asimismo, la estructura porosa resultante y la fase acuosa contenida en los poros influyen de forma decisiva sobre la accesibilidad de agentes agresivos externos hasta la armadura de refuerzo de acero, ya que el contenido de fase líquida en los poros influye enormemente en la velocidad de difusión de gases e iones, a la vez que dicha fase acuosa actúa como medio electrolítico en los procesos de corrosión del acero.

Figura 3. Factores que influyen en la durabilidad del concreto armado (12-2)



En cuanto a las causas del deterioro, estas pueden ser físicas, mecánicas, químicas y biológicas.

Las causas físicas incluyen efectos de altas o bajas temperaturas, humedad y secado y cambios volumétricos asociados. Una causa muy importante en muchos países es la acción de congelamiento y deshielo alternados, y la acción química asociada de las sales para descongelar.

Las causas mecánicas son derivadas de la acción de cargas o fuerzas de viento, sísmicas y otras externas. Casos especiales son los daños por impacto, abrasión, erosión o cavitación.

Las causas químicas incluyen las reacciones álcali-sílice y álcali-carbonato producidas por reacción agregados-álcalis del cemento o en el concreto. Ataques externos o internos a través de la acción de iones agresivos de cloruros, sulfatos, sulfuros, dióxido de carbono y otros provenientes de líquidos y gases naturales o industriales, y de la contaminación del ambiente circundante (aire, suelo y agua)

Las causas biológicas incluyen la acción de microorganismos, hongos y bacterias.

Los procesos químicos, físicos y biológicos del deterioro, usualmente actúan de una manera sinérgica y el deterioro del concreto raramente es producto de una sola causa aislada.

A excepción del daño mecánico, y del desgaste por abrasión, la mayoría de los efectos adversos sobre la durabilidad del concreto, están asociados a la difusión de fluidos gaseosos o líquidos a través de la masa del concreto, por lo que la porosidad, absorción, permeabilidad y difusión son características muy importantes en relación con la durabilidad.

No se entrará en detalles, ya que no compete al tema de este trabajo, pero sí es un hecho que un concreto impermeable o impermeabilizado adecuadamente es la mayor defensa para evitar el deterioro por causas externas, especialmente las químicas y biológicas.

Dentro de las causas químicas de deterioro del concreto, son importantes las derivadas de la presencia de las siguientes sustancias reactivas nocivas en los agregados:

- a) Materia o impurezas orgánicas de origen vegetal
- b) Humus y arcilla
- c) Componentes mineralógicos con sílice amorfa reactiva
- d) Carbonatos reactivos
- e) Cloruros
- f) Sulfatos
- g) Sulfuros

1.3.1 Requisitos para la obtención de un concreto durable

En general se obtiene un concreto durable si:

- a) Se utilizan materiales adecuados
- b) Proporcionamiento adecuado usando relaciones A/C compatibles con la resistencia y durabilidad previstas y con la trabajabilidad requerida.
- c) Prácticas adecuadas de dosificación, mezclado, transporte y colocación, que asegure uniformidad y buena compactación.
- d) Buen acabado y curado, para que el concreto desarrolle su resistencia y otras características en el grado previsto.

Es decir, cumpliendo las condiciones necesarias para producir un buen concreto, tomando en cuenta el tipo de estructura, su período de vida útil previsto y el grado de exposición previsto. No basta cumplir los requisitos generales de diseño, fabricación y colocación. Es necesario agregar especificaciones que incluyan los medios especiales de protección y requisitos que se deben cumplir para asegurar que la estructura en cuestión resista el deterioro causado por el tipo particular de exposición y cargas a que estará sometida.

2. AGREGADOS PARA CONCRETO

En el caso de materiales de construcción, se designa como agregado al material inerte que unido con un aglomerante en una masa conglomerada, forma concreto, mortero, mastic, argamasa etc. (11- 9)

Partiendo de que los agregados constituyen cerca del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es sumamente importante.

2.1 Generalidades

Los agregados deben estar constituidos de partículas con resistencia adecuada y resistencia a las condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que causen el deterioro del concreto. Una granulometría continua de los tamaños de las partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta de cemento y agua

Como agregados para la fabricación de concreto pueden emplearse arenas y gravas existentes en yacimientos naturales, rocas trituradas o escorias siderúrgicas apropiadas, así como otros productos cuyo empleo se encuentre sancionado por la práctica o resulte aconsejable como consecuencia de estudios realizados en laboratorio.

Cuando no se tengan antecedentes sobre la naturaleza de los agregados disponibles, o se vayan a emplear para otras aplicaciones distintas de las ya sancionadas por la práctica, se realizarán ensayos de identificación mediante análisis mineralógicos, petrográficos, físicos y químicos, según convenga a cada caso.

En el caso de utilizar escorias siderúrgicas como agregado, se comprobará previamente que son estables, es decir, que no contienen silicatos ni compuestos ferrosos inestables.

Se prohíbe el empleo de agregados que contengan sulfuros oxidables.

Los agregados deben ser transportados y almacenados de manera que se evite su segregación y contaminación, debiendo mantener las características granulométricas de cada una de sus fracciones hasta su incorporación a la mezcla. (8-54)

2.2 Clasificación De Los Agregados

- Por su reactividad {
 - inertes
 - activos

- Por su tamaño {
 - finos (porción pasta tamiz de 4.75mm. (No.4))
 - gruesos (de 9.5 mm. (\varnothing 3/8'') a 50.0 mm. (\varnothing 2'')) en nuestro medio

- Por fuente de obtención {
 - naturales (de depósitos) {
 - Fluviales
 - Marinos
 - Eólicos
 - Glaciáricos
 - Aluviales
 - artificiales (trituración y procesamiento de canteras y de canto rodado)

2.2.1 Comparación Entre Agregados Naturales Y Artificiales

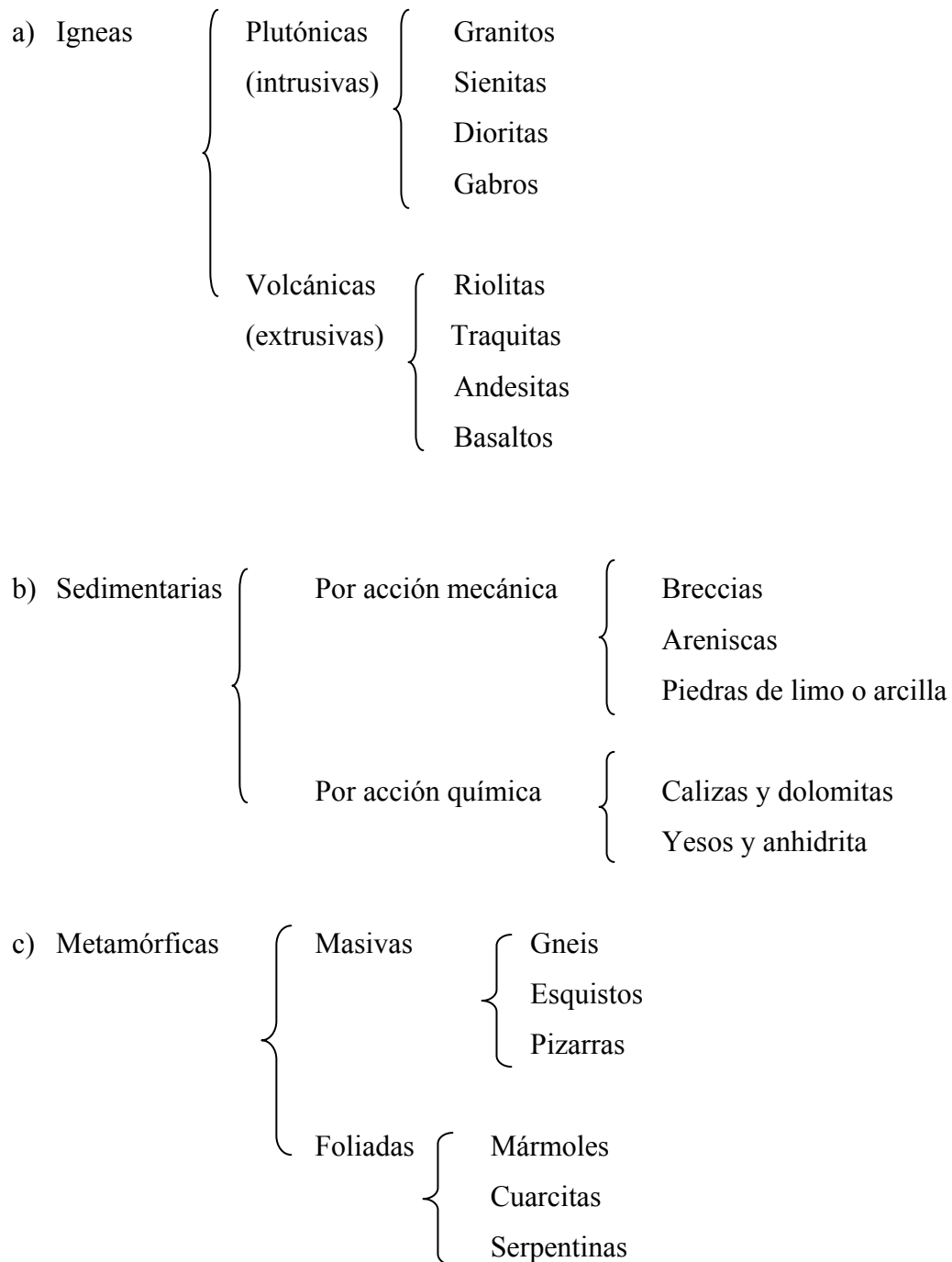
- Naturales:
 - Redondeados (mejor trabajabilidad)
 - Lisos- semilisos (menor adherencia)
 - Composición mineralógica heterogénea
 - Granulometría muy variable (requieren de procesamiento para lograr uniformidad)

- Artificiales:
 - Angulosos (menor trabajabilidad)
 - Rugosos (mayor adherencia)
 - Formas planas y alargadas (menos resistencia)
 - Composición mineralógica uniforme
 - Granulometría controlada

Hay agregados de buena calidad de ambos tipos. La decisión final es usualmente de tipo económico.

2.3 Composición mineralógica

Los agregados pueden contener uno o más de los siguientes tipos de rocas:



2.4 Designación y tamaños del agregado

Se entiende por arena o agregado fino, el agregado o fracción del mismo que pasa por un tamiz de 4.75 mm. de luz de malla (Fig. 4); por grava, piedrín o agregado grueso, el que resulta detenido por dicho tamiz (Fig. 5).

Figura 4. Agregado Fino



Figura 5. Agregado Grueso



2.4.1 Granulometría de los agregados

La granulometría es la distribución de los tamaño de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices (norma ASTM C 136). El tamaño de partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas (Fig. 6 y 7). Los tamices estándar ASTM C 33 para la granulometría de los agregados gruesos son los indicados en la tabla I.

Figura 6. Tamaño de las partículas de un agregado obtenidas por tamizado



Figura 7. Tamiz con aberturas cuadradas



Tabla I. Requisitos de granulometría para los agregados gruesos (1-12)



Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 6)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No. 50)
1	90 to 37.5 mm (3½ to 1½ in.)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
2	63 to 37.5 mm (2½ to 1½ in.)	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	...	...	...	100	85 to 100	...	35 to 70	10 to 30	0 to 5	...	...	...	...	...
4	37.5 to 19.0 mm (1½ to ¾ in.)	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	...	0 to 5	...	...	...	...	...
467	37.5 to 4.75 mm (1½ in. to No. 4)	...	...	...	...	100	95 to 100	...	...	10 to 30	0 to 5	...	...	...	...
5	25.0 to 12.5 mm (1 to ½ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	0 to 10	0 to 5	...	...	...	...	...
56	25.0 to 9.5 mm (1 to ¾ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 5	...	...	...	...	...
57	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 85	0 to 15	0 to 5	...	...	...	...
6	19.0 to 9.5 mm (¾ to ¾ in.)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	...	25 to 60	0 to 10	0 to 5	...	...	...
67	19.0 to 4.75 mm (¾ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	0 to 15	0 to 5	...	...	...	...
7	12.5 to 4.75 mm (½ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...	...
8	9.5 to 2.36 mm (¾ in. to No. 8)	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5	0 to 5	...
89	9.5 to 1.18 mm (¾ in. to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	5 to 30	0 to 10	0 to 5	0 to 5
9 ^A	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	0 to 5	0 to 5

Los números de tamaños corresponden a diversas graduaciones de agregados gruesos con base en el tamaño máximo nominal y el rango de tamaños indicado en la tabla I.

Los agregados finos deben tener su granulometría de acuerdo a los límites indicados en la tabla II.

Tabla II. Requisitos de granulometría para agregados finos según la norma ASTM C33 (9-35)

Tamiz (mm. / pulg.)	% en masa que pasa
9.5	100
4.75	95-100
2.36	80-100
1.18	50-85
600 $\mu\text{m.}$	25-60
300 $\mu\text{m.}$	5-30
150 $\mu\text{m.}$	0-10

Las sustancias nocivas presentes en los agregados finos deben estar dentro de ciertos límites, los cuales son citados en la tabla III.

Tabla III. Límites permitidos de sustancias nocivas en los agregados finos

Item	% max. en masa del total de muestra
Terrones de arcilla y partículas friables	3.0
Material más fino que 0.075mm (No. 200)	
- concreto sujeto a abrasión	3.0 A
- otros concretos	5.0 A
Carbón y Lignito	
- donde la apariencia del concreto es importante	0.5 B
- otros concretos	1.0 B

A - Para arenas trituradas (manufacturadas) si el material es más fino que el tamiz de 0.075 mm. (No. 200) es polvo de piedra, esencialmente libre de arcilla o esquistos arcillosos, estos límites pueden incrementarse a 5 y 7 respectivamente.

Nota: Las normas europeas aceptan % de finos (pasa tamiz 0.075) un poco mayores (10 – 15%) para agregados triturados cuyos finos son esencialmente polvo de piedra, libre de arcillas).

B - El carbón y el lignito se consideran materiales livianos con densidad menor a dos, que además por su naturaleza pueden manchar el concreto.

En Guatemala los materiales livianos son por lo general materiales volcánicos piroclásticos como las arenas pómez. Normalmente están presentes en porcentajes que pueden llegar hasta el 12 ó 15%. De igual manera el contenido máximo de finos en el agregado deben estar dentro de los límites citados en la tabla IV.

Tabla IV. Contenido máximo de finos en el agregado (8-75)

Item	% max. en masa del total de muestra
Terrones de arcilla y partículas friables (dependiendo de la severidad del clima)	3.0 a 10.0
Material más fino que 0.075mm (No. 200)	1.0
Carbón y Lignito - donde la apariencia del concreto es importante - otros concretos	0.5 1.0
Pedernal, Horsteno y otras rocas de contenido de cuarzo opalino microcristalino (dependiendo de la severidad del clima)	3.0 a 8.0

Existen varias razones por las que se especifican los límites de la granulometría y el tamaño máximo del agregado. La granulometría y el tamaño máximo del agregado afectan las proporciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto. 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 ásperas, no trabajables. En general, aquellos agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y tienen una curva granulométrica suave producirán los resultados más satisfactorios.

3. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO

Una propiedad es una cualidad indicativa de una característica específica de un material. Existe un número de propiedades que identifican el comportamiento de un material bajo diferentes condiciones. Por ejemplo, están las propiedades elásticas, magnéticas, químicas, físicas y mecánicas, así como otras. Una propiedad puede o no ser identificada por un valor numérico, aunque es preferible que lo sea.

Las propiedades de los agregados se pueden dividir en tres categorías:

- Propiedades físico-mecánicas
- Propiedades químicas

3.1 Propiedades físico-mecánicas

Las propiedades físicas y mecánicas de un material identifican o describen al mismo en términos de dimensiones fundamentales de longitud, masa y tiempo. Las propiedades físicas y mecánicas que son importantes para los agregados usados en la construcción son las siguientes:

- (+) 1. Forma y textura superficial de la partícula, partícula planas y alargadas.
- (+) 2. Tamaño máximo de la partícula
- (+) 3. Densidad, masa unitaria volumétrica
- (+) 4. Absorción, permeabilidad
5. Estructura del poro y porosidad de partículas, vacíos en la mezcla de agregados
- (+) 6. Granulometría, finos que pasan tamiz 0.075mm (No. 200)
- (+) 7. Presencia de materia orgánica

- (+) 8. Presencia de sustancias perjudiciales (suaves, friables, livianas, nocivas y químicas)
- (+) 9. Dureza, resistencia a desgaste y degradación
- 10. Cambio volumétrico – humidificación y secado
- 11. Resistencia a congelación - deshielo
- 12. Resistencia a agentes químicos y fisicoquímicos
- 13. Resistencia mecánica, elasticidad, fluencia
- 14. Cambio térmico de volumen / Conductividad térmica
- 15. Resistencia al calor / al fuego
- 16. Conductividad eléctrica
- 17. Reflexión

Nota: Las propiedades señaladas por (+) son las utilizadas más frecuentemente.

3.2 Propiedades químicas

Las propiedades químicas identifican al material químicamente y/o indican la transformación por la cual pasa el material durante un proceso químico. La solubilidad, carga eléctrica de superficie y la resistencia al ataque químico son ejemplos de distintas propiedades químicas. Cuando un agregado sufre un cambio a través de una acción química, las fuerzas causantes del cambio usualmente son fuerzas externas al sistema. Sin embargo en algunas situaciones, se produce un serio deterioro por una acción química entre componentes de la pasta y de los agregados. Para evitar este problema, el agregado debe ser compatible con la pasta.

- **Solubilidad:** La solubilidad es la tendencia de un agregado o componentes del mismo a ser disueltos por un líquido.

Ya que el agua está presente muy a menudo, cabe mencionar que un agregado no debe ser soluble en agua. Frecuentemente, el PH del agua es ligeramente ácido lo que permite que esta disuelva las rocas carbonatadas como las calizas. (2 – 3-12)

- **Intercambio básico:** El intercambio básico es el reemplazo de un tipo de catión adsorbido en la superficie del agregado por otro tipo de catión.

Ciertos cationes como los de materiales calcáreos pueden ser adsorbidos sobre la superficie de las partículas de los agregados. Estos cationes promueven la liberación de álcalis de la arcilla adsorbida presente en el agregado. (2 – 3-13)

- **Carga eléctrica de superficie:** La carga de superficie es la distribución de las cargas eléctricas en la superficie de un agregado, lo que se conoce como polaridad de las partículas.

La adhesión de la pasta de un asfalto a la superficie del agregado está influenciada considerablemente por la polaridad de las cargas en la superficie del agregado. El agua puede ser fuertemente atraída a un agregado altamente polarizado. Esta atracción puede ser tan fuerte en las mezclas de concreto asfáltico hasta ocasionar que el que el asfalto no sea capaz de desplazar el agua y cubrir el agregado. (2 – 3-13)

La polaridad y cohesión de las arcillas puede ser neutralizada por una pequeña cantidad de cal hidratada.

- **Revestimientos:** Los revestimientos son depósitos de sustancias minerales y/o químicas sobre la superficie de las partículas del agregado.

Algunos agregados naturales están revestidos con sales precipitadas. Los agregados también pueden estar recubiertos con polvo o arcilla. Si los revestimientos están firmemente unidos al agregado y no son reactivos ni con la pasta ni con el agregado, los revestimientos se consideran aceptables. (2 – 3-13)

- **Resistencia al ataque químico:** La resistencia al ataque químico es la habilidad que posee un agregado a resistir ataques de químicos como sales (cloruro de calcio y de sodio, sulfatos de sodio y magnesio), las cuales pueden ser acarreadas al sistema en solución con el agua.

Los agregados deben ser resistentes al deterioro causado por químicos altamente solubles y la presencia de los mismos en los agregados debe ser detectada preferiblemente antes de usar el material. (2 – 3-13)

- **Reactividad química compuesta:** La reactividad química compuesta es el cambio en la estructura de un agregado producido por reacciones químicas con la pasta.

Los compuestos químicos, como los sulfatos, pueden estar presentes en el agregado y reaccionar con ciertos aglutinantes usados en las mezclas. Los compuestos como los álcalis del cemento, también pueden estar presentes y pueden reaccionar con la sílice reactiva de los agregados dañando la integridad de la mezcla. (2 – 3-13)

- **Reacciones de oxidación e hidratación:** Las reacciones de oxidación e hidratación son cambios químicos en un agregado, producidos por la exposición a condiciones atmosféricas o a condiciones agresivas en su entorno.

Ciertos minerales que pueden estar presentes en los agregados son afectados por la oxidación (reaccionan con el oxígeno) o por la hidratación (reaccionan con el agua). El proceso químico de la oxidación produce compuestos como el óxido de hierro, el cual mancha la superficie de una estructura de concreto o pavimento. Las reacciones de hidratación producen en general la expansión de partículas que dan como resultado erupciones, en la superficie. (2 – 3-14)

- **Reactividad a materiales orgánicos:** Las reacciones con materiales orgánicos en el agregado y el cementante causan cambios en la estructura de las mezclas.

Los materiales orgánicos (especialmente de origen vegetal) existen en algunos tipos de agregado. Estos pueden reaccionar con los ingredientes del cemento hidráulico, dando como resultado un retardo y una baja en la resistencia y aumentando el deterioro del concreto. (2 – 3-14)

- **Contenido de cloruros:** El contenido de cloruros indica la concentración de los iones cloruro (Cl⁻) presentes en las partículas del agregado.

Los cloruros se encuentran entre los químicos más abundantes en la tierra, y están presentes en distintas cantidades en todos los componentes utilizados para la elaboración del cemento hidráulico. Los agregados que poseen altos contenidos de cloruros solubles contribuyen a la corrosión del refuerzo de acero utilizado en estructuras de concreto. El valor para el contenido de cloruros en el concreto, en el cual la corrosión del acero ocurre está por debajo del 0.15% por peso de cemento, de acuerdo con normas del Instituto Americano del Concreto (ACI). La presencia de oxígeno y de humedad son también factores necesarios para que se de la corrosión.

La corrosión que más interesa y afecta es la electroquímica que produce una acumulación de productos corrosivos en el acero de refuerzo del concreto reforzado. El contenido de cloruros máximo permisible en un agregado grueso usado en concreto reforzado en un ambiente húmedo es de aproximadamente 150 a 200 ppm., según normas europeas. (2 – 3-14)

4. SUSTANCIAS EN LOS AGREGADOS QUE AFECTAN QUÍMICAMENTE LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

4.1 Impurezas orgánicas de origen vegetal

Las impurezas orgánicas de origen vegetal son las que más frecuentemente se encuentran en los agregados naturales procedentes de depósitos aluviales, fluviales y lacustres, estando constituidas por residuos de plantas, raíces, etc., partículas de turba, humus, y productos de aguas servidas o de deshechos.

Las primeras son fácilmente reconocibles y por lo tanto se les puede eliminar de inmediato, si su porcentaje no es excesivo y en caso contrario se debe desechar el empleo del agregado. Las restantes generalmente van mezcladas con finos limosos y arcillosos.

Las sustancias orgánicas de origen vegetal presentes en los agregados o en las aguas naturales pueden alargar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico o reducir la resistencia del concreto. Aparte de los desechos de hojas y raíces, debe darse atención al humus que es muy perjudicial sobre todo si está mezclado con arcilla .

La acción química del humus se ejerce en primer término por su naturaleza ácida, que neutraliza la solución alcalina que ha desarrollado el cemento en presencia del agua al entrar en combinación durante la hidratación y fraguado y en segundo término, por su constitución coloidal, el humus envuelve las partículas del agregado, formando una película sobre ellas. Esta película de coloides, algunos difícilmente solubles en agua, aíslan los granos del agregado, impidiendo que las propiedades aglutinantes de la pasta de cemento puedan desarrollarse en toda su intensidad.

Varios estudios efectuados han señalado que el ácido tánico puede considerarse como un representante caracterizado de las impurezas orgánicas de origen vegetal. Mezclado artificialmente ha dado siempre resultados desfavorables sobre la resistencia, ya sea que se trate de edades o de concentraciones distintos.

Concentraciones de ácido tánico tan bajas como 0.1% en masa en relación a los agregados, puede en determinadas circunstancias reducir la resistencia hasta en un 50% de la normal y el efecto aumenta con su grado de concentración, es decir, que los concretos preparados con mayor cantidad de agua son afectados en menor grado.

Para detectar la presencia de materia orgánica en el agregado fino (arena) se usa la norma ASTM C 40, la cual es un ensayo colorimétrico que sirve para advertir el peligro y aconsejar si se deben hacer ensayos ulteriores, antes de autorizar la arena sospechosa. Algunos agregados finos contienen cantidades pequeñas de carbón o de lignito o de otros componentes, que le dan una coloración oscura al líquido y hay que investigar si un posible color oscuro en un ensayo de materia orgánica se debe a algún componente que da coloración al agua. En Guatemala ya se han dado casos así con agregados de Izabal y de Escuintla. La cantidad de impurezas orgánicas podría ser insuficiente para reducir apreciablemente la resistencia del concreto por lo que el agregado fino podría ser aceptable. En tales casos, se recomienda evaluar la arena en prueba mediante ensayos comparativos de resistencia de morteros entre la arena lavada y la arena en prueba de acuerdo con ASTM C 87 para decidir su uso (si el mortero en prueba alcanza una resistencia del 90% o mayor que el mortero de arena lavada, se acepta la arena).

4.2 Material fino arcilloso objetable

Cantidades relativamente pequeñas de arcilla y limo en los agregados pueden afectar de manera adversa la durabilidad, aumentar los requerimientos de agua e incrementar la contracción. Los materiales arcillosos especialmente, reducen la resistencia del concreto ya que al pegarse a las partículas de agregado, afectan la adherencia entre éste y la pasta de cemento-agua . Así mismo la presencia de humus con las arcillas muy común en arenas obtenidas de ríos y lagos puede producir retardos en el desarrollo de la resistencia y reducir la misma . Normalmente las especificaciones limitan la cantidad de material que pasa por malla de 0.075 mm. (Tamiz No.200) a 2 ó 3% en masa del agregado fino y al 1% en masa del agregado grueso para agregados naturales que contienen arcillas y permiten porcentajes un poco mayores en agregados obtenidos por trituración (ver numeral 2.4.1 de esta trabajo). Las pruebas para evaluar la cantidad de arcilla perjudicial en el agregado por el método de azul de metileno se realizan de acuerdo con las normas AFNOR P 18-595., UNE 83 130 y AASHTO TP 57.

Los terrones de arcilla presentes en el concreto también son perjudiciales ya que son suaves y deleznales pueden absorber una cierta cantidad de agua de mezclado, ser causa de erupciones o reventones en el concreto endurecido y afectar la durabilidad y la resistencia a la abrasión y también a veces pueden pegarse al agregado causando una mala adherencia entre éste y la pasta cemento-agua.

4.3 Componentes mineralógicos con sílice amorfa reactiva

Los agregados químicamente estables en el concreto, no reaccionan químicamente con el cemento de manera nociva. Sin embargo, los agregados con ciertos constituyentes minerales tales como algunas formas reactivas de sílice (en rocas volcánicas) o carbonatos (en rocas dolomíticas), reaccionan con los álcalis (óxido de sodio, óxido de potasio y cal libre) en el cemento, y otros álcalis que puedan provenir de los propios agregados o del agua de mezcla o de una fuente externa, en particular cuando el concreto está sujeto a un ambiente cálido y húmedo.

Ciertos agregados pueden también contener álcalis que además son potencial y nocivamente lixiviantes. En orden de ocurrencia y consecuencias se presentan: la reactividad álcali-sílice, la reactividad álcali-carbonato y otras reacciones cemento-agregado.

Una reacción álcali-sílice (ASR) en el concreto es una reacción entre ciertos constituyentes silíceos reactivos en el agregado y los álcalis liberados por la hidratación del cemento hidráulico o presentes en el concreto por otras fuentes . Por esta reacción se forma un producto gelatinoso expansivo que causa daños al concreto en forma de agrietamientos, disrupciones y erupciones de variada intensidad pero que pueden llegar a deteriorar fuertemente el concreto (Fig. 8). Este gel causa daños al concreto solamente cuando las siguientes 3 condiciones se dan simultáneamente:

- Haya presencia significativa en el agregado de minerales con sílice reactiva.
- Existan en el concreto o mortero suficientes iones alcalinos, sodio, potasio , calcio u otros
- Haya suficiente humedad disponible

Figura 8. Deterioro del concreto por reactividad álcali-agregado (9-44)



El ensayo químico rápido ASTM C 289, se emplea para identificar los agregados silíceos potencialmente reactivos. Se puede completar al cabo de dos o tres días.

También pueden emplearse los métodos de ensayo ASTM C 1260 que mide expansiones a determinados períodos de tiempo de prismas de mortero fabricados con la arena de prueba, y el método ASTM 227 que es similar pero con morteros de combinaciones de determinados agregados y cementos .

Es posible que esta reacción tenga lugar en el concreto sin inducir a la expansión. No ocasionando daños, aun cuando la reacción sea muy extensa, y el gel pueda llenar las grietas inducido por otros mecanismos.

Existe evidencia que indica que el daño durante la reacción álcali-sílice (agrietamiento) se da desde 25-150 mm. de la superficie expuesta de la estructura de concreto. (14 -2)

4.3.1 Síntomas visuales de una reacción expansiva álcali-sílice

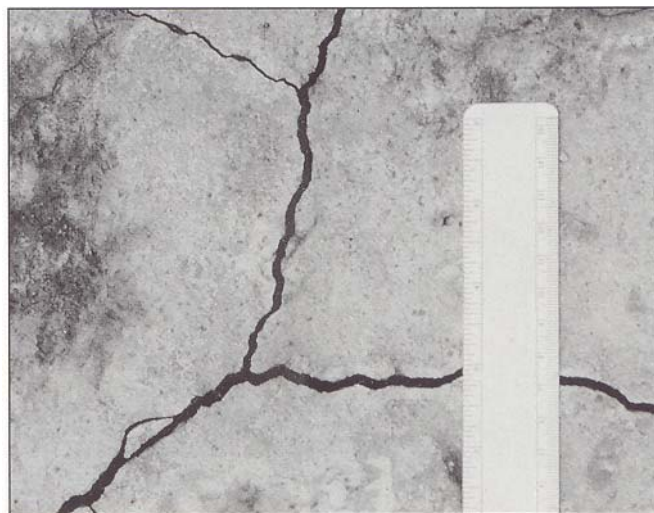
- **Expansión** Un indicador típico de la reacción álcali sílice es el agrietamiento en forma de mapa y en casos avanzados dislocaciones estrechas, astilladuras en la superficie de concreto o desplazamientos relativos de diferentes porciones de la estructura (ver figura 9).

Figura 9 Expansión causada por una ASR (5 -5)



- **Agrietamiento** Cuando el concreto es afectado por una ASR, este se caracteriza por una red de grietas que aparecen en su superficie (figura 10). Una inspección visual notará la localización, longitud, ancho, profundidad aparente, continuidad de las grietas y si las grietas van a través o alrededor del agregado.

Figura 10 Agrietamiento en un pavimento (5 -5)



- **Depósitos de superficie (Eflorescencia)** Los depósitos de gel de ASR o carbonato de calcio se pueden encontrar a lo largo de las grietas en el concreto, dejando un depósito en la superficie variando de un color blanco a un gris oscuro. Estos depósitos son llamados eflorescencias. El material de eflorescencia puede ser blanco, amarillento o transparente, viscoso, fluido, grasoso, elástico o duro. Un análisis químico es de gran utilidad para determinar la presencia del gel de una reacción álcali-sílice en un depósito.
- **Erupciones o reventones** Una erupción es causada al estallar un fragmento de la superficie del concreto, dejando un agujero de tamaño variable, pero que usualmente se encuentra entre 25 a 50 mm. Las erupciones causadas por un agregado fino (arena) son mucho más pequeñas (ver figura 11) que si se utiliza un agregado grueso (figura 12).

Figura 11. Erupciones causadas por un agregado fino (5 -8)

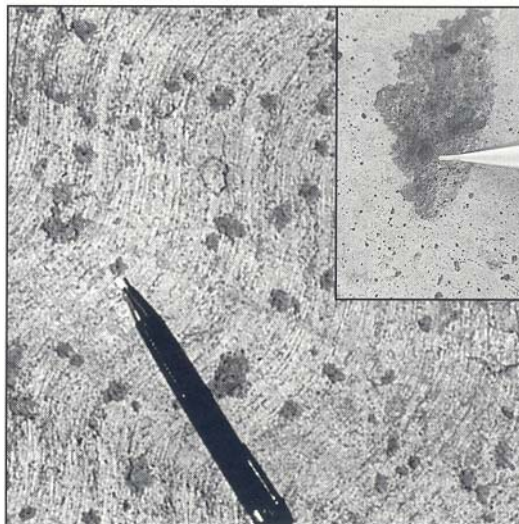
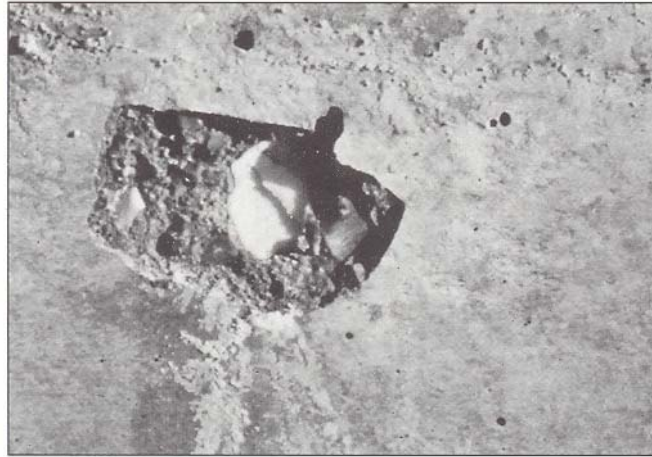


Figura 12. Erupciones causadas por un agregado grueso (15 -12)



- **Cambio de color** La decoloración de la superficie es comúnmente vista junto con el agrietamiento. Las áreas a lo largo de las grietas pueden ser blanquizcas, ligeramente rosadas o café claro, extendiéndose algunos milímetros desde la grieta. (figura 13).

Figura 13. Decoloración del concreto a través de las grietas (15 - 11)



4.3.2 Identificación de un agregado potencialmente reactivo

Los registros de servicio en campo generalmente dan la mejor información para la selección de los agregados. Si no se cuenta con información acerca de algún agregado y se sospecha que sea potencialmente reactivo, se deberán realizar pruebas de laboratorio. A continuación se discuten los ensayos ASTM para identificar agregados reactivos con álcalis:

- **Método de barra de mortero (ASTM C227)** se usa para determinar la potencial reactividad expansiva álcali-sílice de combinaciones de cemento y agregados. En este ensayo, se mide la expansión desarrollada en barras pequeñas de mortero durante su almacenamiento bajo condiciones específicas de temperatura y humedad. Los ensayos con barras de mortero se pueden usar para agregados finos o gruesos. Generalmente deben transcurrir de tres a seis meses antes de poder obtener resultados.
- **Método rápido de barra de mortero (ASTM C1260)** se usa para determinar la potencial reactividad expansiva álcali-sílice de combinaciones de cemento y agregados. En este ensayo, se mide la expansión desarrollada en barras de mortero hechas con una muestra de agregado durante su almacenamiento en una solución alcalina a temperaturas elevadas.
- **Prueba química rápida (ASTM C289)** se emplea para identificar los agregados silíceos potencialmente reactivos. Se puede completar al cabo de dos o tres días.

- **Examen Petrográfico** Este examen debe ser realizado por un petrógrafo calificado, dicho examen determina la composición mineral del agregado y su forma, este predice la posible reactividad del agregado pero no brinda información cuantitativa acerca del comportamiento del agregado en el concreto. Los principales minerales que contienen sílice amorfa reactiva son: ópalo, calcedonia tridimita, cristobalita, cuarzo criptocristalino o microcristalino y vidrio volcánico ácido como el que puede presentarse en riolitas, andesitas o dacitas.
- **Lámpara Ultravioleta** Por medio del kit de identificación de una ASR HM-260, es posible detectar deterioro del concreto en pavimentos, estructuras y edificios. Este kit consiste en una caja visora equipada con lámparas dobles de 6 watts de ondas cortas de luz ultravioleta proporcionando $1200\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Después de humedecer el área de ensayo de cualquier estructura de concreto con una solución de acetato de uranio, el gel de la ASR puede ser detectado inmediatamente por un brillo fluorescente amarillo verdoso bajo la luz UV.
- **Kit de detección de una ASR** Dos reactivos son utilizados para la detección ya sea de estados iniciales o avanzados de ASR por indicación de color. Minimizando los costos de análisis petrográficos para el diagnóstico de un deterioro del concreto.

En la práctica, uno de los dos reactivos es aplicado en una superficie de concreto recién agrietada y enjuagada con agua. El primer reactivo intercambiará sodio con el potasio presente en algunos gels de ASR y dejará una precipitación amarilla brillante indicando estados iniciales de deterioro por ASR. Aplicando el segundo químico resultará una mancha rosada brillante si estuviera presente un gel rico en calcio, indicando que el deterioro es más avanzado. El concreto que no posee una ASR no es afectado de ninguna forma. Esta prueba se completa en menos de cinco minutos y las manchas resultantes de las reacciones son permanentes, por lo cual no es necesario repetir la prueba.

4.4 Carbonatos Reactivos

Las expansiones observadas con ciertas rocas dolomíticas son asociadas con la reacción álcali-carbonato (ACR). Las rocas reactivas son de una textura y composición muy particular. La textura microscópica se caracteriza por cristales relativamente grandes de dolomita (rómicos) dispersos en una matriz de calcita micrítica y arcillas muy finas. La composición característica es aquella en que la porción carbonácea consiste de cantidades sustanciales de dolomitas y calcitas y el residuo insoluble refleja una cantidad significativa de arcilla. Afortunadamente estas formaciones son poco frecuentes y de poca extensión. Una cantera donde aparezca esta reacción no necesariamente debe desecharse. Lo que debe hacerse es limitar el área peligrosa con la ayuda de un geólogo.

Así mismo la reacción ACR es relativamente rara ya que los agregados susceptibles a esta reacción son inadecuados para su uso en concreto por otras razones como cristalización, facilidad de rotura por golpes, textura lisa etc.

Los agregados son potenciales a una Reactividad ACR expansiva si existen las siguientes condiciones litológicas:

- El contenido de cal o contenido de residuo insoluble está en el rango de 5% a 25%;
- La relación de calcita-a-dolomita es de aproximadamente 1:1;
- Se incrementa el volumen de dolomita a tal punto que se convierta en un factor restringente;
- Una cantidad de cristales dolomíticos (rombos) suspendidos en una matriz de calcita micrítica y arcillas muy finas.

La reacción álcali-carbonato es afectada tanto por el tamaño del agregado como por la alcalinidad de la solución. Una ACR puede ocurrir en una solución con un PH relativamente bajo, si el PH incrementa, la potencialidad a una reacción álcali-carbonato incrementa al igual que al incrementar el tamaño del agregado. Durante una ACR, el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento se puede combinar con el carbonato de sodio para formar más hidróxido de sodio y carbonato de calcio. Esta reacción no solo regenera el álcali, sino que reduce la concentración de los iones carbonato y agrava la reacción. La utilización de cementos bajos en álcalis y mezclas minerales (aún en niveles altos) son inefectivos en la reducción de una ACR.

4.4.1 Síntomas visuales de una reacción expansiva álcali-carbonato

La reacción álcali-carbonato al igual que la reacción álcali-sílice, es un proceso químico que induce a daño físico como la expansión y el agrietamiento del concreto (figuras 14 y 15).

Figura 14. Agrietamiento del concreto causado por una ACR (5 –16)



Figura 15. Oquedad o agujero en el concreto relleno de gel carbonatado causado por una Reacción ACR (5 –16)



El concreto afectado por una ACR no muestra rasgos característicos que permitan identificar de manera segura esta reacción como la causa del agrietamiento. En losas, cubiertas y bases de concreto cuando existe un gradiente de humedad de la superficie superior al fondo o de lado a lado también puede ocurrir un agrietamiento similar. Debido a que pequeñas cantidades de álcali pueden iniciar una ACR y niveles más altos de concentración la pueden empeorar, el uso de sales para deshielo que contengan álcalis puede aumentar el daño.

4.4.2 Identificación de un agregado potencialmente reactivo

Aunque la ACR no sea la reacción más común debido a que las rocas carbonatadas que contengan proporciones de dolomita, calcita y material insoluble no constituyen una proporción importante en el abastecimiento de agregados, existen tres métodos usados para identificar un agregado potencialmente reactivo:

- **Evaluación petrográfica** La evaluación petrográfica ASTM C295, puede ser usada para establecer la litología y composición mineralógica de la roca. Los agregados con reactividad álcali-carbonato tienen una litología característica que los hace fáciles de identificar. La roca es considerada reactiva si el recubrimiento físico de los cristales rómbicos de dolomita es una matriz de calcita micrítica y arcillas finas y cal finamente granuladas. Sin ninguna duda, todas las rocas con esta litología característica se expanden en un ambiente alcalino, y todas las rocas en el concreto que se halla expandido por ACR poseen esa misma litología.
- **Método de cilindro de roca (ASTM C586)** Este método puede determinar las características expansivas de las rocas carbonatadas. Un pequeño cilindro de roca es sumergido en una solución alcalina a una temperatura fija. A los veintiocho días se obtienen los resultados, si la expansión es del 0.10% o más, esto indica que el agregado es reactivo.

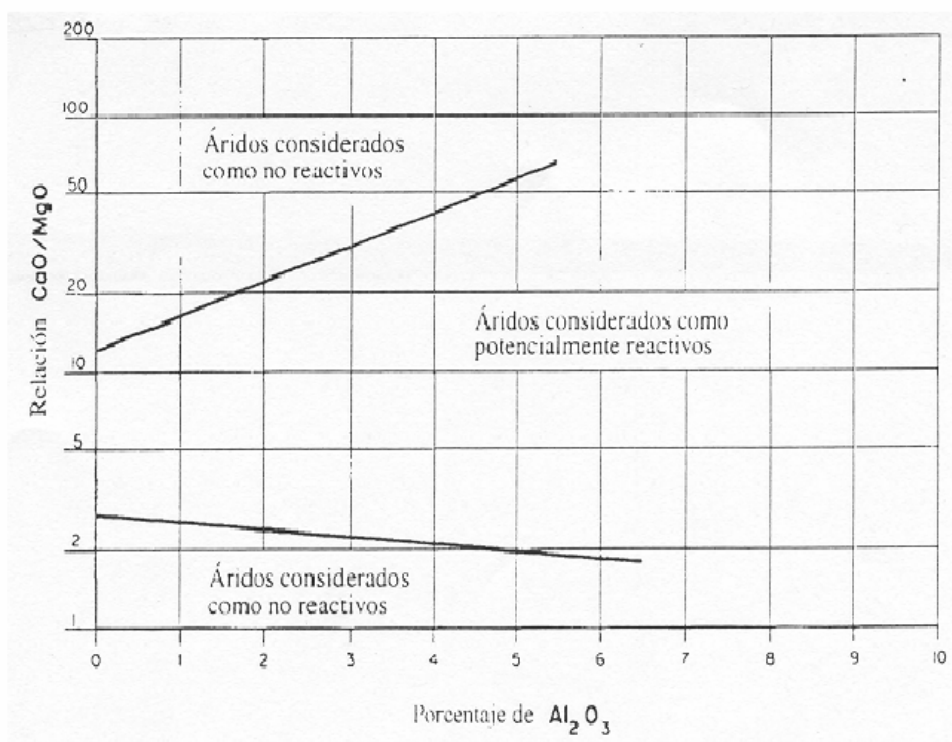
Este procedimiento tiene algunas desventajas. Se debe obtener una muestra significativa, lo que dificulta el ensayo y puede alargarlo. Además esta prueba es solamente complemento para otros procedimientos. El comportamiento expansivo de un agregado se puede predecir por el método de cilindro de roca. Pero dicha expansión depende de otras variables que incluyen la relación agua-cemento, agua-álcalis solubles y pasta-agregado. La ASTM C586 sola, no puede ser usada como una prueba aceptable para un agregado, tiene que combinarse con la evaluación petrográfica u otros métodos como los siguientes:

- **Ensayo de expansión en prismas de concreto (ASTM C1105 y CSA A23.2-14^a)** La norma ASTM C1105 es la más usada para verificar la reactividad potencial de un agregado, del cual se sepa que contiene rocas susceptibles a una reacción ACR. Se fabrican 6 prismas de concreto con el agregado y cemento. Dicho ensayo se debe correr normalmente en un año, pero si no fuera posible se puede realizar en un período de tres a seis meses. Una expansión igual o mayor del 0.03% al año, de 0.025% a los 6 meses, o de 0.015% a los tres meses indica que el agregado es potencialmente dañino.

La Norma de la Asociación de Normas de Canadá CSA A23.2-14^a es similar a la ASTM C1105, ambos ensayos requieren de condiciones similares de almacenamiento.

- **Método químico (UNE 146507-2 EX)** Este método permite determinar, por vía química, la reactividad potencial álcali-carbonato de los agregados, determinando la relación CaO/MgO del agregado, así como su contenido en Al₂O₃, dichos valores se representan luego en el gráfico de la figura 16. El agregado se clasificará como no reactivo o potencialmente reactivo en función de la disposición del resultado de dicha figura.

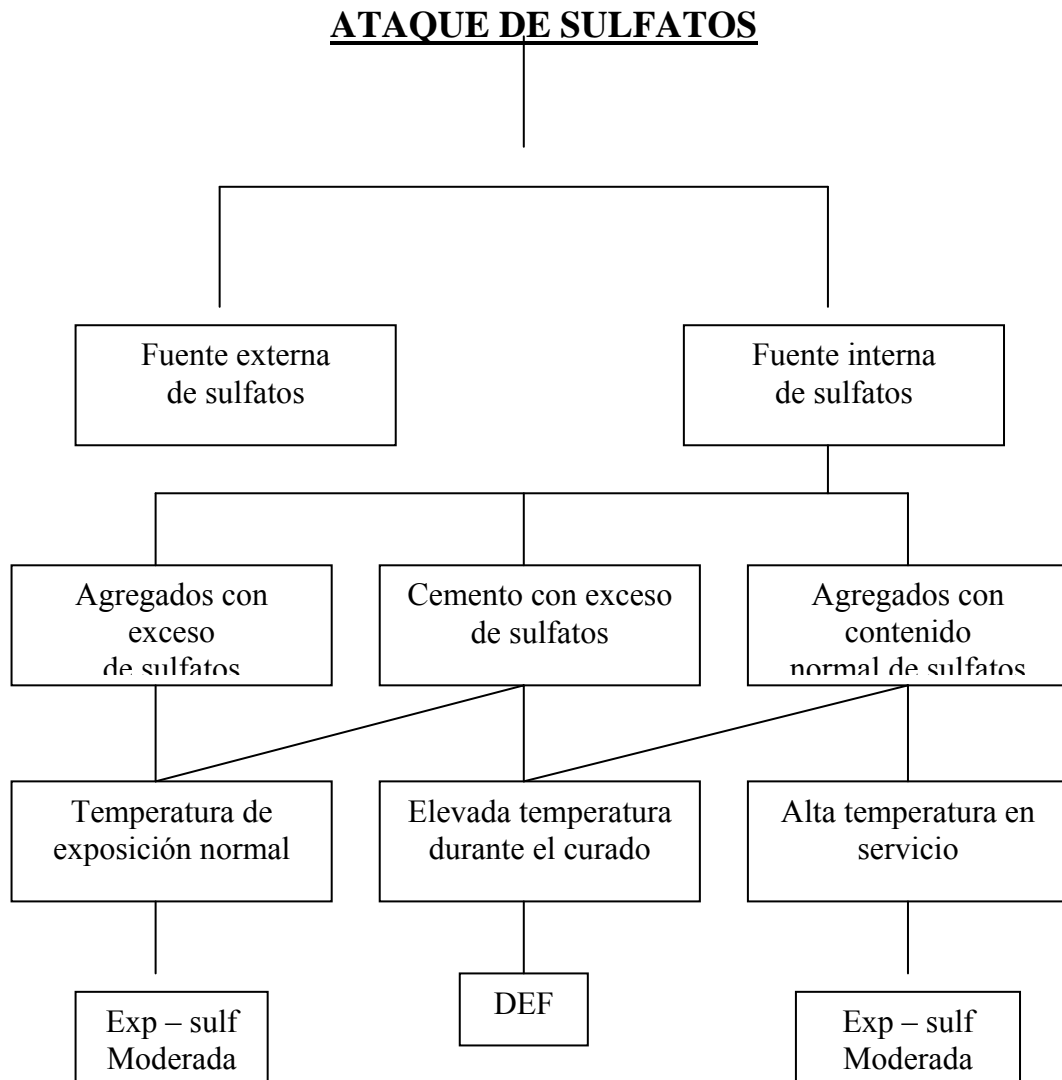
Figura 16. Reactividad álcali – carbonato.



4.5 Ataque por Sulfatos (DEF)

La acción de cantidades excesivas de sulfatos, de procedencia externa o interna, se denomina genéricamente como "ataque por sulfatos". Este nombre cubre varios procesos posibles o sus combinaciones, que producen expansión o fisuras o descomposición de los principales productos de hidratación del cemento. En la figura 17 se muestra un resumen de los tipos de problemas relacionados con el ataque interno de los sulfatos.

Figura 17. Esquema de posibles ataques internos de sulfatos en el concreto (13 -9)



La reacción DEF representa una de las formas de deterioro del concreto relacionadas con la formación de etringita. Consiste en un ataque interno de sulfatos, caracterizado por la descomposición, o no formación inicial, y la subsiguiente recristalización de etringita debido a un inadecuado curado térmico, o a un almacenaje de componentes de concreto en un ambiente húmedo y cálido.

Las sales sólidas no atacan químicamente al concreto, pero, cuando están presentes en solución, pueden reaccionar con la pasta de cemento hidratado. Particularmente comunes son los sulfatos de sodio, potasio, magnesio y calcio, los cuales se presentan en el suelo o en el agua freática. Puesto que la solubilidad del sulfato es muy alta, las aguas freáticas con un alto contenido de sulfatos contienen otros sulfatos además de sulfato de calcio. La importancia de esto se halla en el hecho de que estos otros sulfatos pueden reaccionar con los diversos productos de la hidratación del cemento y no solo con el óxido de calcio hidratado: Ca(OH)_2 . Además puede ser significativa la acción física de expansión y disrupción en los poros del concreto, causada por la cristalización en los mismos de las sales solubles de sulfatos, conforme pierden agua las soluciones. Este tipo de acción bastante común en nuestro medio, principalmente en muros de mampostería, afectando recubrimientos, ladrillos o bloques se conoce vulgarmente como “acción del salitre”.

La formación de etringita que resulta del ataque de sulfatos de calcio por su reacción con el aluminato tricálcico y la cal libre o de hidrólisis del cemento no difiere de la reacción correspondiente en el cemento expansivo de tipo K, pero puesto que ocurre en concreto endurecido, es destructora; de ahí que, algunas veces la reacción se menciona como expansión retrasada de etringita mas conocida por sus siglas en ingles: “DEF” (*Delayed Ettringite Formation*). (10-355)

4.5.1 La etringita en el concreto y sus formas

La etringita es un sulfo-aluminato cálcico hidratado cristalino $\text{C}_6\text{A}\hat{\text{S}}_3\text{H}_{32}$. Es un producto que se forma en la hidratación normal de los cementos Pórtland y su presencia en la pasta endurecida, en sí misma, no representa un problema para la durabilidad del concreto. Bajo condiciones normales de curado y uso, tal etringita no produce expansión. La cantidad de etringita formada en la pasta a un tiempo dado es difícil de predecir porque depende de múltiples condiciones no siempre conocidas.

Se consideran tres formas diferentes de etringita, atendiendo a los posibles mecanismos de formación:

- **Etringita primaria** es un producto normal de la reacción de hidratación del cemento Pórtland. Su formación inicial en el concreto de cemento no genera expansión.

La etringita que se forma como consecuencia del ataque externo de sulfatos (quizás la más dañina desde el punto de vista de sus efectos expansivos por producirse en concretos endurecidos, ya puestos en servicio) puede considerarse también como etringita primaria.

- **Etringita secundaria** en el concreto endurecido y húmedo y, tras un tiempo suficiente, la etringita presente puede experimentar una eventual disolución y subsiguiente recristalización en los espacios disponibles más grandes. Este tipo de etringita se denomina secundaria y su formación tal y como es definida aquí no genera expansión.

- **Etringita retrasada** es un hecho bien conocido que la etringita primaria es inestable por encima de aproximadamente 65-70 °C. Así, bajo condiciones de curado a estas temperaturas, la etringita primaria no se formará y la que se pudiera haber formado con anterioridad al curado, se descompondrá. Si el concreto así curado se mantiene posteriormente en agua o en condiciones húmedas y cálidas, la etringita se formará lentamente en la matriz de pasta de cemento. Este proceso ha sido denominado “formación de etringita retrasada” (DEF) y se ha observado que genera expansión con las consecuentes fisuras en pastas, morteros o concretos.

4.5.2 Pruebas sobre resistencia a sulfatos

La resistencia del concreto al ataque de sulfatos se puede probar en el laboratorio mediante el almacenamiento de especímenes en una solución de sulfato de sodio o de magnesio, o en una mezcla de los dos. El mojado y el secado alternados aceleran el daño a causa de la cristalización de sales en los poros del concreto. Los efectos de la exposición se pueden estimar por la pérdida de resistencia del espécimen, por cambios en su módulo dinámico de elasticidad, por su expansión, por pérdida de masa, o se pueden valorar incluso visualmente.

Una prueba similar se utiliza también para evaluar la estabilidad volumétrica de los agregados para concreto a la acción de congelamiento y deshielo o al ataque de sulfatos en suelos o aguas.

La presencia de sulfatos en los agregados para concreto se determina por los métodos: UNE 17441. Esta determinación es importante porque gracias a ella se puede ayudar a mantener bajo el contenido de sulfatos en el concreto y prevenir tanto la formación de etringita retrasada la cual puede ser causante de la expansión que sufren algunos concretos, como la expansión y disrupción causada por cristalizaciones de sales solubles de sulfatos dentro de los poros del concreto.

4.6 Cloruros

Los cloruros pueden estar presentes en el concreto porque ellos se han incorporado en la mezcla a través del empleo de agregados contaminados, de agua de mar o de agua salobre, o por aditivos que contienen cloruros. Ninguno de estos materiales se permite actualmente en el concreto reforzado y preesforzado y las normas prescriben generalmente límites muy estrictos en el contenido de cloruros en el concreto, ya que su presencia favorece y acelera la oxidación del acero de refuerzo. La presencia de oxígeno y de humedad son también factores necesarios para que se de la corrosión tanto directa como la electroquímica que es la más importante y perjudicial.

Este problema de la oxidación electroquímica del refuerzo y la consiguiente destrucción del concreto y daños en edificaciones es muy extenso, especialmente en Europa y EEUU, habiéndose invertido grandes sumas de dinero en la reparación y rehabilitación demolición y reconstrucción de estructuras.

En estudios de durabilidad de grandes estructuras, normalmente deben analizarse muchas muestras y deben tomarse decisiones acerca de costosas reparaciones sobre la base de los contenidos de cloruros que se detecten en el concreto. Este hecho ha motivado la realización de esfuerzos considerables para el desarrollo de métodos analíticos de laboratorio y de campo para la determinación del contenido de iones cloruro total en el concreto y sus materiales constituyentes y de métodos para medir la facilidad de penetración de cloruros en el concreto.

La corrosión es un proceso electroquímico que resulta en una acumulación de productos corrosivos en el acero. Los productos de la corrosión producen un gran cambio de volumen que a su vez es la causa de expansiones y agrietamientos en el concreto. Inicialmente la capa de óxido del acero es prácticamente impermeable en las condiciones de PH mayor de 12, normales en el concreto haciendo al acero pasivo a la subsiguiente corrosión. Esta pasividad se destruye si baja el PH a valores menores de 11.5. La carbonatación y el ingreso de una solución ácida de fuente externa pueden bajar el PH, pero la presencia de iones de cloro puede destruir la película protectora de óxido de hierro a PH considerablemente arriba de 11.5. El contenido de cloro para iniciar y acelerar la corrosión es del orden de 0.6 a 0.9 Kg. de Cl por metro cúbico de concreto. De allí la importancia de determinar la presencia de cloruros o específicamente del ión cloro en el concreto y sus constituyentes. El contenido de cloruros máximo permisible de acuerdo a especificaciones europeas, en un agregado grueso usado en concreto reforzado en un ambiente húmedo es de aproximadamente 150 a 200 ppm..

En la tabla V se muestran los niveles de cloruros iniciadores de la corrosión en el concreto reforzado según varios investigadores y reglamentos de algunos países.

Tabla V. Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión (4 –27)

Autor o reglamento	Año	Contenido de cloruros límite	
		(kg/m ³ de concreto)	(% por peso de cemento)
Hausmann ¹⁴	1967	0.2-2.8	
Clear ¹⁵	1976	0.81	0.2
Everett y Treadway ¹⁶	1980	-	0.4-1
Berke ¹⁷ , Gau ¹⁸	1982	0.6-0.9	-
Comité Euro-International du Beton ¹⁹ (Europa)	1982	-	0.35 a 1
FWHA (Estados Unidos) ⁺	1985	-	0.3
BS-8110-1985 (Reino Unido) ⁺⁺	1985	-	0.2-0.4*
RILEM ²¹	1987	-	0.4-1
EH-88 (España) ^{**}	1988	-	0.4
pr EN-206 (España) ^{**}		-	1.4
ACI-318-89 (Estados Unidos) ²²	1989	-	0.15-0.3-1**
Roy, Liam y Northwood ²³	1993	-	0.4
Mustafa y Yusof ²⁴	1994	0.376	-
Castro y Maldonado ²⁵	1994	1.0-2.0	-

Los ensayos que se utilizan para determinar el contenido de cloruros solubles en agua son: La norma UNE-EN 1744-1 y la ASTM PS 118.

4.7 Sulfuros

Las piritas y las marcasitas (sulfuros de hierro) representan las inclusiones expansivas más frecuentes en el agregado. Estos sulfuros reaccionan con el agua y el oxígeno del aire para formar sulfato ferroso que, subsecuentemente, se descompone para formar el hidróxido, mientras los iones de sulfato reaccionan con los aluminatos de calcio del cemento. También se puede formar ácido sulfúrico, y ese puede atacar la pasta de cemento hidratado.

Las manchas superficiales del concreto y la separación de la pasta de cemento ocurren particularmente en condiciones cálidas y húmedas. La formación de reventones se puede retardar por muchos años hasta que el agua y el oxígeno estén presentes. El problema de la aparición de reventones se puede remediar con usar un tamaño máximo más pequeño de agregado.

No todas las formas de piritas son reactivas y, puesto que la descomposición de la piritita ocurre sólo en aguas calcáreas, es posible probar los agregados en suspensión para determinar su reactividad colocándolos en una solución saturada de cal. Se ha encontrado que la falta de reactividad se relaciona con la presencia de un cierto número de cationes metálicos, mientras que la ausencia de estos hace que la piritita sea reactiva. En general, las partículas de piritita que pueden causar problemas son las que están entre 5 y 10 mm. (3/16 a 3/8 de pulgada).

Se prohíbe el empleo de agregados que contengan sulfuros oxidables. La presencia de sulfuros en los agregados para concreto se determina por el método UNE 17441-1.

5. AGREGADOS EVALUADOS / RESULTADOS OBTENIDOS

Para la aplicación de los métodos de ensayo indicados para evaluar la presencia de sustancias reactivas nocivas en los agregados, se escogieron agregados típicos de los que se emplean actualmente en el área metropolitana de Guatemala:

Fuentes A, C y D		Arenas de ríos del área metropolitana de Guatemala
Fuentes B y E		Arenas y piedrín de canteras del área metropolitana de Guatemala

Tabla VI. Materia Orgánica (Norma ASTM C40)

Muestra	Color No.	Límite de la Norma
Arena fuente A	0.5	3
Arena fuente B	0	
Arena fuente C	0.5	
Arena fuente D	0	

Tabla VII. Azul de Metileno (Norma AASHTO TP57-99)

Muestra	Azul de Metileno (mg/g)	Límite de la Norma	Comportamiento Esperado
Arena fuente A	19.5	19 (mg/g)	Posibles fallas
Arena fuente B	2		Excelente
Arena fuente C	90		Falla
Arena fuente D	12.5		Marginalmente aceptable

Tabla VIII. Reactividad Alkali – Sílice (ASTM C289)

Muestra	Rc (mmol/litro)	Sc (mmol/litro)	Comportamiento Esperado	Ver Figura
Arena fuente A	110	164	Potencialmente dañino	18
Arena fuente B	5.44	36	Inocuo	19
Arena fuente C	168.50	189.45	Potencialmente dañino	20
Arena fuente D	143	192.50	Potencialmente dañino	21
Piedrín fuente A	142	134.79	Inocuo	22

Rc: reducción en alcalinidad

Sc: sílice Disuelto

Figura 18. ASTM C289 (Arena Fuente A)

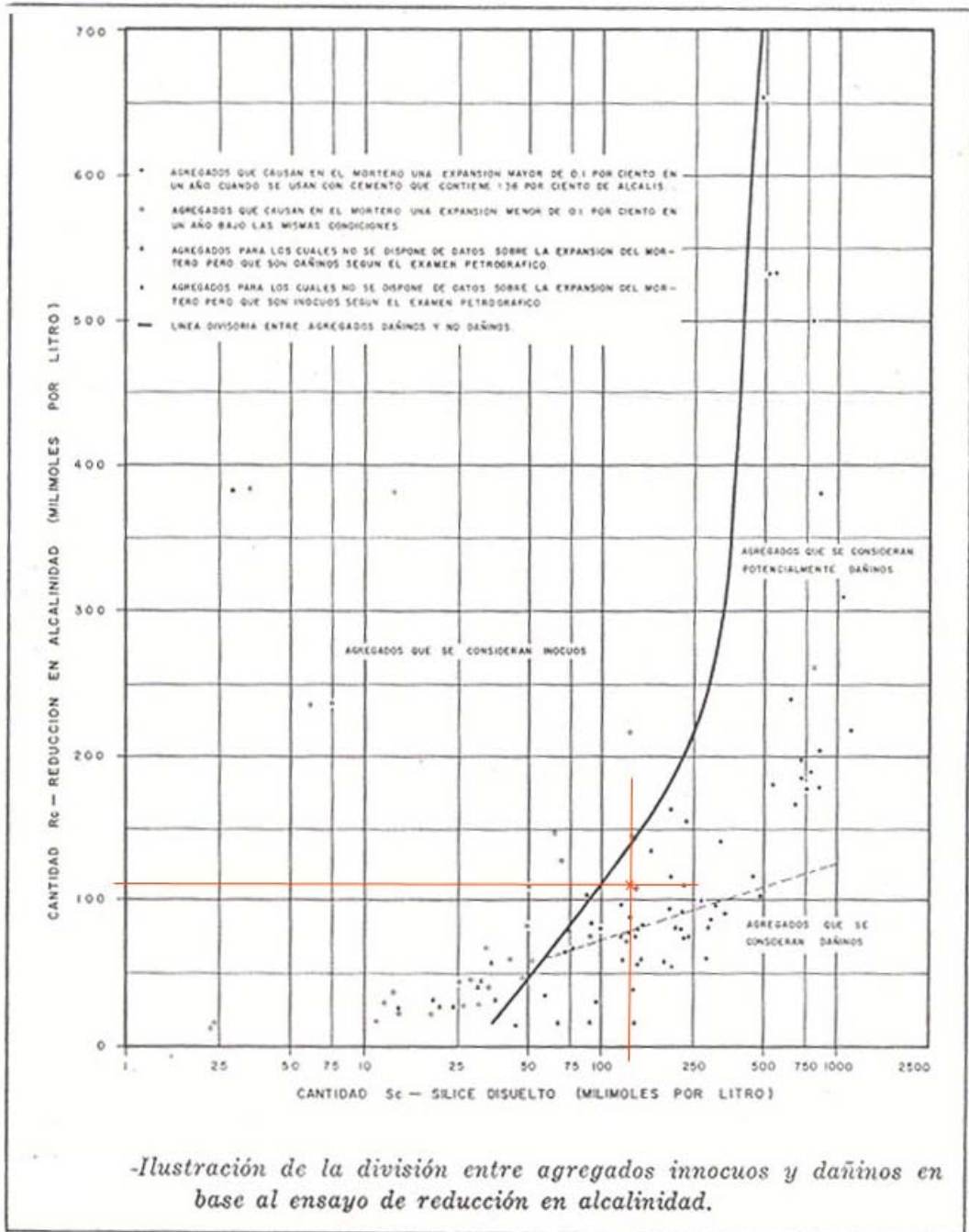


Figura 19. ASTM C289 (Arena Fuente B)

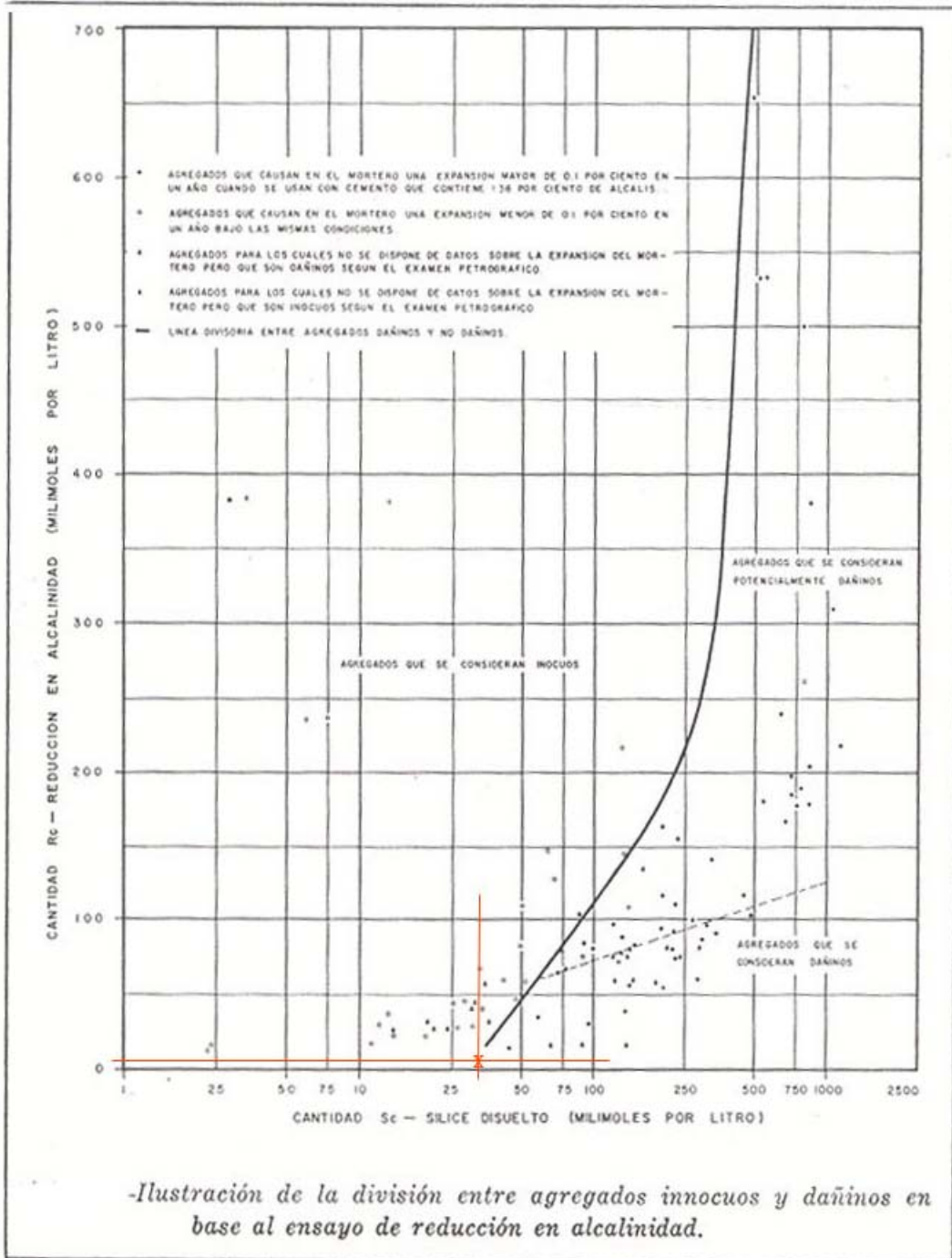


Figura 20. ASTM C289 (Arena Fuente C)

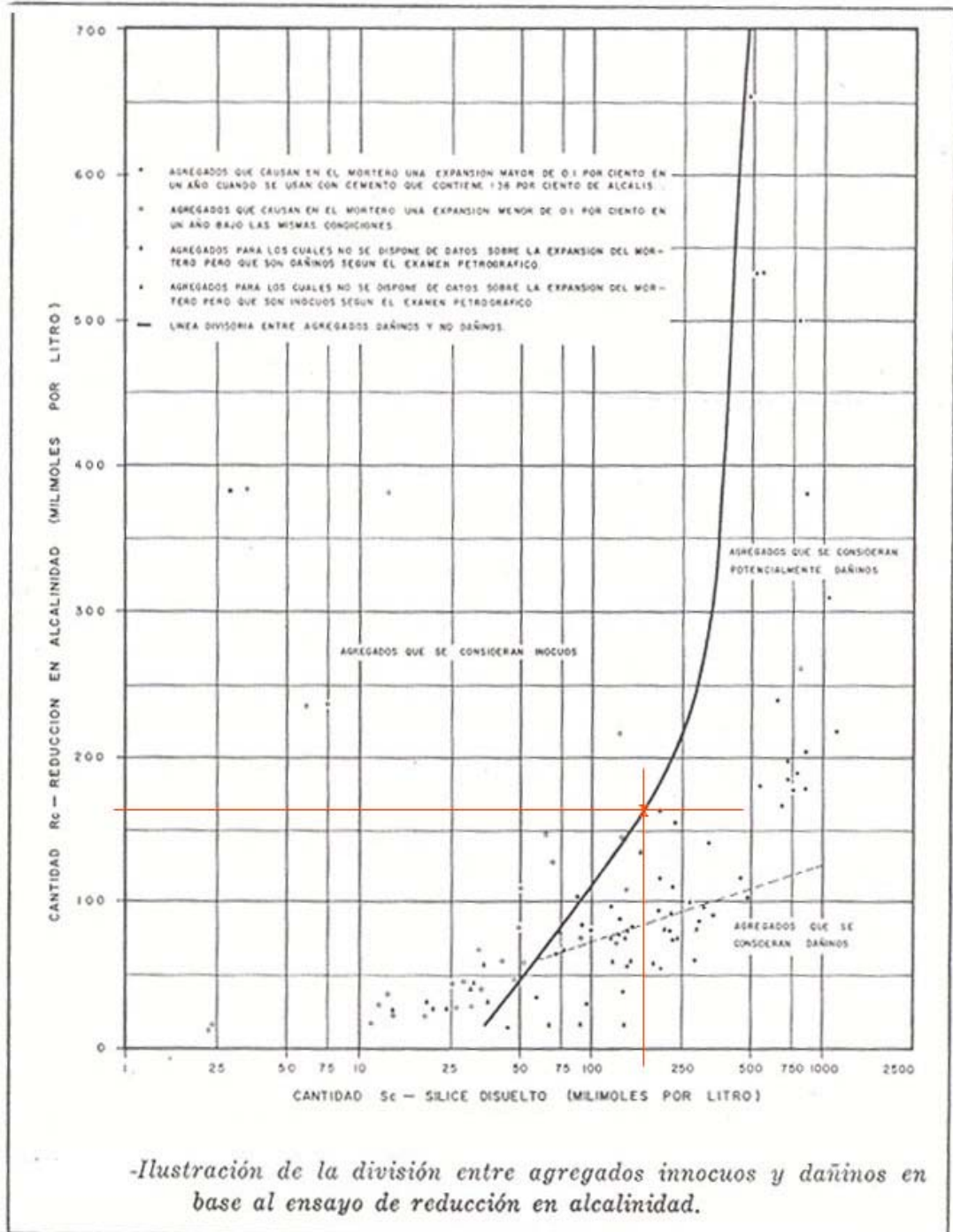


Figura 21. ASTM C289 (Arena Fuente D)

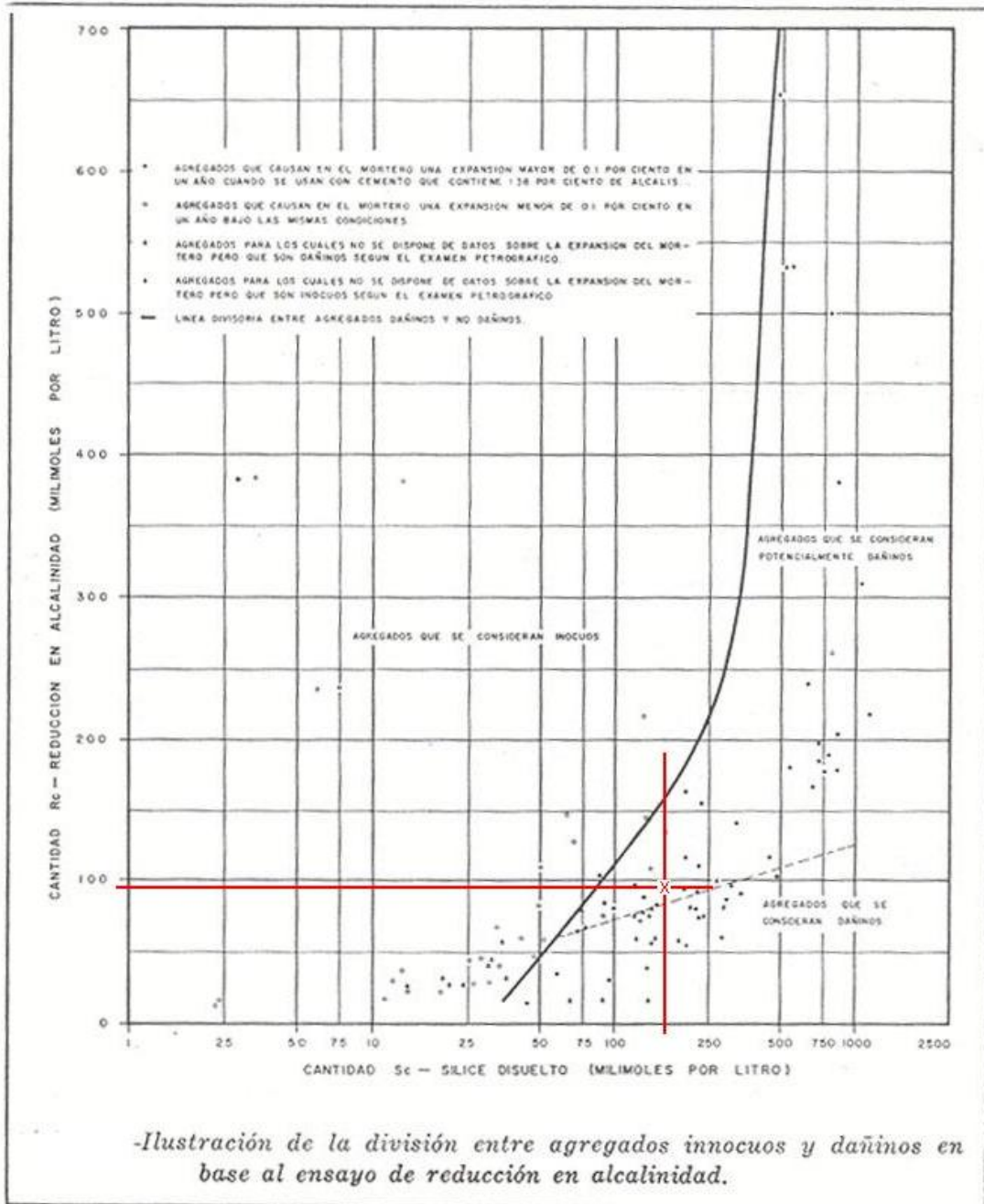


Figura 22. ASTM C289 (Piedrín Fuente A)

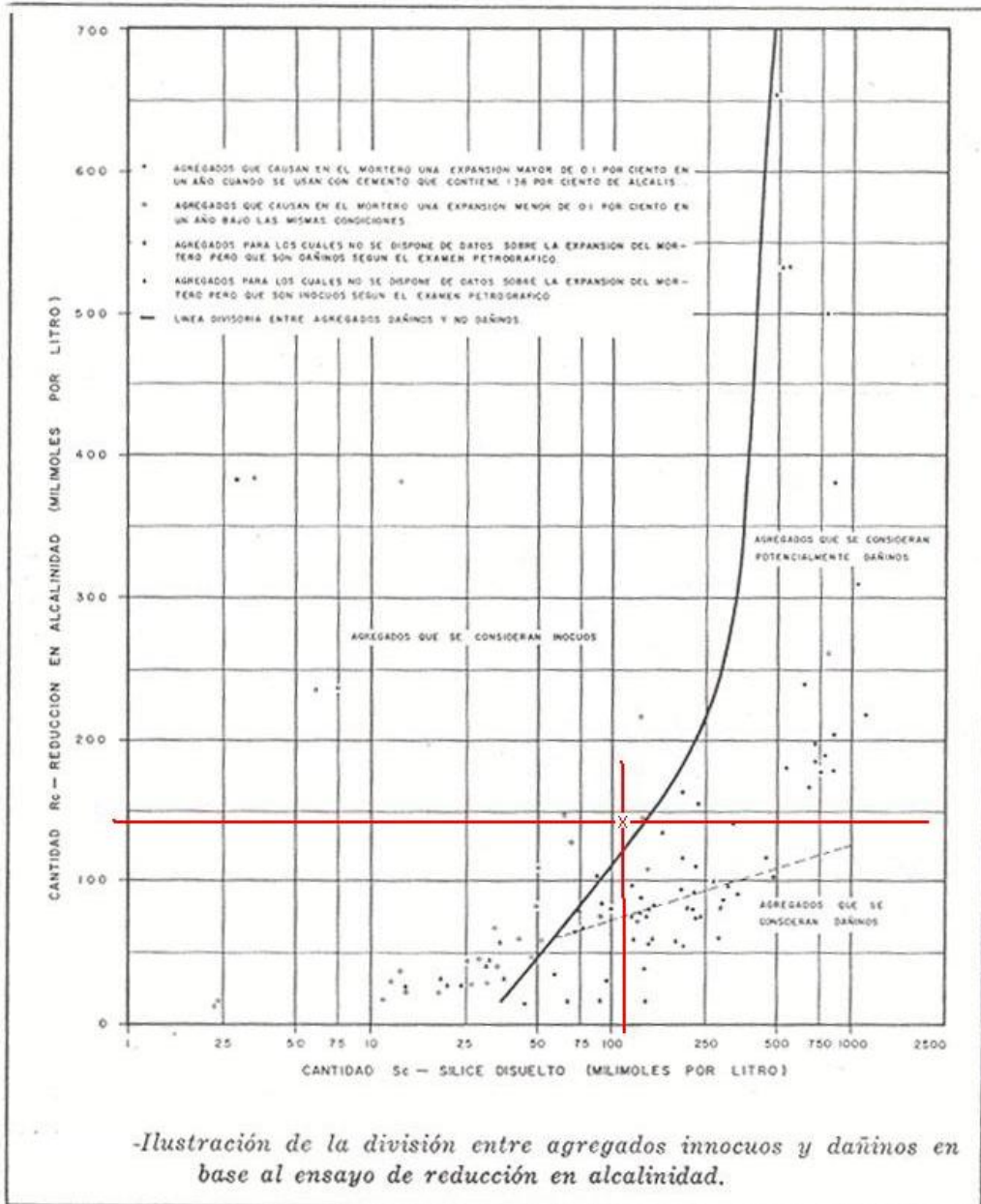


Tabla IX. Reactividad Alcali – Sílice (ASTM C1260)

Muestra	% de Expansión (a 16 días)	Límite de la Norma	Comportamiento Esperado
Arena fuente A	0.22%	0.20%	Potencialmente dañino
Arena fuente B	0.03%		Inocuo
Arena fuente C	0.50%		Potencialmente dañino
Arena fuente D	1.13%		Potencialmente dañino
Piedrín fuente A	0.48%		Potencialmente dañino

Tabla X. Reactividad Alcali – Carbonato (ASTM C586)

Muestra	Edad de la prueba (días)	Cambio de longitud a la edad de la prueba (%)	Límite de la Norma	Comportamiento Esperado
Dolomita fuente E	28	0	0.10%	Inocuo
Dolomita fuente F	28	0.10		Inocuo

Tabla XI. Reactividad Álcali – Carbonato (UNE 146507-2)

Muestra	Relación CaO/MgO	% de Al_2O_3	Comportamiento Esperado	Ver figura
Dolomita fuente E	1.60	0.21	Inocuo	23
Dolomita fuente F	1.55	0.17	Inocuo	24

Figura 23. UNE 146507-2 (Dolomita fuente E)

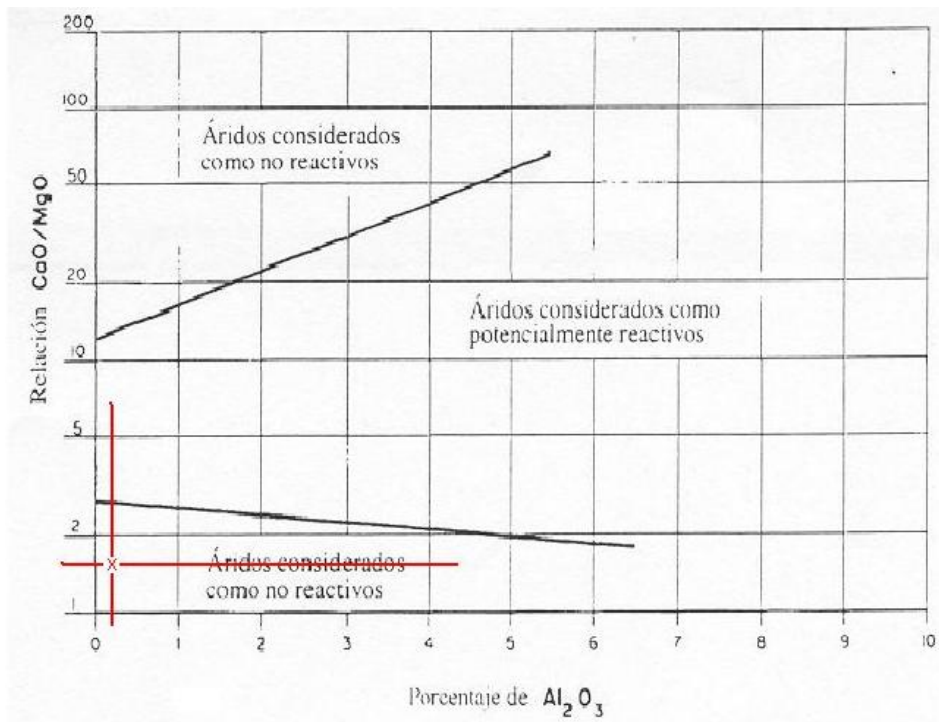


Figura 24. UNE 146507-2 (Dolomita fuente F)

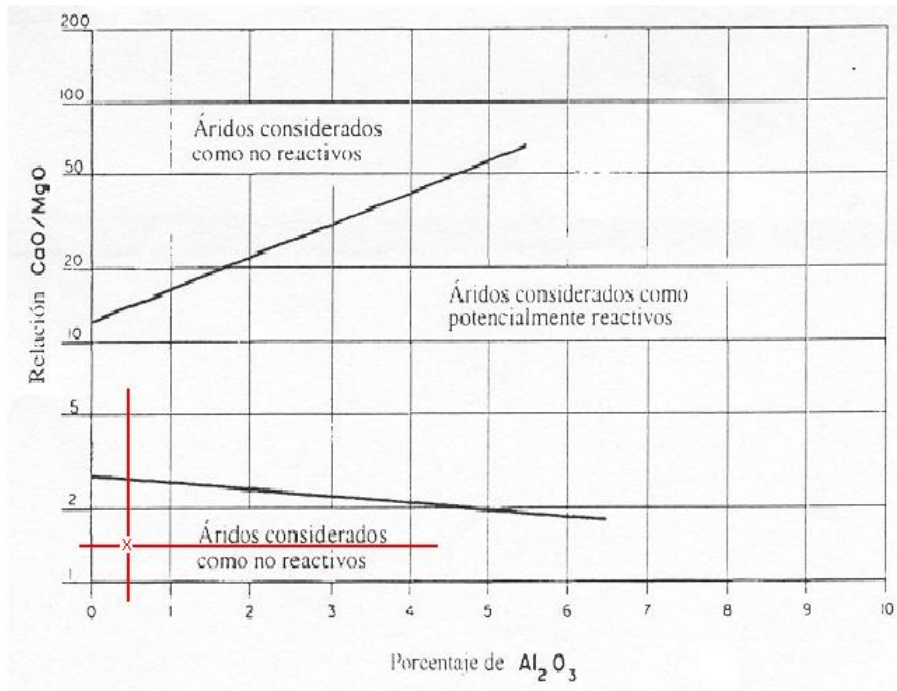


Tabla XII. Análisis Petrográfico (ASTM C295)

Muestra	Estructura Interna, espaciamiento de poros, empacado, cementación de granos	Color	Composición mineral de la Roca	Heterogeneidad	Condición Física general del tipo de roca en la muestra	Recubrimientos, incrustaciones	Presencia de constituyentes que causen reacciones indeseables
Fuente A	No aplicable, las partículas están recubiertas de arcillas. Los granos de granito están poco redondeados; los fragmentos volcánicos muestran buena esfericidad y redondez.	Color variado, por distintos materiales presentes	35% Basalto- andesita 30% Granito 29% Pómez alterada 5% Riolita, riodacita 1% materia vegetal	Agregado muy heterogéneo por la diversidad de componentes rocosos y minerales	Granito sano, pómez alterada	Granos generalmente recubiertos de arcillas	Pómez, materia orgánica y arcillas
Fuente B	Partículas sub-redondeadas, sub-esféricas de caliza, aspecto macroscópico de mármol. Abundantes fragmentos de calcita opaca.	Blanco, gris, beige, escasos fragmentos gris oscuro y bandeados	90% caliza 10% Calcita	Homogénea, presencia de vetas de calcita y marmoleada	Aspecto sano; fragmentos ocasionales con manchas de óxidos de hierro	Presencia de granos recubiertos de arcillas, pero principalmente de calcita o caliza molida	recubrimiento de caliza fina-calcita
Fuente C	Predominio de partículas de alta esfericidad y redondez.	Color variado, por distintos materiales presentes. Predominio de	38% Dacita 29% Andesita 15% Feldespato 6% Basalto 6% Piroxenos	Agregado muy heterogéneo por la diversidad de componentes rocosos y	Recubrimientos de arcillas, alto porcentaje de rocas alteradas (25%)	Recubrimientos de arcillas en gran porcentaje de los fragmentos	Pómez, fragmentos alterados de basalto y riodacita,
Fuente D	Compacta. Masiva, con partículas subredondeadas a subgranulosas de andesita.	Gris oscuro, uniforme en superficie fresca	99% Andesita 1% Indeterminado	Homogénea.	Aspecto sano, con diferentes coloraciones de grises en superficies frescas y previas.	Recubrimientos de polvillo del mismo material	Pequeñas "costras" carbonatadas y/o silificadas

Tabla XIII. Sulfatos solubles en ácido (EN 1744-1)

Muestra	% de SO₃	Límite de la Norma
Arena fuente A	0.005	0.8%
Arena fuente B	0.017	
Arena fuente C	0.024	
Arena fuente D	0.014	
Piedrín fuente A	0.029	

Tabla XIV. Cloruros solubles en agua (EN 1744-1)

Muestra	% de CL⁻	Límite de la Norma
Arena fuente A	0.0037	0.05%
Arena fuente B	0.0011	
Arena fuente C	0.0021	
Arena fuente D	0.0018	
Piedrín fuente A	0.0017	

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como agregados para la fabricación de concreto pueden utilizarse arenas, gravas existentes en yacimientos naturales, rocas trituradas, así como otros productos cuyo empleo resulte aconsejable como consecuencia de estudios realizados en laboratorio.

La naturaleza de los agregados y su preparación deben ser tales que permitan garantizar la adecuada resistencia y durabilidad del concreto, por lo tanto deberá determinarse en cualquier tipo de agregado que se use, la presencia de sustancias reactivas nocivas para el concreto.

Las impurezas orgánicas son las que más frecuentemente se encuentran en los agregados, para detectar la presencia de las mismas se utilizó la norma ASTM C40, mediante la cual se determinó según la tabla 6 que en las arenas de fuentes A, B, C y D la cantidad de materia orgánica fue insuficiente como para alterar la resistencia del concreto, por lo que tales agregados finos son aceptables dentro de los parámetros establecidos en dicha norma. En caso contrario se somete a un ensayo comparativo de resistencia en mortero (ASTM C87) entre la arena en prueba y la arena lavada; si la arena en prueba alcanza el 90% o más de la resistencia de la arena lavada, se acepta. En caso contrario se descarta.

La presencia de material fino arcilloso en el concreto también es perjudicial ya que puede absorber una cierta cantidad de agua de mezclado y causar erupciones o reventones al concreto afectando así su durabilidad y resistencia. Sin embargo para que esto ocurra, la cantidad de arcilla y limo deberá estar comprendida dentro de ciertos límites, las muestras de las fuentes B y D cumplen y las de las fuentes A y C no cumplen con los límites establecidos según la norma AASHTO TP57-99 (tabla VII).

Los agregados químicamente estables en el concreto, no reaccionan químicamente con el cemento de manera nociva. Sin embargo, los agregados con ciertos constituyentes minerales, tales como algunas formas reactivas de sílice reaccionan con los álcalis en el cemento, agua, en los propios agregados o provenientes de alguna fuente externa.

La primera evaluación es el examen petrográfico C294 y C295 si hay material potencialmente reactivo se procede a la prueba química C289. Si aquí salen potencialmente reactivos, todavía queda la posibilidad de comprobar mediante la C1260 que efectivamente son potencialmente reactivos, como efectivamente se comprobó para todas las muestras, salvo la B.

Como complemento de la C1260 también se puede comprobar si el concreto provisto con este agregado se comporta satisfactoriamente en el ensayo de expansión de concreto ASTM C1293 lo que lleva un año, o bien buscar un nuevo agregado, o ver si una combinación dada del agregado en prueba con un cemento puzolánico o con una puzolana evaluadas de acuerdo a ASTM C227 ó ASTM C441, da como resultado una mezcla que no cause expansiones indeseables.

Las reacciones álcali-sílice pueden provocar síntomas visuales en el concreto tales como cambio de color, expansión, agrietamiento, erupciones o reventones.

Las rocas carbonatadas asociadas a la reacción álcali carbonato son de una textura y composición muy particular (ver 4.4) y no constituyen una proporción importante en el abastecimiento de agregados, lo cual se comprobó al someter dolomitas de distintas fuentes (E y F) a los métodos establecidos por las normas ASTM C295, ASTM C586 y UNE 146507-2EK y obtener un comportamiento inocuo en las muestras de ambas fuentes (tablas X, XI y XII, gráficas 23 y 24).

Posteriormente se aplicó la norma EN 1744-1 a arenas provenientes de las fuentes A, B, C y D, y al piedrín de la fuente A, para determinar el % de sulfatos y cloruros que pudieran estar presentes en el concreto por la incorporación de estos en la mezcla a través de los agregados. Se determinó que los agregados analizados contenían % permisibles de estas sustancias dentro de los límites de la norma aplicada (tablas XIII y XIV) por lo cual al utilizarlos en concreto, este no sería víctima de expansión, fisuras o descomposición de los principales productos de hidratación del cemento, como resultado de ataque químico por sulfatos.

CONCLUSIONES

1. La presencia de arcilla en cantidades perjudiciales se detectó en dos fuentes de agregados naturales, lo que puede afectar la durabilidad y resistencia, aumentar los requerimientos de agua y la contracción, por lo que el método de azul de metileno debiera ser utilizado rutinariamente para la evaluación de la cantidad de arcilla perjudicial en el agregado.
2. A pesar que los ensayos señalan que la mayoría de los agregados de ríos del área metropolitana de Guatemala, pueden ser potencialmente reactivos con los álcalis, por la presencia en su composición de material volcánico, en la práctica, el historial de servicio de los concretos producidos, ha sido bueno. No obstante, vale la pena seguir efectuando estas evaluaciones en agregados tanto del área metropolitana, como en el resto del país y sobre todo monitorear su desempeño, para detectar casos de reactividad álcali – sílice en construcciones existentes.
3. La dolomita de las fuentes E y F pueden ser utilizadas en la elaboración de concreto sin provocar reacciones adversas. Ya que las pruebas realizadas a las mismas demostraron que las canteras del área metropolitana de Guatemala, de las cuales se obtuvieron las muestras, no reunían las condiciones litológicas necesarias como para provocar dichas reacciones.
4. Las muestras analizadas no presentaron un contenido perjudicial de sales, como cloruros y sulfatos que pueden afectar tanto la durabilidad como la resistencia y estabilidad volumétrica del concreto (ver 4.5 y 4.6), pero este tipo de ensayos sobre sales o sustancias potencialmente nocivas debe hacerse a todos los agregados de fuentes naturales y en especial a los provenientes de ríos contaminados por desagües domésticos, industriales o agrícolas.

RECOMENDACIONES

1. Que las diferentes empresas fabricantes y distribuidoras de agregados, mantengan un control de calidad adecuado, a través de análisis y ensayos de laboratorio, utilizando las distintas normas establecidas, incluyendo las referidas en el presente trabajo.
2. Se recomienda que los agregados utilizados que no cumplan con las especificaciones, reciban un tratamiento previo para que sus propiedades sean modificadas y así puedan cumplir con las especificaciones establecidas.
3. Aplicar métodos adecuados para la obtención de los agregados a utilizar.
4. Disponer de lugares o recursos adecuados de almacenamiento de los agregados, como áreas techadas, libres del contacto con agua, suelo o sustancias perjudiciales para reducir el riesgo de contaminación.
5. Promover el estudio más a fondo de la reactividad potencial álcali – agregado, en especial en construcciones existentes para determinar el grado real de amenaza y daño derivados de este tipo de acción.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Annual book of ASTM standards (Concrete and Aggregates)*. (sección 4, volumen 04.02). *American Society for Testing and Materials*. Printed in Easton M. D. U.S.A., 2001. 804 pp.
2. Barksdale, Richard D.. *The aggregate handbook*. *National Stone Association*. Washington D.C.: s.e., 1991. 654 pp.
3. Basilio, Eduardo Santos. **Agregados para concreto**. Asociación brasileña de cemento portland. 3^a. ed. Brasil: s.e., 1989. 56 pp.
4. Castro, Pedro Borges. **Corrosión en estructuras de concreto armado**. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.. México: 1998. 125 pp.
5. Farny, James A. y Steven H. Kosmatka. *Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete*. *Portland Cement Association*. U.S.A.: s.e., 1997. 23 pp.
6. Herrera, Estuardo y Byron Mota. **Conferencia sobre agregados**. Cementos Progreso S.A. Guatemala: s.e., 1999. 75 pp.
7. **Información del concreto y sus agregados**. Cementos Progreso S.A. Guatemala: s.e., s.a. 7 pp.
8. **Instrucción del hormigón estructural**. (Serie Normativa). Madrid: ediciones de autor técnico, S.L., 1999. 408 pp.

9. Kosmatka, Steven H. y William C. Panarese. **Diseño y control de mezclas de concreto.** Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.. México: s.e., 1992. 230 pp.
10. Neville, Adam M. **Tecnología del concreto.** Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.. México: s.e., 1999. 612 pp.
11. Matheu, Emilio Beltranena. Agregados para concreto. Tesis ingeniero civil. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 1955. 255 pp.
12. Sanjuán Barbudo, Miguel Ángel y Pedro Castro Borges. **Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto.** Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.. México: s.e., 2001. 46 pp.
13. Skalny, J., V. Johansen, N. Thaulow y A. Palomo. **Materiales de construcción.** (vol.46, No.244). S.l.: s.e., 1996. 19 pp.
14. Somerville, G. *Engineering aspects of alkali-silica reaction. Interim technical note 8. Cement and Concrete Association.* S.l.: s.e.,1985. 7 pp.
15. The diagnosis of alkali-silica reaction. British Cement Association. 2da. Ed. S.l.: s.e.. 1993. 44 pp.

APÉNDICE

METODOLOGÍA

1. Materia Orgánica en Agregado Fino (prueba colorimétrica), Norma

ASTM C40:

1.1 Materiales y reactivos

- a) Agua: debe utilizarse agua destilada o desmineralizada.
- b) Solución de Sosa Cáustica al 3% (30g/lit de agua ó 3gr en 100 ml de agua)

1.2 Equipo

- a) Frascos de vidrio incoloro o biberones de 250 a 350 ml, con tapón de hule y marcas cada 25 ml.
- b) Estufa o plancha de resistencia eléctrica.
- c) Placa colorimétrica ASTM C40
- d) Balanza de 1Kg.
- e) Bandeja pequeña para secado de la arena
- f) Cuchara de albañil pequeña o espátula

1.3 Preparación de la muestra de ensayo

- a) Se toma una muestra representativa de arena, de alrededor de 500 gr.
- b) Se seca la arena en la estufa a temperatura no superior a 110 °C. Durante el secado se mueve constantemente con la cuchara.

1.4 Procedimiento operatorio

- a) Se coloca arena seca y fría en el biberón o frasco hasta la marca de 125 ml.
- b) Se agrega la solución de soda cáustica hasta que el volumen de la arena y el líquido una vez agitados, lleguen a la marca de 200 ml.
- c) Se tapa el frasco o biberón con el tapón de hule, se agita vigorosamente durante dos minutos y se deja reposar durante 24 horas.
- d) Transcurrido este tiempo, se compara por transparencia y contra un fondo blanco, el color del líquido sobre la arena, con la placa de colores normales.
- e) Si el color del líquido sobre la arena es más claro que el color No. 3, el contenido de materia orgánica es inferior al límite aceptable. Si el color del líquido es más oscuro y por lo tanto el contenido de materia orgánica es superior al aceptable, la arena deberá ser estudiada más detenidamente.
- f) Se procederá a lavar la arena con una solución de hidróxido de sodio al 3% seguida de lavado con agua limpia y hacer una nueva prueba. Si el color que se obtiene es más claro que la primera prueba e inferior al límite, esto indicará que sí existía materia orgánica, y que podría usarse la arena previo lavado de la misma. Si se obtiene nuevamente un color oscuro superior al límite a pesar de sucesivos lavados, esto indicará que el color posiblemente es debido a minerales de hierro o manganeso u otros que por lo general no son perjudiciales, en cuyo caso la arena podrá usarse sin previo lavado.
- g) La arena con materia orgánica arriba del límite aceptable, podrá utilizarse sin previo lavado, si se comprueba que su efecto sobre la resistencia de mortero es pequeña y que su efecto sobre el fraguado del mortero o del concreto no es significativo.

1.5 Observaciones

- a) Si no se cuenta con placa de colores normales, puede prepararse una solución patrón (igual a color No. 3), así:
- Disolver dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) de grado reactivo en ácido sulfúrico ($d=1.84$), a razón de 0.250g/100ml. de ácido. La solución debe de ser fresca.
 - Para una solución de color normal permanente, se disuelven 9 gr. de cloruro férrico ($FeCl \cdot 6HO$) de grado reactivo y 1 gr. de cloruro de cobalto ($CoCl \cdot 6HO$) de grado reactivo, en 100 ml. de agua destilada a la cual se han agregado siete gotas de ácido clorhídrico (HCl). Se coloca la solución en envase de vidrio incoloro y se tapa herméticamente.
- b) La prueba colorimétrica para materia orgánica puede servir para conocer la cantidad aproximada de limo a arcilla contenida en la arena, ya que la presencia de 15ml. (1-2 onza líquida) de limo o arcilla sobre la arena corresponden aproximadamente al 3% en masa.

2. Determinación de azul de metileno para arcillas, rellenos minerales y finos, Norma AASHTO TP57-99

2.1 Materiales y reactivos

- a) Agua: debe utilizarse agua destilada o desmineralizada.
- b) Azul de metileno: solución partiendo de azul de metileno reactivo para análisis, con una concentración de 5mg/ml.

2.2 Equipo

- a) Bureta: de 100 a 50 cm.³ de capacidad.
- b) Papel filtro: del tipo WHATMAN no.2.
- c) Varilla de agitación: de vidrio de 250 mm. de longitud y 8 mm. de diámetro.
- d) Agitador magnético con barra de agitación.
- e) Tres beakers de 500 ml. de capacidad.
- f) Balanza: que permita pesar con un 1% de precisión y con la capacidad suficiente para la muestra de ensayo.
- g) Cronómetro
- h) Tamiz de 75µm (No. 200)
- i) Matraz volumétrico de 100 ml de capacidad
- j) Horno capaz de mantener 110 °C ± 5 °C

2.3 Preparación de la muestra de arena

- a) Tomar una muestra representativa de agregado fino.
- b) Secar a masa constante a 110 °C ± 5 °C
- c) Pasar la muestra por el tamiz de 75 µm (No. 200)
- d) La porción que pasa por el tamiz No. 200 se conserva para el ensayo, el resto se descarta.

2.4 Procedimiento de ensayo

- a) Tome 10 gr (± 0.05 gr) del material que pasó por el tamiz No.200 y colóquelos en un beaker de 500 ml.
- b) Agregue 30 ml. de agua destilada y mezcle con el agitador hasta formar un lodo.
- c) Con el lodo todavía mezclándose, llene la bureta con azul de metileno, añada 0.5 ml. de la solución al lodo y agite por un minuto

- d) Remueva una gota del lodo usando la varilla de agitación y colóquela sobre el papel filtro.
- e) Observe la apariencia de la gota en el papel filtro. El punto final está indicado por la formación de un aro azul claro alrededor de la gota. Continúe añadiendo la solución de azul de metileno al lodo en incrementos de 0.5ml. con un minuto de agitación después de cada adición. Continúe ensayando hasta alcanzar el punto final.

2.5 Cálculo y expresión de los resultados

- a) El valor de azul de metileno MBV, de los finos expresados en miligramos de azul por gramos de finos viene dado por la fórmula:

$$MBV = \frac{CV}{W}$$

Donde:

MBV = valor de azul de metileno en mg. de solución por gr, de material que pasó por el tamiz No.200

C = mg. de azul de metileno / ml. de solución

V = ml. de solución de azul de metileno requerido por la titulación

W = gramos de material seco

3. Determinación de la reactividad potencial álcali – sílice de los agregados por el método químico, Norma ASTM C289

3.1 Materiales y reactivos

- a) Agua: debe utilizarse agua destilada o desmineralizada.
- b) Solución de molibdato de amonio (disolviendo 10 gr. de molibdato de amonio en 100 cm.³ de agua).

- c) Solución patrón de sílice, que contenga aprox. 10 milimoles de SiO_2 por litro (disolviendo silicato de sodio en agua).
- d) Acido clorhídrico (1:1)
- e) Solución de ácido oxálico (disolviendo 10 gr. de ácido oxálico hidratado en 100 cm.^3 de agua).
- f) Solución de NaOH 1N.

3.2 Equipo

- a) Balanza analítica
- b) Tamices No. 50 y No.100
- c) Recipientes para la reacción de 50 a 75 cm.^3 de capacidad, hechos de acero inoxidable u otro material resistente a la corrosión y provistos de tapas herméticas.
- d) Baño de temperatura constante, capaz de mantener una temperatura de $80 \pm 1^\circ\text{C}$ durante 24 horas.
- e) Fotómetro capaz de medir la longitud de onda constante de aproximadamente $410\mu\text{m}$.

3.3 Preparación de la muestra de ensayo

- a) Reducir el agregado grueso a un tamaño de 4.76 mm. por medio de trituración.
- b) Cernir el agregado grueso triturado e igualmente la arena para recuperar las partículas del tamiz No. 50 al No. 100.
- c) Deseche el material que pase el tamiz No.100
- d) Reduzca el material retenido por el tamiz No. 50 pasándolo repetidas veces por una pulverizadora de disco y cerniéndolo después de cada pasada.

- e) Se procurará reducir en lo posible la proporción de finos que pase por el tamiz No. 100, para esto lave la muestra sobre el tamiz No. 100 (no más de 100 gr. a la vez).
- f) Seque la muestra lavada a una temperatura de entre 100 y 105 °C durante 20 ± 4 horas.
- g) Deje enfriar la muestra y ciérnala de nuevo en el tamiz No. 100.
- h) Conserve la porción retenida en el tamiz No. 100 como parte de la muestra de ensayo.

3.4 Procedimiento de ensayo

- a) Pese tres porciones significativas de 25 ± 0.05 gr de la muestra seca. Coloque una porción en cada uno de los recipientes de reacción y añada 25 cm.³ de la solución de NaOH 1N por medio de una pipeta. En un cuarto recipiente añada 25 cm.³ de la misma solución de NaOH que sirva como blanco. Selle los cuatro envases después de agitarlos suavemente para liberar el aire atrapado.
- b) Coloque los recipientes en un baño líquido mantenido a $80 \pm 1^\circ\text{C}$, después de 24 horas enfríelos bajo una corriente de agua por 15 minutos hasta menos de 30 °C.
- c) Destape los recipientes y filtre la solución del residuo del agregado.
- d) Filtre el blanco.
- e) Agite el filtrado y luego tome una alícuota de 10 cm.³ del filtrado y diluya con agua hasta 200 cm.³ en un frasco volumétrico.
- f) Prepare una serie de soluciones de concentración de sílice conocida, variando de 0 a 0.5 milimoles por litro, diluyendo porciones de la solución anteriormente preparada de silicato de sodio.
- g) Lea la transmitancia de las diferentes soluciones en el fotómetro en el rango de aproximadamente 140 mμ, comparándolo con una solución de referencia que contiene todos los reactivos, excepto sílice, en 100 cm.³ de agua.

- h) Transfiera una alícuota de 20 cm.³ de la solución diluida en un frasco Erlenmeyer de 125 cm.³, añada 2 ó 3 gotas de solución indicadora de fenolfateína y títule con HCL 0.05N hasta decoloración.

3.5 Cálculo y expresión de los resultados

De la solución filtrada del agregado diluida, se calcula la concentración de SiO₂ como sigue:

$$S_c = 20 \times \frac{100}{V} \times C$$

Donde:

S_c = concentración de SiO₂ en milimoles por litro en el filtrado original

C = concentración de sílice en la solución medida en el fotómetro, en milimoles por litro.

V = volumen de la solución diluida usada, en cm.³

La reducción en alcalinidad se calcula como sigue:

$$R_c = \frac{20 N_o}{V_1} (V_3 - V_2) \times 1000$$

Donde:

R_c = reducción en alcalinidad, en milimoles por litro

N_o = normalidad del HCl usado para la titulación

V₁ = volumen de la solución diluida usada, en cm.³

V₂ = volumen del HCl usado en la titulación con fenolftaleína de la solución con la muestra en cm.³

V₃ = volumen del HCl usado en la titulación del blanco con fenolftaleína en cm.³

4. Determinación de la reactividad potencial álcali – sílice de los agregados por el método de barra de mortero, Norma ASTM C1260

4.1 Materiales y reactivos

- a) Hidróxido de Sodio (NaOH) grado UPS
- b) Agua: tipo IV de norma D1193
- c) Solución de NaOH: cada litro de solución debe contener 40 gr. de NaOH disueltos en 900 ml. de agua y con agua destilada o desionizada adicional hasta obtener 1 litro de solución. La proporción por volumen de solución de NaOH a volumen de barras de mortero en el recipiente debe ser de 4 ± 0.5 vol. de barras de mortero (El vol. de barra de mortero puede tomarse como 184ml.).

4.2 Equipo

- a) Moldes, comparados de longitud y cilindros graduados señalados en norma ASTM C490.
- b) Mezcladora y accesorios según ASTM C305.
- c) Apisonador y espátula según ASTM C109.
- d) Contenedores de barras resistentes e inertes al NaOH.
- e) Horno o baño María: con un control de temperatura para mantener 80 ± 2 °C.

4.3 Preparación de la muestra de ensayo

- a) Deben prepararse por lo menos tres barras de mortero por cada combinación cemento agregado a evaluar.
- b) Los moldes se preparan de acuerdo con ASTM C490.
- c) La dosificación de mortero debe ser una parte de cemento, por 2.25 partes de agregado graduado. Usar relación agua/cemento de 0.47 por masa.
- d) El mortero se mezcla como se indica en ASTM C305.

- e) Las barras se moldean dentro de un tiempo total no mayor de dos minutos y 15 segundos después de completar la mezcla original del mortero.

4.4 Procedimiento de ensayo

- a) Colorar las barras de cada combinación cemento-agregado en recipientes con suficiente agua para cubrirlas totalmente. Cerrar herméticamente los recipientes y ponerlos en un horno o baño maría a 80 ± 2 °C por 24 horas.
- b) Retirar los recipientes del horno o baño maría, de uno en uno, no sacando el siguiente hasta que se hayan medido y retornado al horno o baño, las barras del recipiente anterior.
- c) Las barras deben retirarse del recipiente una a la vez, secándolas con una toalla. Tomar la lectura cero de cada barra inmediatamente después de secada.
- d) Después de la medida cero, colocar las barras de mortero de cada combinación cemento-agregado en recipientes con suficiente solución 1N NaOH a 80 ± 1 °C, para cubrir totalmente las barras. Sellar el recipiente y regresarlo al horno o baño maría.
- e) Las lecturas subsiguientes de las barras se hacen periódicamente (por lo menos 3 intermedias) por los 14 días siguientes a la lectura cero, aproximadamente a la misma hora de cada día. Las lecturas se hacen como se indica para la medida cero, excepto que las barras se regresan a su recipiente después de medidas.

4.5 Cálculo y expresión de los resultados

Calcular la diferencia entre la medida cero de cada barra, y las longitudes determinadas a los intervalos de tiempo escogidos, al más cercano 0.001% de la longitud de base efectiva y anotarlas como expansiones de las barras a esos períodos. Indicar la expansión promedio de las tres barras de cada combinación cemento-agregado con aproximación de 0.01%, para cada período.

5. Determinación de la reactividad potencial álcali – carbonato a ser usadas como agregados de concreto por el método del cilindro de roca, Norma ASTM C586

5.1 Materiales y reactivos

- a) Agua: debe utilizarse agua destilada o desmineralizada.
- b) Solución de Hidróxido de sodio: Disuelva 40 gr. \pm 1 gr. de hidróxido de sodio grado reactivo en agua destilada, dilúyalo a 1 litro y guárdelo en una botella de polietileno.

5.2 Equipo

- a) Equipo de aserrado adecuado para preparar los especímenes de ensayo.
- b) Botellas de almacenamiento: con capacidad de aproximadamente 50 a 100 ml., con las tapas y aperturas de tamaño suficiente para facilitar la extracción de los especímenes.
- c) Comparador de longitud: para la medida adecuada y rápida de longitudes de especímenes.
- d) Un medio positivo de contacto con los extremos cónicos del espécimen para asegurar una medida de longitud reproducible.
- e) Un micrómetro de barril de alta calidad
- f) Referencia o patrón estándar para verificar el dispositivo de medición a intervalos regulares. La barra de referencia debe tener una longitud total de 35 ± 2 mm. La barra debe ser de sílice fundida o de una aleación de acero con un coeficiente de expansión térmica no mayor de 1.0×10^{-6} °C.

5.3 Preparación de la muestra de ensayo

- a) Este método es aplicable a una muestra de piedra obtenida con los requisitos de la práctica D75.

- b) Preparar y probar tres especímenes mutuamente perpendiculares. De éstos, el que muestre el mayor cambio de longitud después de 28 días de inmersión en la solución alcalina será el espécimen a utilizar. Los dos restantes deben desecharse.

5.4 Procedimiento de ensayo

- a) Colocar una marca de posición sobre el espécimen para permitir ponerlo en el comparador en la misma posición durante las medidas subsecuentes.
- b) Tomar la medida de longitud del espécimen de ensayo
- c) A intervalos remover el espécimen, secar con un trapo o toalla y medir hasta que el cambio de longitud, durante un período de 24 horas de inmersión en agua, no exceda 0.02%. La longitud cuando se llega a esta condición, se toma como la longitud de referencia.
- d) Sumergir los especímenes saturados de agua en una botella que contenga un mínimo de 35 ml. de solución de NaOH 1N por espécimen y cerrar herméticamente.
- e) Medir la longitud de los especímenes después de 7, 14, 21 y 28 días de inmersión en la solución de NaOH.
- f) Cuando las medidas se han hecho, sacar el espécimen de la botella, enjuagarlo con agua destilada, secarlo con trapo o toalla de papel hasta quitar en agua en exceso de la superficie y determinar su longitud en la misma posición que se realizó durante la medida inicial.
- g) Después de la medición, retornar de inmediato el espécimen a la botella y cerrarla herméticamente.

5.5 Cálculo y expresión de los resultados

Se calcula el cambio de longitud al más cercano 0.01% de la longitud de referencia como sigue:

$$\Delta l = [(l_1 - l_0) / l_0] \times 100$$

Donde:

Δl = % de cambio de longitud a la edad del ensayo

l_1 = longitud en mm. a la edad del ensayo

l_0 = longitud de referencia después de su equilibrio en el agua.

6. Determinación de la reactividad potencial álcali – carbonato a ser usadas como agregados de concreto por el método químico, Norma UNE 146507-2 EX

6.1 Materiales y reactivos

Los necesarios para realizar la disolución del árido y para la determinación de CaO, MgO y Al_2O_3 , según la Norma UNE-EN196-2.

6.2 Equipo

- a) Machacadora de mandíbulas que permita obtener un tamaño inferior a 2.5mm.
- b) Molino u otro aparato capaz de moler aproximadamente 30 gr. de agregado de un tamaño inferior de 0.160mm.
- c) Tamices normalizados de 2.5 mm. y 0.160 mm.
- d) Aparato para medir la densidad óptica de una disolución a 520 nm. y a 620 nm. que responda a las especificaciones de la norma UNE-EN 196-2.

6.3 Preparación de la muestra de ensayo

Preparar las muestras de acuerdo con el procedimiento operatorio de la norma UNE-EN 196-2.

6.4 Procedimiento de ensayo

- a) Someter la muestra al tratamiento necesario para garantizar su disolución. En la disolución resultante de este tratamiento determinar el contenido de CaO, MgO y Al₂O₃, según la norma UNE EN 196-2.

6.5 Cálculo y expresión de los resultados

Calcular la relación CaO/MgO. Los resultados de esta relación y del valor de Al₂O₃ correspondiente, se representan en el gráfico de la figura 16. El agregado se clasificará como no reactivo o potencialmente reactivo en función de la disposición del resultado en dicha figura.

7. Determinación de los sulfatos solubles en ácido, Norma EN 1744-1:1998

7.1 Materiales y reactivos

- a) Agua: debe utilizarse agua destilada o desmineralizada.
- b) Ácido clorhídrico concentrado
- c) Ácido clorhídrico (1+11)
- d) Indicador rojo de metilo: disolver 20 mg. de rojo de metilo en polvo en 50 ml. de etanol. Añadir a continuación, 50 ml. de agua.
- e) Cloruro de bario: disolver 100 gr. de cloruro de bario (BaCl₂.2H₂O) en 1l de agua; antes de usar esta disolución, filtrar a través de un papel de filtro de textura media.

7.2 Equipo

- a) Una balanza que permita pesar con un 1% de precisión y con la capacidad suficiente para la muestra de ensayo.
- b) Vaso de vidrio de 250 ml.

- c) Varilla de agitación de vidrio
- d) Mechero
- e) Vaso de vidrio de 400 ml.
- f) Papel filtro de textura media

7.3 Preparación de la muestra de ensayo

- a) Reducir la muestra de laboratorio hasta obtener una cantidad no inferior a la indicada en la tabla XV, en función de la dimensión nominal del agregado.

Tabla XV. Masa mínima de la sub-muestra preliminar

Dimensión nominal máxima del agregado en mm.	Masa mínima de la Sub-muestra
63	50
45	35
31.5	15
22.4 ó menos	5

- b) Triturar y reducir la sub-muestra por etapas. A continuación, triturar y reducir hasta obtener una masa aproximada de 20 gr. que pase por el tamiz 0.125mm. Tomar 2 gr. de este material como muestra de ensayo.
- c) En caso necesario, secar la muestra a una temperatura no superior a $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ para evitar la oxidación de los sulfuros.

7.4 Procedimiento operatorio

Pesar la muestra de ensayo con una exactitud de 0.1 mg. (m_6), e introducirla en un vaso de 250 ml., añadir 90 ml. de agua destilada fría. A continuación, mientras se agita la muestra vigorosamente, añadir 10 ml. de ácido aclorhídrico concentrado. Calentar moderadamente la disolución y desmenuzar las partículas sólidas con el extremo aplanado de una varilla agitadora de vidrio. Dejar la disolución en digestión durante 15 minutos a una temperatura ligeramente inferior a la de ebullición

Filtrar el residuo, sobre un vaso de 400 ml., a través de papel filtro de textura media. Lavar a fondo con agua hirviente hasta que el filtrado esté exento de iones cloruro al ensayarlo con nitrato de plata.

Llevar a un volumen de 250 ml. y, si fuera necesario, acidificar con ácido clorhídrico (1+11) hasta obtener un color rojo con el indicador rojo de metilo.

Llevar la disolución a ebullición y mantener ésta durante cinco minutos. Comprobar que la disolución esté clara; si no fuera así, comenzar de nuevo el ensayo con una nueva muestra. Mantener la disolución a la temperatura de ebullición y mientras se agita vigorosamente añadir, gota a gota, 10 ml. de la disolución de cloruro de bario a una temperatura ligeramente inferior a la de ebullición.

Dejar reposar la disolución, filtrar y calcinar el precipitado de sulfato de bario.

Pesar con exactitud de 0.1 mg. y calcular la masa del precipitado (m_7).

7.5 Cálculo y expresión de los resultados

Calcular el contenido en sulfatos solubles en agua del agregado, expresado como SO₃ en % en masa, por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Contenido en sulfatos (en \%)} = \frac{m_7}{m_6} \times 34.30$$

donde:

m_7 es la masa del precipitado, en gramos;

m_6 es la masa de la muestra de ensayo, en gramos;

8. Determinación de los cloruros solubles en agua por el método de Mohr, Norma EN 1744-1:1998

8.1 Materiales y reactivos

- a) Agua: debe utilizarse agua destilada o desmineralizada.
- b) Disolución de cromato de potasio (K₂CrO₄): disolver 10 gr. de cromato de potasio en 100 ml. de agua.
- c) Disolución de nitrato de plata (AgNO₃) 0.01 mol/l

8.2 Equipo

- f) Dos botellas de plástico de boca ancha, de 1 litro de capacidad y tapones
- g) Dos botellas de vidrio, plástico o metal de boca ancha y cierre hermético
- h) Pipetas de 25 ml, 50 ml y 100 ml.
- i) Matraces (erlenmeyer) con tapón, con una capacidad de 100 ml. y 250 ml.
- j) Una balanza que permita pesar con un 1% de precisión y con la capacidad suficiente para la muestra de ensayo.

8.3 Preparación de la muestra de ensayo

- a) Reducir la muestra de laboratorio, hasta obtener una muestra de ensayo de 250 gr. de agregado (fino, grueso o ligero).

8.4 Procedimiento de ensayo

- a) Preparación de los extractos: Utilizar, para los agregados finos y gruesos, las botellas de plástico de boca ancha de 1 litro de capacidad. Para los agregados ligeros, emplear las botellas de 5 litros de capacidad. Pesar cada botella y anotar su masa redondeada al gramo más próximo.

Colocar las muestras de ensayo en las botellas, pesar estas últimas con su contenido y anotar su masa con la exactitud, aproximada, de 1 gr. Calcular por diferencia la masa del agregado en cada botella.

Añadir a cada botella una masa de agua igual a la de los áridos. Para los áridos ligeros, añadir un litro de agua. Fijar los cierres herméticos de las botellas y mezclar su contenido agitando, al menos, 20 veces. Dejar decantar hasta que el líquido sobrenadante sea más o menos claro.

- b) Determinación del contenido en iones cloruro en los extractos: tomar 25 ml. del agua sobrenadante con una pipeta de 25 ml. y transferir a un matraz Erlenmeyer de 100 ml.

Añadir al matraz cuatro a seis ml. de la disolución de cromato de potasio y mezclar.

A continuación, valorar con la disolución de nitrato de plata de 0.01 mol/l hasta obtener un color rojo claro. Anotar el volumen consumido V_8 de la disolución de nitrato de plata.

8.5 Cálculo y expresión de los resultados

Calcular el contenido de iones cloruro, C, del agregado, expresado en % en masa, por medio de la siguiente expresión:

$$C \text{ (en \%)} = 0.01 \times 0.03545 \times V_8 \times W \times 4$$

Donde:

V_8 es el volumen utilizado de la disolución de nitrato de plata 0.01 mol/l, en mililitros;

W es la relación agua/agregado, en gramos/gramo. Para agregados ligeros, W es 1000 gr./masa del agregado, en gramos.