



01146  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO 4

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA 2ej

" EFECTOS DE LA REACCION ALCALI -AGREGADO  
EN EL CONCRETO "

T E S I S

MAESTRO EN INGENIERIA  
(CONSTRUCCION)

P R E S E N T A

ING. RUBEN FRAGOSO ESTRELLA

FALLA DE ORIGEN



CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F.

JULIO 1995



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

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

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

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

# **EFFECTOS DE LA REACCION ALCALI AGREGADO EN EL CONCRETO**

**RUBEN FRAGOSO ESTRELLA**

**SOLAMENTE CUANDO NO NOS ATREVEMOS**

**ES CUANDO LAS COSAS SE VUELVEN DIFICILES**

## **A MIS PADRES**

**El Sr. Francisco Fragoso S. y María de los Angeles Estrella G.  
Por todo su cariño, confianza y apoyo incondicional.  
Para ellos todo mi amor y respeto**

## **A MIS HERMANOS:**

**Lic. Francisco  
L en C. Myriam Elizabeth  
Lic. Norma Angélica**

**Parte fundamental de mi desarrollo**

**A la memoria de mi abuelita María Estrella A.**

**Con todo respeto y agradecimiento al Ing. Juan L. Cottier Caviedes por la aportación de sus conocimientos y su paciencia para la realización de este trabajo.**

**Agradezco al Ing. Gustavo del Río San Vicente por la información proporcionada**

**Mi agradecimiento al Ing. Amilcar Galindo Solorzáno por su gran ayuda**

**Al Ing. David Govea Torres por su apoyo y comentarios**

**A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme esta oportunidad tan grande.**

# INDICE

<b>CAPITULO I</b>	<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
1.1	ANTECEDENTES	3
<b>CAPITULO II</b>	<b>MECANISMOS DE LA REACCION ALCALI AGREGADO</b>	<b>7</b>
2.1	REACCION ALCALI-CARBONATO	9
2.21	REACCION ALCALI-SILICE	10
2.22	PAPEL DEL HIDROXIDO DE CALCIO	15
2.23	MECANISMOS DE LA REACCION ALCALI-SILICE	16
2.30	FACTORES DE INFLUENCIA DE LA REACCION ALCALI-SILICE	20
2.31	ALCALIS EN EL CONCRETO	20
2.32	COMPONENTE DE SILICE REACTIVO EN LOS AGREGADOS	25
2.33	MEDIO AMBIENTE	28
2.34	TEMPERATURA	30
2.40	CONCEPTO DE PROPORCION PESIMA	31
<b>CAPITULO III</b>	<b>EFECTOS DE LA REACCION ALCALI-SILICE EN EL CONCRETO</b>	
3.1	CARACTERISTICAS DEL CONCRETO AFECTADO	34
3.12	EXPANSION DEL CONCRETO	35
3.13	AGRIETAMIENTO	37

3.20	EFFECTOS EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO	39
3.30	EFFECTOS EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	42
3.31	VIGAS DE CONCRETO REFORZADO	43
<b>CAPITULO IV</b>	<b>METODOS PARA EL DIAGNOSTICO DE AGREGADOS REACTIVOS</b>	<b>46</b>
4.1	EXAMEN PETROGRAFICO ASTM C 295	47
4.2	PRUEBA DE FLUORESCENCIA DEL GEL	48
4.3	METODO QUIMICO ASTM C 289	50
4.4	METODO DE LA BARRA DE MORTERO ASTM C 227	52
4.41	METODO ACELERADO DE LA BARRA DE MORTERO ASTM C9 P-24 & PROPUESTA CSA	54
4.5	METODO DEL PRISMA DE CONCRETO CAN/CSA A23.2-14A	55
4.51	NUEVA PROPUESTA AL METODO DEL PRISMA DE CONCRETO CAN/CSA A23.2-14A	57
4.6	METODO DE LA BARRA DE MORTERO EN AUTOCLAVE	59
<b>CAPITULO V</b>	<b>SITUACION DEL EFECTO ALCALI-AGREGADO EN LA REPUBLICA MEXICANA</b>	<b>63</b>
5.1	CASO REAL EN MEXICO	68
<b>CAPITULO VI</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>77</b>
	MEDIDAS DE REPARACION	81
	RECOMENDACIONES	82
	BIBLIOGRAFIA	84

---

# INTRODUCCION

El concreto es un material tan versátil y fácil de elaborar que todas las personas involucradas en su proceso de fabricación dan por hecho que "conocen" adecuadamente los elementos básicos, las propiedades y el comportamiento del concreto, esto ha ocasionado que se dé poca atención a la geología de sus constituyentes, y es quizás uno de los más graves problemas.

Por fortuna la situación está cambiando, el reconocimiento del problema de la reacción álcali-agregado en algunos países ha contestado la vieja pregunta, del porqué del deterioro prematuro del concreto.

La reacción álcali-agregado es un caso particular de las reacciones químicas del concreto, en la que se involucran los hidróxidos de álcalis, usualmente aportados por el cemento portland, y que son liberados durante el proceso de hidratación, dando origen a una solución de poro, esta solución interna del concreto contiene iones de sodio  $\text{Na}^+$ , potasio  $\text{K}^+$ , calcio  $\text{Ca}^{2+}$ , e iones de hidroxil  $\text{OH}^-$ . La concentración de éstos depende de la cantidad de los compuestos de sodio y potasio presentes en el cemento portland anhidrido, esta solución reacciona con ciertas formas de sílice reactiva presentes en las partículas del agregado, la reacción química requiere de agua para producir el gel alcali-sílice el cual se hincha cuando absorbe humedad. La cantidad del gel y la presión de expansión ejercidas varían dependiendo de la temperatura de reacción, tipo y proporción de materiales reactivos, composición del gel y de otros factores.

---

Las características del concreto afectado incluyen el agrietamiento, la expansión y el consecuente desplazamiento de los elementos estructurales, el astillamiento de la superficie del concreto "pop-out" y la presencia del gel en las fisuras o asociado con las partículas del agregado, la reacción típicamente toma entre 5 a 20 años en desarrollarse, a pesar de que hay muchas excepciones.

Actualmente la reacción álcali-agregado no es un fenómeno que atemorice, siempre y cuando se haya detectado con oportunidad, ya que existen métodos adecuados para el diseño de mezclas, medidas preventivas y ensayos de laboratorio, con lo cual se pueden producir concretos que reúnan todas las cualidades que el diseñador requiere cuando la estructura se encuentre en servicio, y con esto se puede lograr que el concreto tenga una vida útil de acuerdo a lo que se planeo. Todos los ingenieros civiles deben sentirse incómodos al ver que el concreto no se comporta de acuerdo a lo que se proyectó.

---

## 1.1 ANTECEDENTES

El concreto se produce por lo general mezclando tres componentes básicos: cemento, agua y agregados pétreos. La mezcla del cemento con el agua constituye la pasta de cemento que al endurecerse, aglutina los agregados y convierte el producto en un cuerpo resistente.

Desde su descubrimiento ha sido utilizado como un material de construcción durable, entendiendo como durabilidad la capacidad de resistencia del material, a lo largo del tiempo, ésta depende de factores intrínsecos (materiales, proporciones, ejecución) y extrínsecos (medio ambiente, condiciones de servicio y mantenimiento).

A principios del siglo XIX se consideraba a los agregados como cuerpos inertes, es decir, elementos que proporcionaban únicamente volumen (relleno) al concreto, además se aceptaban solo dos agentes que podían causarle daño; congelación-deshielo y el agua de mar, haciendo a un lado cualquier tipo de reacción que involucrara a la pasta de cemento y a los agregados, los cuales, por lo general, tienen efectos perjudiciales que normalmente dan origen a expansiones nocivas para la integridad de las estructuras de concreto.

Actualmente se considera que son muchas las causas que pueden provocar el agrietamiento en el concreto, incluyendo deficiencias en el diseño, construcción, esfuerzos térmicos, contracción por secado, congelación-deshielo, ataque químico, etc, y pueden actuar solos o en combinación, y es difícil determinar cual de éstos factores influye más en el deterioro del concreto, por lo anterior, es importante distinguir entre el daño ocasionado por estos factores y la reacción álcali-agregado, ésta se caracteriza por la presencia de un gel (álcali-sílice), que se forma al reaccionar los álcalis del cemento con los agregados que contienen formas de sílice inestable, los daños en la estructura son provocados por la expansión del gel que se produce después de absorber humedad, al principio de la reacción los aumentos de volumen del gel pueden hallar acomodo en los poros de

---

los agregados y de la pasta hidratada, y en los espacios intersticiales entre ambos, pero si la reacción continúa y hay suficiente aporte de agua, la subsecuente expansión del gel origina tensiones internas que agrietan al concreto, lo que puede ser agravado por las condiciones del medio ambiente, la combinación aparentemente inadecuada de materiales y las condiciones de exposición desfavorables que pueden afectar más que las deficiencias en el diseño, a menos que sean consideradas en esta etapa.

Durante 1920 y 1930 un gran número de estructuras de concreto en California, en Estados Unidos, comenzaron a desarrollar un severo agrietamiento, pocos años después de su construcción, a pesar de que cumplían ampliamente con las especificaciones marcadas en los códigos vigentes de diseño, construcción y calidad de los materiales; motivados por encontrar una respuesta real al fenómeno de agrietamiento, un amplio grupo de investigadores se dieron a la tarea de estudiar el comportamiento inexplicable hasta ese momento del concreto.

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

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

Blanks y Meissner estudiaron el deterioro en el concreto de la presa Parker, y fueron capaces de mostrar el producto de la reacción álcali-silice en el concreto, y observaron que los componentes

---

reactivos en el agregado fueron alterados por fragmentos de andesita y riolita que juntas solamente representaban cerca del 2% del agregado total.

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

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

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

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

---

Desde que Stanton publicó sus primeros hallazgos en 1940, un volumen enorme de artículos han sido publicados en los cinco continentes. En 1974, se llevó a cabo en Dinamarca la primera de una serie de reuniones internacionales de científicos interesados en los problemas de la reactividad álcali-agregado en el concreto, la segunda reunión se realizó en Reykjavik, Islandia en 1975, solamente 15 meses después de la primera, debido al interés que surgió en este país donde la reacción afectó las principales estructuras industriales, las siguientes reuniones fueron en Inglaterra 1976, Estados Unidos 1978, Sudáfrica 1981, Dinamarca 1983, Canadá 1986, Japón 1989, Inglaterra 1992., México 1993.

La serie de publicaciones de estas conferencias son la fuente más importante de información disponible hasta el momento, incluyendo la valiosa experiencia nacional e internacional referente a los hallazgos, investigaciones, historia de los casos y medidas preventivas.

---

## 2.0 MECANISMOS DE LA REACCION ALCALI-AGREGADO.

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

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

- a) Reactividad álcali-carbonato
- b) Reactividad álcali-sílice

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

La reactividad álcali-agregado es un fenómeno muy complejo, ya que existen muchos parámetros interactivos e interdependientes que influyen en su aparición, e incluso actualmente, no existe un examen que pueda garantizar que una estructura nunca será afectada por dicho fenómeno, sin embargo, la reacción álcali-agregado no es un fenómeno que atemorice si se toman

---

las medidas pertinentes, pero puede llegar a ser devastadora cuando se presenta en una estructura si existen las condiciones favorables para su desarrollo.

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

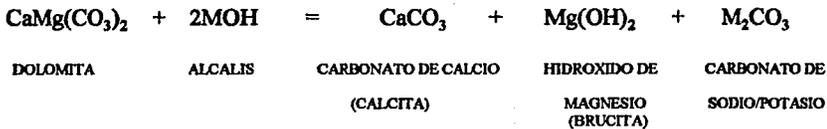
Un gran número de países han experimentado este fenómeno de alguna manera, ya sea media o intensa, esto se debe a que no hay agregados que puedan ser considerados totalmente no-reactivos, a pesar de que pueden permanecer así durante mucho tiempo.

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

## 2.1 REACCION ALCALI-CARBONATO

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

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



donde M representa al Potasio (K) o Sodio (Na)

La reacción álcali-carbonato se presenta únicamente con agregados calizos dolomíticos finos, los cuales contienen calcita intersticial y arcilla, que producen expansiones significativas, con frecuencia se forman zonas de reacción del orden de 2 mm. alrededor de las partículas reactivas del agregado. En esos contornos se desarrollan grietas de tipo "mapa" que ocasionan pérdida de adherencia entre el agregado y la pasta de cemento. La causa no está propiamente entendida pero se ha sugerido que la dedolomitización de los cristales en las partículas del agregado abren canales permitiendo que la humedad sea absorbida por la arcilla que antes estaba seca, la dilatación provocada por esta absorción causa expansiones irreversibles de la roca y el subsecuente agrietamiento del concreto.

---

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

Como se señaló el proceso de la reacción es esencialmente dedolomitización, esto es, una descomposición de la dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) en presencia del hidróxido de sodio o potasio ( $2\text{NaOH}$  o  $2\text{KOH}$ ) propiciando la formación de calcita  $\text{CaCO}_3$  y de brucita  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , minerales estables e insolubles.

La diferencia entre las reacciones álcali-silíce y álcali-carbonato es que en esta última hay una ausencia de cantidades significativas de gel, los álcalis se regeneran y probablemente por esta razón las puzolanas no son efectivas para controlar la expansión álcali-carbonato. Afortunadamente, las rocas con carbonato reactivo no son muy comunes y, por lo general, se pueden evitar.

## 2.2 REACCION ALCALI-SILICE

De los dos tipos de reacciones la más frecuente es la reacción álcali-silíce. La reactividad álcali-silíce es una reacción química interna entre los hidróxidos de álcalis y ciertas formas de material silíceo en el agregado del concreto. La reacción es esencialmente expansiva ya que tiene la capacidad de desarrollar suficiente presión de dilatación para fisurar y romper el concreto.

---

Generalmente la reacción progresa lentamente durante algunos años antes de que los efectos de la expansión y del daño interno lleguen a ser visibles.

Esta reacción tiene la particularidad de producir un gel "álcali-sílice" el cual es higroscópico y es el resultado de la interacción de los álcalis-solubles en el concreto y los elementos integrantes de las partículas del agregado, que por sus características de ser hidrofílico absorbe humedad, incrementando su volumen, de esta manera genera presiones suficientes para fracturar la estructura de concreto.

Como la reacción álcali-sílice es interna, química y expansiva, la evidencia más directa y visible es el agrietamiento, el concreto afectado por la reacción muestra cambios importantes en sus características físicas, mecánicas y microestructurales, estas serán comentadas posteriormente.

### 2.21 QUIMICA DE LA REACCION ALCALI-SILICE.

Las reacciones químicas son clasificadas como homogéneas si tienen lugar dentro de una fase única como solución o heterogéneas si involucran dos o más fases. Una fase es una porción de un sistema físico (líquido, gas, sólido) que es completamente homogénea, que tiene límites definibles, y que puede separarse físicamente de otras fases.

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

---

En la fig 2.1. se muestra un esquema de la reacción álcali-sílice: el transporte de masa es una característica esencial, las partículas del agregado, normalmente consisten de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), y son inestables en el medio ambiente del concreto. La reacción comienza con una reducción en la energía libre del sistema.

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

Los detalles de la reacción pueden observarse en la fig.2.2 que muestra la naturaleza compleja de la superficie del agregado y la microestructura de la pasta de cemento. En la figura se aprecia que muchos de los eventos relevantes ocurren a nivel de los átomos.

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

Dent-Glasser<sup>(4.5)</sup> Señala que el gel es similar a capas de constitución indefinidas en la interfase del agregado-pasta de cemento. El gel absorbe agua e iones solubles, principalmente  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . El gel es insoluble en el líquido, y se concentra principalmente en las orillas susceptibles de las partículas del agregado síliceo. El gel suave puede también ser exudado por las presiones mecánicas de la expansión.



FIG. 2.1 INICIO DEL TRANSPORTE DE MASA DE LA REACCION ALCALI-SILICE. TRAYECTORIA DE TRANSFERENCIA ENTRE LA SOLUCION DE PORO Y EL AGREGADO. TAMBIEN PUEDE OCURRIR UNA TRAYECTORIA SECUNDARIA ENTRE LOS SOLIDOS, AGREGADO Y PASTA DE CEMENTO

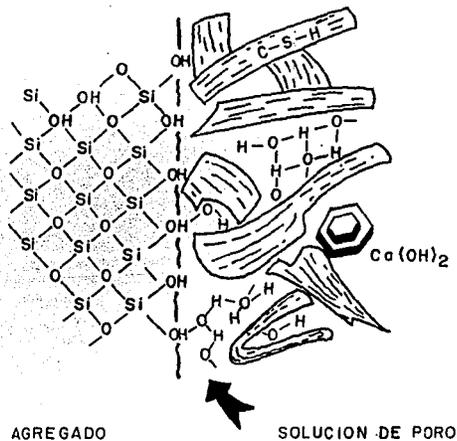
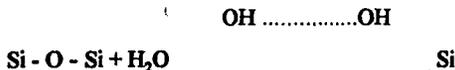


FIG. 2.2 SE OBSERVA LA MICROESTRUCTURA DE LA REACCION ASI COMO LA ESTRUCTURA EN LA INTERFASE AGREGADO-PASTA DE CEMENTO.

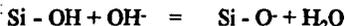
---

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



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

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



Se libera más agua en el proceso. La carga negativa Si-O atrae a las cargas positivas, rápidamente abundan el sodio, potasio y el calcio se difunde en el gel en número suficiente para balancear la carga en el grupo de cargas negativas. Dent-Glasser y Kataoka(4) han representado por estequiometría como;



En donde la carga de compensación es lograda por Na<sub>2</sub>O, aunque, por supuesto, la implicación es que otros cationes pueden participar.

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



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

La extensión de la expansión es difícil de predecir, el gel de sílice tiene contenidos de agua y densidades que son variables sobre rangos amplios, y la posibilidad adicional para absorber del agua  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , etc, esto provoca que la densidad y el volumen específico varíen ampliamente.

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

La absorción es el proceso fisicoquímico, el cual gobierna las propiedades de contracción-expansión del gel. Los geles duros son más probables que causen las fuerzas de expansión que provocan el agrietamiento, mientras más fluido o acuoso es el gel, es rápidamente inyectado en las grietas y puede emerger con el tiempo como exudación, los silicatos solubles también emigran y subsecuentemente son reprecipitados, principalmente en las zonas donde el pH ha disminuido, esto ocurre durante la carbonatación.

---

## 2.22 PAPEL DEL HIDROXIDO DE CALCIO $\text{Ca}(\text{OH})_2$ EN LA REACCION

En la reacción álcali-silice el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  juega un papel muy importante, acelera la penetración de los iones hidratados de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{OH}^-$  en el grano reactivo, impide la difusión del  $\text{SiO}_2$  fuera del grano reactivo y la presencia de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sólido actúa como un amortiguador para mantener una concentración alta de  $\text{OH}^-$ .

En el medio ambiente de la pasta de cemento, la expansión ocurrirá si la proporción entre la penetración de las sustancias en el grano reactivo excede la difusión del  $\text{SiO}_2$ . Este proceso se muestra esquemáticamente en la fig. 2.3.

Si el contenido de álcalis es bajo, solamente una cantidad limitada de iones hidratados  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{OH}^-$  pueden penetrar en el grano, esto es, debido al tamaño de los iones de  $\text{Ca}^{2+}$ . Si la concentración de álcalis es alta, pequeños iones hidratados de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{OH}^-$  podrán penetrar en el grano reactivo sin problemas. Esta penetración de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{OH}^-$  provocará la ruptura de los lazos de Si-O-Si, de este modo se abre el grano y posteriormente ocurre la penetración de los iones de  $\text{Ca}^{2+}$ , además de los iones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{OH}^-$ .

Una presencia excesiva de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y una concentración alta de álcalis, limita la cantidad de  $\text{SiO}_2$  que puede difundirse fuera del agregado, la expansión ocurre cuando más material de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$ , y el agua penetran en los granos de silice esparcido..

El papel anterior del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es propuesto por Chatterjee y es completamente diferente al que asignó en su hipótesis Powers y Steinour. De acuerdo con su hipótesis la expansión del grano debería ocurrir en un medio bajo en  $\text{CaO}$ , mientras que de acuerdo a Chatterjee, la expansión del grano se presenta en un medio elevado de  $\text{CaO}$ .

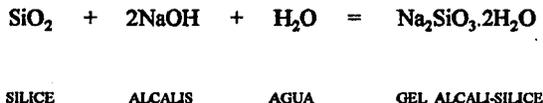


Diferentes estudios de la composición del gel álcali-silice muestran un alto contenido de CaO en el gel, como se observa en la fig. 2.4 esto comprueba la hipótesis de Chatterjee.

### 2.23 MECANISMOS DE LA REACCION ALCALI-SILICE.

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

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



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



---

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

Para que la reacción álcali-sílice tenga lugar en la práctica, debe estar presente alguna forma de sílice reactivo en el agregado, una fuente de álcalis ya sea interna o externa y la presencia de agua. Además, tiene que haber algún modo para que la solución de álcalis entre en contacto con el sílice reactivo.

#### 2.24 Secuencia de la reacción álcali-sílice

**Etapa 1.-** Desarrollo del agrietamiento en el concreto, como se señaló anteriormente, el agrietamiento es el resultado de la interacción de varios factores, el cual se desarrolla lentamente durante varios años.

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

**Etapa 3.-** Si hay un agregado de sílice reactivo en el concreto, la solución de álcalis se difunde en las partículas del agregado. Una reacción química entonces tiene lugar entre la solución de álcalis y el sílice reactivo del agregado y se forma el gel álcali-

---

silice, una vez formado el gel, el cual es higroscópico tiene la capacidad de absorber agua y expandirse.

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

**Etapas 5.-** El gel álcali-silice es ahora capaz de fluir fuera del agregado a través de la pasta de cemento a lo largo de las microgrietas que se han formado como resultado de las expansiones.

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

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

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

En la frontera de la partícula del agregado y la pasta de cemento, el gel llena completamente la grieta, y muestra una capa muy fina. En la pasta de cemento el gel es encontrado de nuevo

---

como un depósito en la periferia de la microgrieta, que se ha desarrollado en una red compleja alrededor de las partículas finas del agregado.

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

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

En el mecanismo de reacción presentado se considera que el concreto se ha agrietado antes de que la reacción se inicie.

---

### 2.30 FACTORES DE INFLUENCIA DE LA REACCION ALCALI-SILICE

Como la reacción álcali-silice es de naturaleza química, es necesario que los siguientes puntos se presenten para que la reacción ocurra y cause daño:

- a) Suficientes álcalis en el concreto
- b) Una cantidad crítica de sílice reactiva en el agregado
- c) Humedad

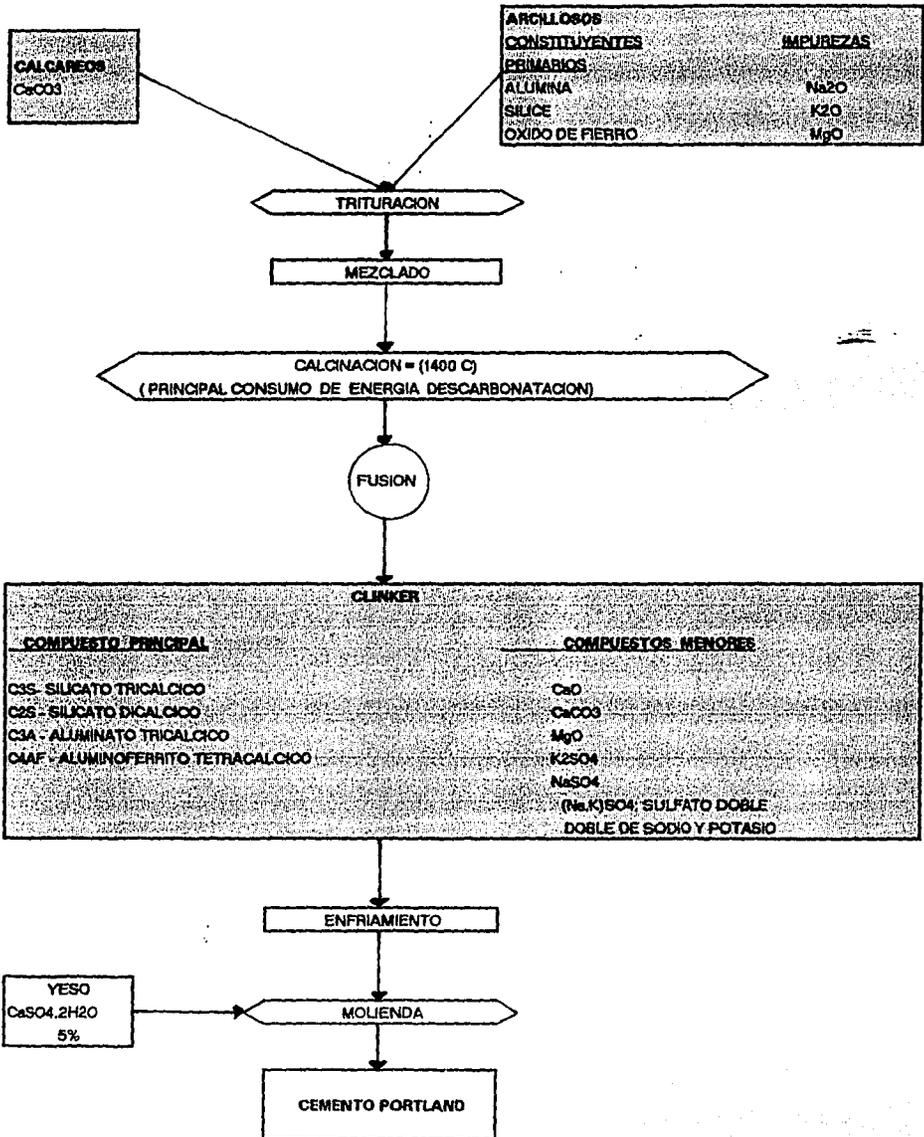
### 2.31 ALCALIS EN EL CONCRETO

El término alcalino usado en relación a la reacción álcali-silice, generalmente se refiere a los álcalis de sodio y potasio, ambos presentes en el cemento portland.

El cemento portland que es comúnmente utilizado en la fabricación del concreto, se obtiene mediante la molienda fina de materiales calcáreos (caliza) y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alumina u óxidos de fierro, los que se mezclan minuciosamente en ciertas proporciones y posteriormente se calcinan en un horno rotatorio a una temperatura de aproximadamente de 1400°C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando pequeñas esferas que varían de 3 a 5 mm de diámetro llamadas clinker. El clinker se enfría lentamente hasta 100°C y se tritura para obtener un polvo fino, después se adiciona un 5% aproximadamente de yeso, y el producto comercial resultante es el cemento portland que tanto se usa en todo el mundo, este proceso se representa en el diagrama No 2.5.

Se suelen considerar cuatro compuestos principales en el cemento, que constituyen el 90% de su peso. A continuación se presentan, junto con sus símbolos de abreviación. Esta notación es

# PROCESO DE FABRICACION DEL CEMENTO



utilizada por los químicos del cemento, describe cada óxido con una letra,  $\text{CaO} = \text{C}$ ,  $\text{SiO}_2 = \text{S}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$ .

Análogamente, el  $\text{H}_2\text{O}$  del cemento hidratado se indica por una H.

<b>Compuesto Principal</b>	<b>Composición de óxido</b>	<b>Abreviatura</b>
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

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

Silicato tricálcico,  $\text{C}_3\text{S}$ , se hidrata y endurece rápidamente y es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia a edad temprana.

Silicato dicálcico,  $\text{C}_2\text{S}$ , se hidrata y endurece lentamente y contribuye en gran parte al incremento de resistencia a edades mayores de una semana.

Aluminato Tricálcico,  $\text{C}_3\text{A}$ , libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento, también contribuye levemente al desarrollo de resistencia temprana. El yeso que se agrega al cemento durante la molienda final, retrasa la velocidad de hidratación del  $\text{C}_3\text{A}$ .

Aluminoferrito Tetracálcico,  $\text{C}_4\text{AF}$ ; reduce la temperatura de formación del clinker, se hidrata con cierta rapidez, pero contribuye mínimamente a la resistencia. La mayoría de los efectos del calor de hidratación se deben al  $\text{C}_4\text{AF}$  y a sus hidratos.

---

En presencia del agua, los cuatro compuestos se hidratan para formar nuevos compuestos que constituyen la infraestructura de la pasta de cemento endurecido en el concreto. Los silicatos de calcio,  $C_3S$  y  $C_2S$ , que constituyen cerca del 75% del peso del cemento, se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ) e hidrato de silicato de calcio (CSH, gel de tobermorita). El  $C_3A$  reacciona con el agua y con el hidróxido de calcio para formar el hidrato de aluminato tetracálcico. El  $C_4AF$  reacciona con el agua para formar hidrato de aluminoferrito de calcio. El  $C_3A$  reacciona con el yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), dando lugar al hidrato de sulfoaluminato de calcio (etringita).

Los silicatos de calcio contienen pequeñas impurezas de alguno de los óxidos existentes en el clinker. El  $C_3S$  "impuro" se conoce como alita y el  $C_2S$  "impuro" como belita.

Además de los compuestos principales mencionados, existen algunos compuestos menores como,  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $Mn_2O_3$ ,  $K_2O$  y  $Na_2O$ , que generalmente no sobrepasan de un pequeño porcentaje del peso del cemento; se debe destacar que el término "menores" se refiere principalmente a la cantidad, pero no necesariamente a su importancia. Dos de estos compuestos revisten interés: los óxidos de sodio y potasio,  $Na_2O$  y  $K_2O$ , conocidos como álcalis, su presencia en el cemento depende de las materias primas y del proceso de fabricación, usualmente la fracción arcillosa y el carbón (si éste es utilizado para el fuego del horno). Si el material arcilloso utilizado como materia prima contiene mica o arcilla ílítica, entonces el clinker producido estará enriquecido en potasio, mientras que si está presente el feldespato degradado el clinker puede contener más sodio o potasio o ambos dependiendo de la composición del feldespato en la materia prima. La porción final de los álcalis presentes en el clinker será dependiente de las porciones de mica e ílita o feldespato en la alimentación del horno.

---

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

Estos álcalis son liberados durante el proceso de hidratación y pueden llegar a reaccionar con los agregados que contengan formas de sílice reactivo, esta reacción que es del tipo sólido-líquido produce el gel álcali-sílice, y aumenta de volumen conforme absorbe agua, esta expansión genera presiones internas en el concreto que pueden ser capaces de dañar la estructura.

Las especificaciones para cementos portland ASTM C150, limitan el contenido de álcalis en el cemento a un máximo de 0.6% expresado como el equivalente de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), convirtiendo el óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) a su equivalente en  $\text{Na}_2\text{O}$ , para lo cual se le debe dividir entre su peso molecular (94.2) y multiplicarlo por el peso molecular del  $\text{Na}_2\text{O}$  (61.98). De esta manera, el contenido de álcalis totales del cemento expresado por su equivalencia en  $\text{Na}_2\text{O}$  resulta ser:



Hay sin embargo experimentos con concretos de varias partes del mundo que muestran que aún cuando se emplee un cemento con bajo contenido en álcalis, una expansión deletérea causada por la reacción álcali-sílice puede desarrollarse si los álcalis presentes en el agregado pueden ser lixiviados para participar en la reacción (15).

Ya que los álcalis pueden derivarse ya sea del cemento portland o del agregado principalmente, el uso de cementos de baja alcalinidad no puede por sí solo, garantizar una prevención de una reacción expansiva, aunque en algunos casos esto sí es posible.

---

La presencia de fuentes externas de álcalis, tales como la sal de deshielo, puede penetrar en el concreto y agravar el daño causado por la reacción álcali-silice (16-18). Pruebas recientes muestran que los álcalis provenientes de las sales de deshielo pueden tener efectos rápidos y devastadores en el concreto susceptible a esta reacción. Mucho del daño en estructuras de puentes observadas en Inglaterra y otras partes del mundo, pueden atribuirse a la penetración de sales en el concreto que contienen agregados de baja reactividad.

Independientemente de lo adecuado en el límite del contenido de álcalis señalado en las especificaciones, es necesario reconocer que cada vez resulta más difícil producir cementos con bajo contenido de álcalis, esto se debe a que los fabricantes presionados por las medidas contra la contaminación ambiental y motivados por la necesidad de ahorrar energía, introdujeron modificaciones en los sistemas de producción que provocaron un incremento sustancial en el contenido de álcalis del cemento.

Como se ha señalado los álcalis pueden ser aportados por diferentes fuentes a la del cemento, agua de mezclado, agregados algunos aditivos minerales, la sal de deshielo, etc. Debido a esto se ha sugerido que cuando se utilizan agregados reactivos, se debe evaluar el contenido de álcalis en la mezcla de concreto, de acuerdo con las proporciones y sus respectivos contenidos de álcalis. Para la aplicación de este criterio, se han propuesto limitaciones del orden de 2.1 a 2.5 Kg de álcalis, como máximo, en un metro cúbico de concreto (6-7).

El reporte Hawinks recomienda que si los álcalis proceden de otras fuentes diferentes al cemento exceden  $0.2 \text{ kg/m}^3$  del concreto, deberán ser tomados en cuenta para calcular el total de álcalis reactivos. Algunos minerales componentes de los agregados, especialmente las micas, feldespatos y arcillas íliticas contienen cationes metálicos de álcalis en sus estructuras. Las opiniones están divididas sobre si los álcalis provenientes de estos minerales llegarán a estar

---

dispuestos para la reacción dentro del concreto o están firmemente sujetos dentro del arreglo cristalino. Parece ser que cuando los arreglos han sufrido un grado de "alteración geológica" antes de ser utilizados como agregados, la degradación parcial de estos minerales facilitaría la lixiviación de al menos algunos álcalis en la solución de poro del concreto.

### **2.32 COMPONENTE DE SILICE REACTIVO EN LOS AGREGADOS**

Hay una gran variedad de tipos de roca que se utilizan como agregados para el concreto, que contienen formas de sílice que pueden reaccionar con los hidróxidos alcalinos de la pasta de cemento, solamente las rocas puras tales como las calizas se pueden excluir de la posibilidad de contener una pequeña porción de una forma de sílice reactiva, ya sea como componente original, primario o secundario.

Las formas de sílice que se consideran inestables incluyen las amorfas, las microcristalinas o vítreas, criptocristalinas y aún las cristalinas intensamente deformadas o fisuradas. Debido a que las rocas que contienen estas formas de sílice abundan en la naturaleza, la posibilidad de que se utilicen en el concreto es considerable, por lo que el riesgo que representa su reactividad potencial no puede dejar de tomarse en cuenta, por lo tanto, solamente sobre la base de registros de servicio o información de resultados de pruebas cuidadosas es que la mayoría de los agregados pueden ser declarados no deletéreos en los concretos que contienen alta concentración de álcalis.

Es incorrecto considerar solamente el tipo de roca como criterio para identificar a los agregados potencialmente reactivos, además de esto, se deben incluir las características de los componentes minerales de la roca, aunque la mayoría de las rocas son capaces de contener formas de sílice reactivas. La velocidad con que reaccionan es generalmente inferida de las

---

mediciones de expansión, por una parte, el ópalo y la cristobalita son conocidas por reaccionar rápidamente, la grauvaca, argilita y el cuarzo deformado reaccionan lentamente, los otros agregados pueden considerarse de reacción intermedia.

Una forma de "sílice reactiva" es un requisito esencial para que la reacción álcali-sílice se lleve a cabo, el volumen para producir efectos deletéreos necesita ser sólo muy pequeño. En estructuras donde se han observado daños calificados como severos, se han reportado componentes reactivos del 2%.

Para que un agregado se considere potencialmente reactivo con los álcalis del cemento, se requieren por lo general dos condiciones:

- 1.- Que contenga la clase de sílice que se ha identificado como reactiva.
- 2.- Que ésta se encuentre en proporción suficiente para causar la reacción.

Estas formas de sílice se encuentran en minerales como el ópalo, la calcedonia, la tridimita y la cristobalita así como en vidrios volcánicos. La calcedonia es menos reactiva y mucho menos el cuarzo, sin embargo, la temperatura es un factor importante que influye en la reacción, y aún agregados como el pedernal que generalmente no se considera reactivo pueden generar expansiones deteriorantes bajo condiciones húmedas y calientes (35-40°C) (19).

En la fig 2.6 se muestra la clasificación de las rocas, señalando con un asterisco aquellas que en potencia pueden reaccionar con los álcalis del cemento.

Ciertos granitos, gneises graníticos, horblendas y grauvacas, se ha encontrado que son reactivos cuando se utilizan en el concreto. Se ha notado que, a pesar de que el mineral reactivo

# CLASIFICACION DE LAS ROCAS

COMPOSICION Y CLASIFICACION DE ROCAS IONICAS			
PRINCIPALES MINERALES		ROCAS	
		EXTRUSIVAS GRANO FINO PORFIRITICA	INTRUSIVAS GRANO GRUEBO
CUARZO SiO <sub>2</sub>		RIOLITA*	GRANITO
FELDESATO POTASIO (ORTOCLASA)		TRAQUITA*	SIENITA
FELDESATO SODICO-CALCICO (PLAGIOCLASA)		ANDESITA*	DIORITA
SILICATOS FERRO- MAGNESIANOS: MICAS		DACITA*	GRANODIORITA
HORNBLENDA		BASALTO	GABRO
PIROXENA OLIVINO		AUGITITA LIMBURGITA	PERIDOTITAS

ROCAS SEDIMENTARIAS			
ORIGEN	AGENTE DE TRANSPORTE	SEDIMENTO SUELTO	SEDIMENTO CONSOLIDADO
MECANICO	AGUA	GRAVA ARISTAS REDONDEADAS	CONGLOMERADO
		GRAVA ARISTAS AGUDAS	BRECHA
		ARENA	ARENISCA GRAUVACA*
	VIENTO	LIMO	LIMOLITA
ARCILLA		ARGILITA*	
HIELO	MEDANOS	ARENISCA	
	LOESS		
	GRAVA ANGULOSA ARENA LIMO	TILITA	
	ARCILLA		
ORIGEN	NATURALEZA	SEDIMENTO	CONSOLIDADO
QUIMICO	CALCAREA	CALIZA	
		DOLOMITA*	
		ARAGONITA TRAVERTINO MARGA	
	SILICEA	PEDERNAL*	
SALINA	EVAPORITAS		

ROCA METAMORFICA	
ROCA ORIGINAL	PRODUCTO METAMORFICO
ARENISCA	CUARCITA
CALIZA	MARMOL
LUTITA	PIZARRA
	FILITA*
BASICAS	ESQUISTOS*
GRANITO	GNEISS*
DIORITA	
CONGLOMERADO	

FIG. 2.6 \*ROCAS QUE PUEDEN REACCIONAR CON LOS ALCALIS DEL CEMENTO

---

componente dentro de estas rocas no puede ser identificado, los granos de cristal de cuarzo que ellos contienen, muestran ópticamente sombras de deformación cuando son examinados por un microscopio polarizado. Una observación posterior fue que la reacción álcali sílice global del concreto, puede ser correlacionada en forma general con la intensidad del esfuerzo, aunque hay muchas excepciones.

Grattan-Bellew sugiere que el grado de desarrollo de la sombra de deformación, puede ser un indicador de los esfuerzos geológicos a los que la roca ha estado sujeta. Las causas principales de los esfuerzos geológicos en las rocas son tectonismo y metamorfismo. Estos efectos están también usualmente asociados con la recrystalización de los minerales dentro de la roca, para lo cual el cuarzo empieza con una incipiente recrystalización en las orillas del grano para producir nueva criptocrystalización del cuarzo con un tamaño del grano que está cercano al límite de la resolución del microscopio óptico. Se ha sugerido que la severidad del desarrollo de las sombras de deformación en el cuarzo, en circunstancias favorables, puede estar correlacionado con los esfuerzos aplicados a la roca, y este nivel de esfuerzo, puede ser asociado con el desarrollo de cuarzo criptocrystalino en las orillas del grano. Si se asume que la criptocrystalización del cuarzo es el componente álcali reactivo, esto proporciona una explicación para las observaciones concernientes a las sombras de deformación y la reactividad.

Como la mayoría de los agregados contienen alguna forma de sílice, muchos creen que todos los agregados son reactivos en algún grado cuando se usan en el concreto, sin embargo, muchas estructuras se comportan satisfactoriamente aún cuando en las pruebas petrográficas pueden mostrar alguna reacción, es por esto, que solamente cuando los productos de la reacción se expanden suficientemente para causar el agrietamiento es que la reacción álcali-sílice puede ser considerada como deteletea.

---

Así como el sílice reactivo, los álcalis y el agua son necesarios para que el daño de la reacción ocurra, estos tres elementos pueden ser traducidos en términos prácticos a los siguientes factores que influyen en la reacción:

- 1) Naturaleza tamaño y cantidad de partículas silíceas reactivas.
- 2) El contenido de álcalis del cemento, así como el contenido de cemento en el concreto.
- 3) La cantidad de álcalis que pueden ser lixiviados de los agregados.
- 4) Fuentes externas de álcalis y,
- 5) Condiciones ambientales como existencia de humedad y temperatura.

### 2.33 MEDIO AMBIENTE.

La influencia principal en las condiciones del medio ambiente son: humedad y temperatura, y sus cambios son dependientes del tiempo, incluyendo los ciclos de humedad-secado y congelación-deshielo.

#### 2.331 PAPEL DE LA HUMEDAD.

La reacción álcali-sílice requiere de agua para generar el proceso. Sin embargo, el agua tiene una función dual. Inicialmente, es esencial como "agente de transporte" de los cationes álcali e iones hidroxil, en la formación del gel, y en segundo lugar genera la etapa de expansión, en la que el agua es absorbida por el gel, el cual se expande desarrollando presiones suficientes para agrietar al concreto.

En construcciones de concreto en masa, la humedad inherente en el concreto puede ser suficiente para causar una reacción expansiva deteriorante(11). También, en miembros de

---

dimensiones relativamente grandes, la mayoría de las mezclas de concreto pueden contener una cantidad adecuada de agua para permitir el inicio de la reacción álcali-sílice (12). El gel puede así formarse con alrededores secos. Esta observación es importante en el sentido de que en algunos casos no es necesario que exista aportación de agua del exterior para que se inicie la reacción y la expansión se produzca.

Algunos estudios y observaciones han permitido establecer que las peores condiciones de humedad, en que los efectos de la reacción resultan más dañinos, corresponden a los cambios cíclicos de humedecimiento y secado, al movimiento de la humedad a través del concreto, como ocurre en el caso de las estructuras que tienen un paramento húmedo y otro seco(25).

Es importante recordar que el concreto aún en condiciones secas, tiene la capacidad de absorber agua, así que, con la excepción de una capa exterior de poco más de 10 mm de espesor, la humedad relativa en el interior del concreto permanecerá entre 80 a 90%. durante los primeros cuatro años.

Investigaciones y experimentos han sido capaces de demostrar que los efectos de la reacción álcali-sílice tales como la expansión, varían directamente con el porcentaje de humedad relativa (HR) del concreto. El tipo de relación se ilustra en la fig 2.7 Puede verse que abajo del 70% de HR la expansión y la reacción expansiva no son significativas, pero arriba del 80% de HR. los efectos de la expansión se incrementan dramáticamente. Las dos fases del proceso de la reacción, formación y absorción de agua por el gel pueden demostrarse en el laboratorio. Si se prepara un prisma de concreto reactivo , pero no se almacena en un medio húmedo, la expansión debida al desarrollo del gel será insignificante. Sin embargo, si tal espécimen es trasladado a condiciones húmedas de almacenamiento, resultará una expansión tal que dentro de unos pocos días se expandirá aproximadamente en la misma medida que un prisma idéntico almacenado en condiciones

**EFFECTO DE LA HUMEDAD RELATIVA EN LA EXPANSION DEL CONCRETO DEBIDO A LA REACCION  
ALCALI-SILICE**

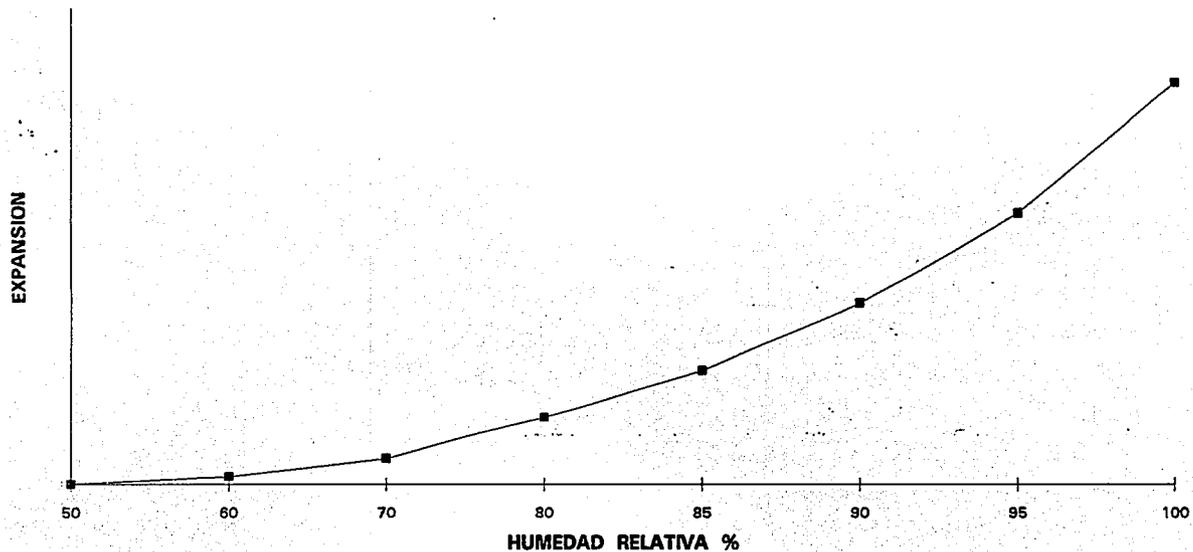


Fig. 2.7

---

humedad desde el principio. Esto implica que , aunque la reacción puede ocurrir a relativamente bajas humedades, niveles de humedad altos son requeridos para que el gel formado por la reacción absorba agua e incremente su volumen. En consecuencia, cualquier medida de protección que impida el acceso del agua al interior del concreto puede, si no evitar, por lo menos retardar la manifestación de expansiones perjudiciales en la estructura, si en ella se encuentran latentes las condiciones para que ocurra la reacción álcali-sílice.

### 2.34 TEMPERATURA.

La temperatura también es un factor que incrementa la velocidad con que se produce la reacción e interviene en las dos etapas del desarrollo de la reacción: creación del gel y proceso de expansión.

Existe una prueba que permite demostrar la influencia de la temperatura en la primera etapa. Esta prueba es identificada como "trozo de gel" y fue desarrollada por Jones y Tarleton (8), en esta prueba las partículas del agregado reactivo son expuestas a soluciones concentradas de álcalis sobre la superficie de una tableta de cemento. A temperatura ambiente los materiales altamente reactivos, tales como el ópalo, desarrollan el gel sobre su superficie después de algunos días de almacenados. Si la temperatura de almacenamiento alcanza unos 50°C, el desarrollo del gel sobre la superficie de tales partículas ocurrirá dentro de 24 horas, mientras que algunos materiales menos reactivos como el pedernal, comenzarán a demostrar el desarrollo del gel, aunque a temperaturas normales no se presenten signos de tal reacción (40).

En la segunda etapa, cuando la temperatura es alta, las expansiones producto de la absorción del agua se generan en forma más rápida y su inicio es más temprano. Sin embargo, a medida que la reacción continúa, tanto el rango de la reacción como el rango de expansión disminuyen.

---

Cuando los concretos reactivos son almacenados a bajas temperaturas, reaccionan en forma más lenta, sin embargo, eventualmente, la expansión alcanza el mismo nivel y puede exceder las expansiones alcanzadas a altas temperaturas.

Se ha observado (37) que a 40°C la reacción es más rápida que a 20°C, pero la magnitud final de la expansión resulta menor Fig 2.8.

Con esto se puede suponer que en los lugares de clima cálido, los efectos de la reacción se manifiesten más pronto, pero con menor intensidad, que en los lugares de clima frío. Así por ejemplo, en Islandia, donde las temperaturas son bajas durante todo el año, se dice (40) que a pesar del uso de cementos con alto contenido de álcalis y agregados reactivos, los efectos nocivos en las estructuras de concreto han sido mínimos, hasta ahora.

Como todos los efectos deteriorantes del concreto, la calidad del mismo y principalmente su porosidad tienen una considerable influencia en la extensión de la reacción y el grado de daño resultante. La relación agua/cemento (w/c) de la mezcla es un factor importante que influye en la reacción.

Es evidente que la participación de tan gran número de factores en la reacción álcali-sílice hace que la identificación y predicción de la posible reacción sea extremadamente difícil. Muchos de los parámetros mencionados pueden controlarse, sin embargo, la importancia del medio ambiente y la temperatura son indiscutibles.

## 240 CONCEPTO DE PROPORCION PESIMA

Se han mencionado los diferentes factores que gobiernan el desarrollo de la reacción álcali-agregado. Sin embargo, es interesante señalar que las peores condiciones que pueden presentarse en un concreto no son aquellas donde los factores de reacción se encuentran en sus máximas

### CURVAS COMPARATIVAS DE REACCION CONTRA EXPANSION

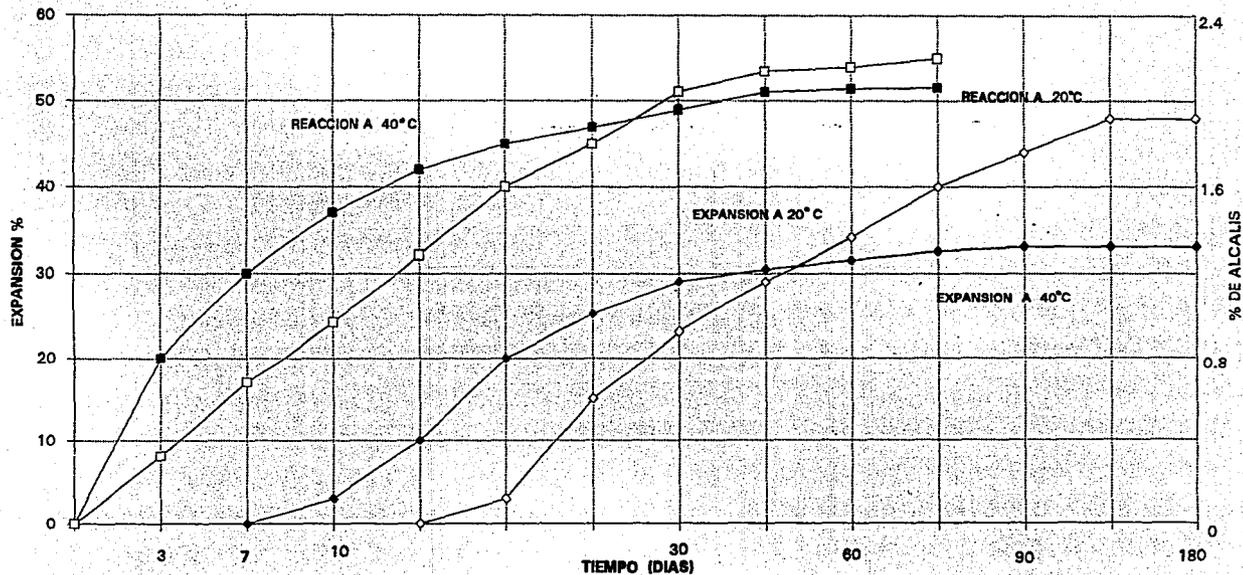


FIG. 2.8

---

concentraciones. Para que se presente una reacción expansiva no basta con que el agregado sea reactivo y que el cemento aporte suficientes álcalis, sino que, además es preciso que se den unas proporciones determinadas entre ambos elementos reactivos. La relación sílice-álcali que ocasiona el grado máximo de expansión es identificada como "proporción pésima". Las variaciones por arriba o por debajo de este valor, reducen o inhiben la expansión.

Las figuras 2.9-2.10 ilustran la proporción pésima, muestran para un agregado en que el sílice opalino es el elemento reactivo. En la fig 2.9 el volumen del gel se graficó contra la edad, en la fig.10 se muestra la expansión contra el contenido de sílice opalino y el contenido de agregado reactivo, la suposición en este último caso es que el 5% de masa del agregado es sílice opalino.

El análisis de estas figuras muestra que a medida en que aumenta el contenido de agregado reactivo, la expansión aumenta hasta que alcanza un máximo, la expansión entonces disminuye a medida que el contenido de agregado reactivo se incrementa. El agrietamiento decrece conforme el contenido de agregado reactivo aumenta, pero con un alto contenido de agregado reactivo no se observa agrietamiento o expansión.

En la fig. 2.10 la gráfica de la expansión es dividida en cuatro regiones de A a D. Una explicación probable para el comportamiento pésimo es el siguiente:

**Región A:** El contenido de sílice reactivo es bajo y el desarrollo del gel inicia después de que el concreto ha fraguado, la presión que produce el gel es insuficiente para inducir el agrietamiento, así el desarrollo del gel ocurre sin ningún efecto adverso en el concreto.

**Región B:** La reacción continua después de que el concreto ha endurecido, y la intensidad de la reacción es suficiente para inducir el agrietamiento. La expansión cesa cuando todo el sílice

POSIBLE RELACION ENTRE EL VOLUMEN DEL GEL Y EL CONTENIDO DE SILICE REACTIVA

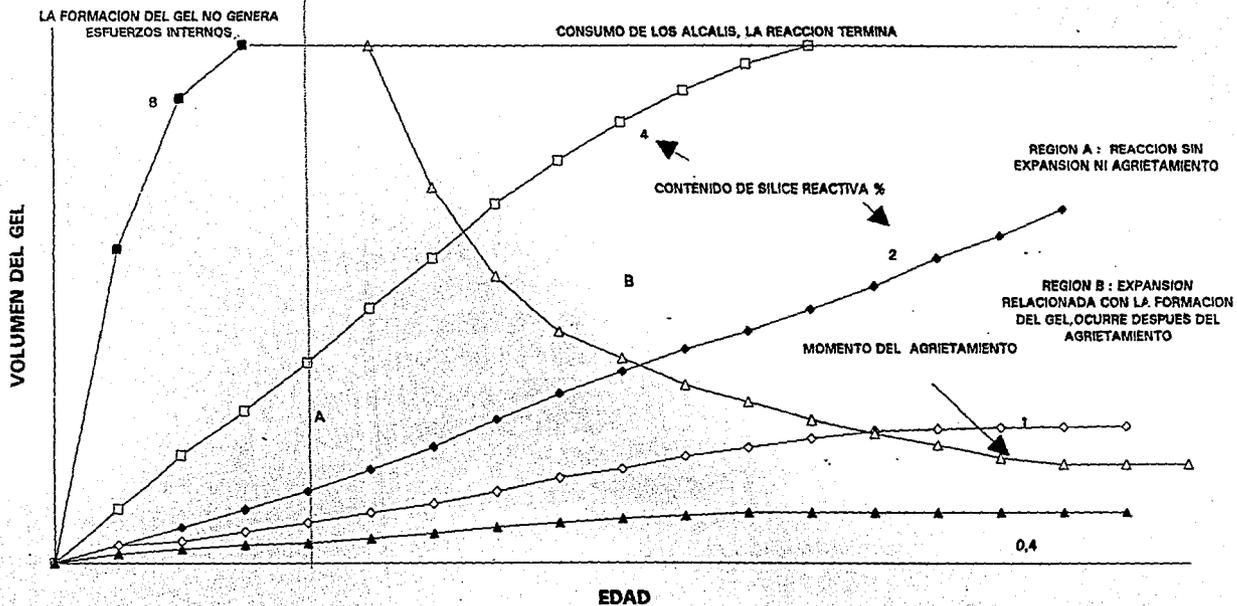


Fig. 2.8

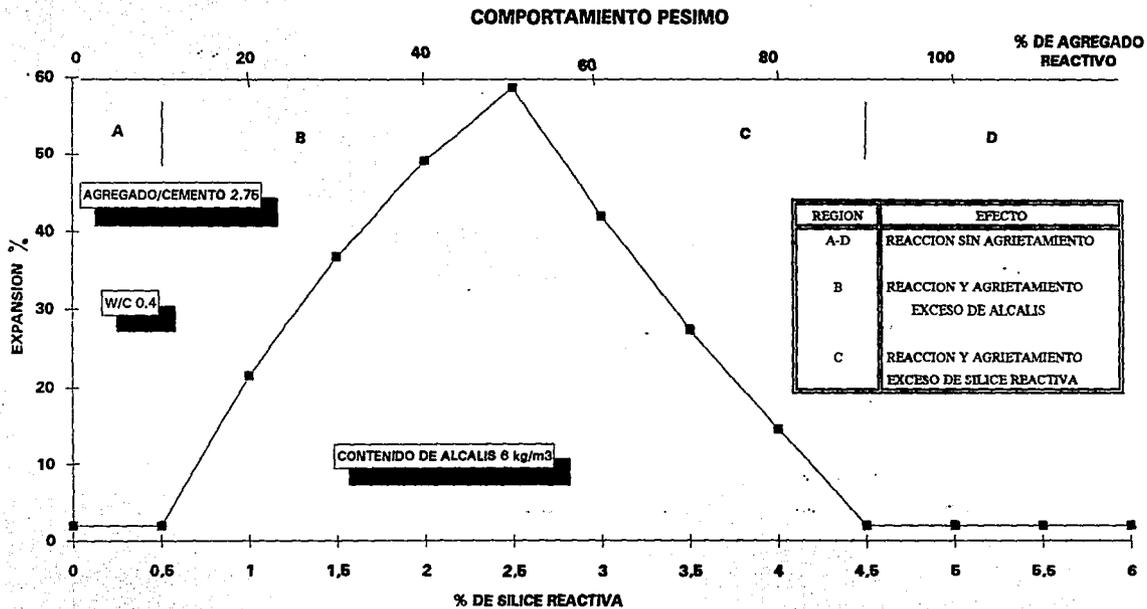


Fig 2.10

---

reactivo se consume o cuando la reacción cae a un nivel suficientemente bajo. En esta región hay un exceso de álcalis y la composición del producto de la reacción es probablemente independiente de la reacción álcali/sílice.

**Región C:** La reacción continua, el agrietamiento ocurre y la expansión termina cuando los álcalis en la solución de poro se reducen a un nivel mínimo o cuando se agotan. En esta región hay un exceso de sílice.

**Región D:** El contenido de sílice es tan alto que la reacción es tan rápida que en el momento de que el concreto ha endurecido la proporción del desarrollo del gel es demasiado lenta para inducir el agrietamiento. Cantidades abundantes del gel pueden ser formadas sin ningún efecto adverso en el concreto (46).

En la expansión máxima el contenido de sílice es suficiente para reducir la concentración del ion de hidroxil o la concentración de álcalis a un nivel mínimo o para agotar todos los álcalis disponibles de sodio y potasio. En el ejemplo ilustrado el contenido pésimo de sílice es aproximadamente 2.5% del peso del agregado total. No habrá un comportamiento pésimo si el agregado reactivo contiene menos de 2.5% de peso de sílice reactiva.

---

### 3.0 EFECTOS DE LA REACCION ALCALI-SILICE EN EL CONCRETO

#### 3.1 Características del concreto afectado por la reacción álcali-silice.

Como el agrietamiento puede ser el resultado de la interacción de varios procesos deletéreos, una característica que distingue a la reacción álcali-silice de los otros procesos, es la presencia del gel álcali-silice y el daño estructural que ocasiona.

El gel es el producto de la interacción entre los álcalis y la sílice reactiva en presencia de humedad, y se expande a medida que absorbe agua. Este gel varía considerablemente en su composición dependiendo de la naturaleza de la solución de poro y probablemente de las características de la partícula de sílice reactiva, temperatura de reacción y la concentración de reactivos.

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

El gel se carbonata con el tiempo y exposición al aire, tomando un color blanco y duro en las grietas secas. A menudo la deshidratación del gel en la superficie de una hendidura del concreto es menos visible, por lo que los investigadores deben buscar el gel inmediatamente después de romper la superficie fresca del concreto. Los corazones tomados de estructuras afectadas por la reacción son comúnmente cubiertos con capas de película adherible y selladas en polietileno para mantener la humedad de la muestra. Este procedimiento permite que el gel (si está presente) sea

---

identificado en la superficie del núcleo. Cuando éste es descubierto, debido a la naturaleza higroscópica del gel éste produce brillantes o manchas "sudorosas" en la superficie que desaparecen cuando el núcleo se seca.

Varios análisis del gel indican un amplio rango en su composición, la tabla 2.12 muestra una compilación de numerosas investigaciones que dan idea de la variación que existe en la composición del gel.

La viscosidad del gel también exhibe un rango amplio de valores y puede producir una presión de hasta 112 kg/cm<sup>2</sup> (2).

Lo que es un hecho es que el gel álcali-sílice primero se desarrolla en un sitio de reacción dentro del concreto, en un inicio es muy viscoso, pero a medida que absorbe humedad (interna o externa) se expande y gradualmente se vuelve menos viscoso hasta que con el tiempo se hace lo suficientemente fluido para emigrar a lo largo de las grietas, llenando posteriormente los vacíos y saturando los microporos en la pasta de cemento.

### 3.12 EXPANSION DEL CONCRETO.

La expansión y la deformación en el concreto debido a la reacción álcali-sílice es la causa principal de los esfuerzos estructurales. La expansión se produce debido a la capacidad que tiene el gel para absorber el agua y posteriormente dilatarse, la expansión ejerce una presión que puede agrietar al concreto. En circunstancias raras, tal expansión puede ser hasta de 2-3%, debido a la

Tabla 2.2

**ANÁLISIS QUÍMICO DEL GEL ALCALI-SILICE DESARROLLADO  
POR DIFERENTES INVESTIGADORES**

Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	DIFERENCIA (%)	REFERENCIA	AÑO
12.9	0.0	53.9	2.9	0.6	29.8	Stanton	1942
12.9	0.0	53.4	2.6	0.8	30.2	Stanton	1942
14.9	5.2	61.7	0.6	0.0	17.6	Idorn	1961
13.4	5.1	65.5	0.5	0.2	15.3	Idorn	1961
12.4	4.9	69.9	0.3	0.5	12.0	Idorn	1961
17.9	8.2	73.7	1.1	0.1	17.2	Idorn	1961
9.4	4.1	72.8	1.3	0.2	11.2	Idorn	1961
14.6	6.2	61.9	0.0	0.1	17.2	Idorn	1961
16.2	5.7	56.8	0.0	0.0	21.3	Idorn	1961
8.2	4.1	56.1	17.4	0.2	14.0	Idorn	1961
8.3	5.0	28.5	22.4	0.2	35.6	Idorn	1961
1.2	0.4	51.4	29.9	10.0	17.1	Poole	1975
7.4	0.7	53.0	22.1	10.0	16.7	Poole	1975
1.5	13.9	38.9	27.3	10.0	17.4	Gutteridge y Hobbs	1980
0.4	4.7	51.1	21.5	10.0	22.3	Regourd	1983
0.0	0.6	27.9	35.2	10.0	36.2	Regourd	1983
1.0	6.9	61.5	9.2	10.0	21.3	Oberholster	1983
1.0	6.2	53.8	8.2	10.0	30.7	Oberholster	1983
1.8	5.5	49.9	12.8	10.0	29.9	Oberholster	1983
1.0	5.2	50.4	12.0	10.0	30.7	Oberholster	1983
1.4	9.0	62.9	12.5	10.0	13.8	Oberholster	1983
0.8	7.4	53.2	10.0	10.0	28.4	Oberholster	1983
1.2	4.1	66.5	6.5	10.0	21.7	Baronio	1983
3.7	12.9	43.3	21.8	0.8	14.0	Millick y Samuel	1986
3.9	11.7	49.4	15.9	0.5	16.7	Millick y Samuel	1986
1.8	1.4	80.2	16.1	0.0	0.5	S. Chatterji	1986
1.8	2.8	69.4	23.6	0.0	2.4	S. Chatterji	1986
0.4	4.3	65.7	15.3	0.0	14.3	Natasalyar	1989

---

capacidad del esfuerzo de tensión del concreto que es únicamente de 150-200  $\mu$ s(microesfuerzo), y rara vez excede los 500 $\mu$ s.

El tipo de reacción y la expansión que resultan críticas para una estructura de concreto, dependen del tamaño de la partícula, volumen y tipo de agregado reactivo y de diversos factores señalados anteriormente. En términos prácticos, para un tipo de agregado reactivo y cemento, tanto el contenido de cemento en el concreto y el medio ambiente influyen en la magnitud de la reacción fig(2.13 y 2.14) (19,20).

En la información mostrada en la fig 2.14 se observa el gran número de factores involucrados en la reacción álcali-sílice.

Así el pedernal que es un agregado relativamente inocuo bajo condiciones normales, puede presentar expansiones de 0.1-0.15% bajo un medio ambiente favorable (fig 2.13). Por otra parte, con un agregado moderadamente reactivo, puede ocurrir una expansión destructiva aún con un bajo contenido de álcalis en el concreto como 2.5 kg/m<sup>3</sup> (fig 2.14).

Esta información muestra la incertidumbre que existe en el contenido crítico de álcalis en el concreto, cuando es utilizado como un parámetro para la reactividad potencialmente nociva en las estructuras.

Donde las deformaciones estructurales son críticas, las expansiones pequeñas de 0.05% pueden ser excesivas, mientras que en las estructuras de concreto bien diseñadas el efecto perjudicial de la reacción, así como las expansiones pueden ser contenidas por el acero de refuerzo. Para las estructuras de concreto que son particularmente vulnerables a la reacción álcali-sílice, debido a su tamaño, ubicación o exposición, el nivel de álcalis requerido para minimizar el riesgo de daño deberá estar por debajo de los "niveles seguros" generalmente considerados.

INFLUENCIA DEL TIPO DE AGREGADO Y TEMPERATURA EN LA EXPANSION DEL CONCRETO DEBIDO A LA REACCION ALCALI-SILICE

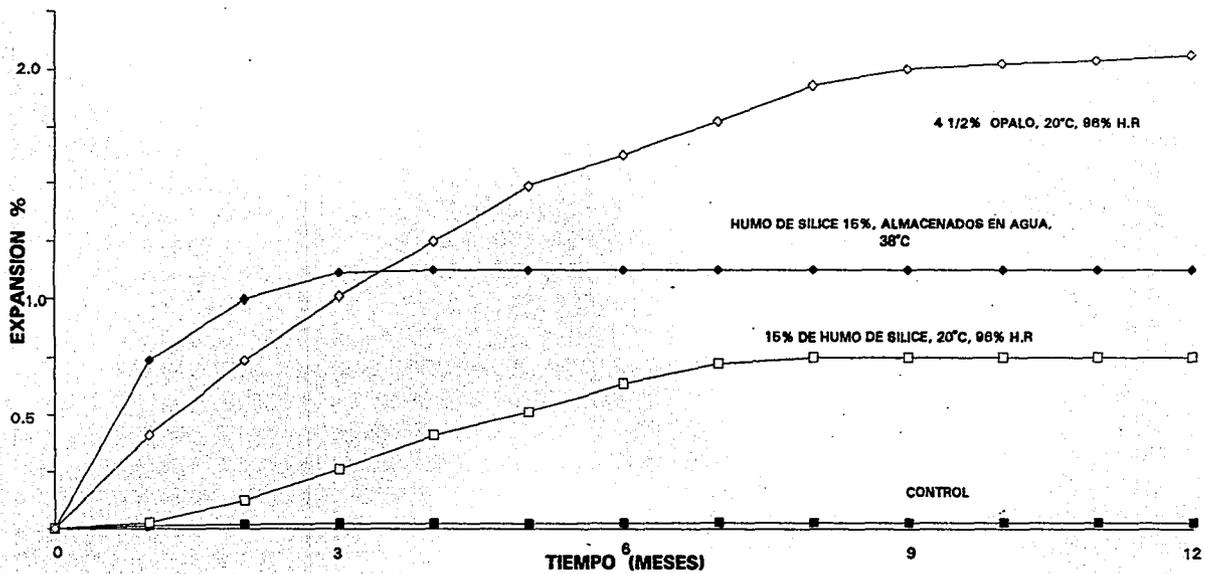


Fig. 2.13

### EFFECTO DE LA ALCALINIDAD DEL CONCRETO

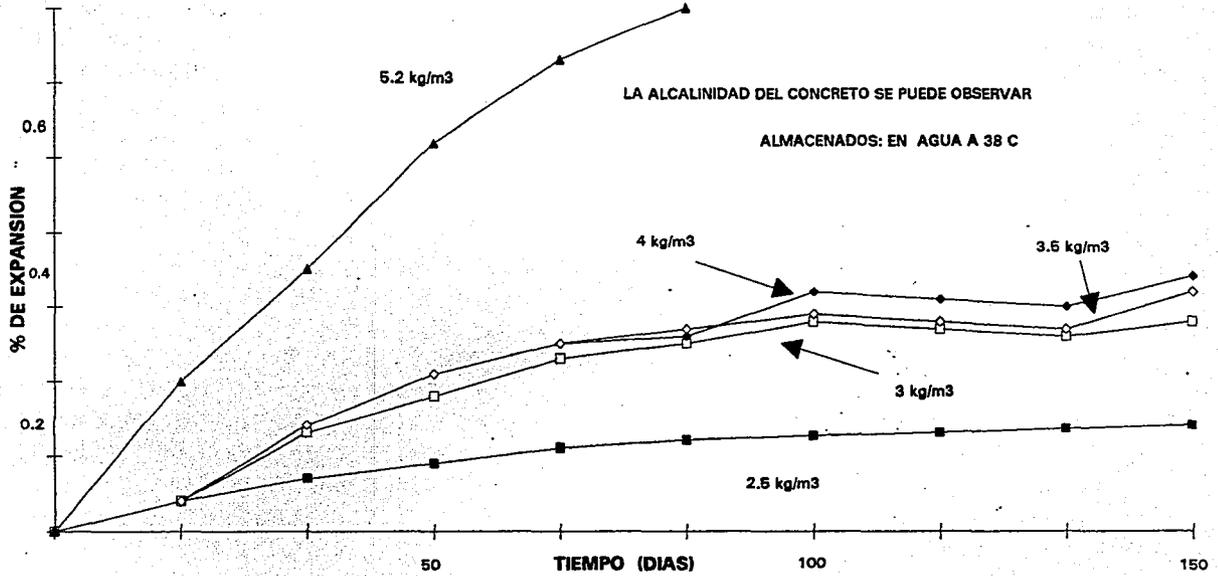


FIG. 2.14

---

### 3.13 AGRIETAMIENTO.

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

Las grietas tomarán primero la forma de una estrella de tres o cuatro picos, conforme la reacción continua más grietas se desarrollan hasta que se juntan para formar el agrietamiento de "mapa", se debe señalar que otros procesos anormales como la contracción por secado, congelación o expansión pueden provocar patrones de grieta muy similares.

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

Un ejemplo que ilustra el efecto es el caso de una columna de un puente<sup>(2)</sup>, la carga a la cual estaba sujeta fue suficiente para inducir el agrietamiento vertical en ella. Esta columna en particular fue retirada del puente y cortada en secciones. Una vez que la carga fue retirada, se desarrolló el agrietamiento "mapa" en la superficie de la columna conforme la reacción continuó.

Una evaluación adecuada del origen del agrietamiento no puede ser hecha sin un conocimiento del refuerzo o preesfuerzo, las restricciones del elemento y la historia de cargas.

---

En pruebas de laboratorio y en elementos donde el miembro de concreto no esta sujeto a esfuerzos externos, las grietas son generalmente de pocos milímetros de ancho y profundidad. Un estudio de varias estructuras afectadas por la reacción realizado por Swamy muestra que el agrietamiento puede ser de varios milímetros de ancho y profundidad, las mediciones realizadas del agrietamiento en las estructuras muestran anchos de grietas hasta 15 mm y una profundidad de 300 mm (9,10).

Las macrogrietas están generalmente localizadas dentro de 25-50 mm de la superficie expuesta del miembro de concreto y se encuentran alineadas perpendicularmente a la superficie de exposición. Como el macroagrietamiento inducido por la reacción está restringido generalmente dentro de 50 mm aproximadamente de la superficie expuesta del concreto, puede inferirse que las capas de la superficie del concreto están sujetas a tensión y el núcleo a compresión, por lo tanto, más expansión y reacción se desarrollan dentro del núcleo que cerca de la superficie expuesta. Según la experiencia de D. W Hobbs (7), en el caso del concreto simple, la profundidad de las macrogrietas son de aproximadamente un décimo del espesor del miembro.

La superficie de decoloración, es bastante común para grietas provocadas por la reacción álcali-silice, las líneas de las grietas finas pueden estar manchadas por una decoloración oscura, dando la apariencia de humedad permanente. Nuevamente la reacción álcali-silice no es la única causa potencial de la decoloración de la superficie del concreto, pero la incidencia de tal decoloración puede aumentar la probabilidad de que la reacción esté presente.

La exudación copiosa del gel es una característica en muchos países, el gel expuesto en la superficie se deshidrata y carbonata y es difícil distinguirlo de los depósitos de carbonato de calcio resultantes de la lixiviación del hidróxido de calcio provenientes de la pasta de cemento y su

---

subsecuente carbonatación cuando llega a estar en contacto con el aire en la superficie del concreto.

Otra característica sintomática es el desarrollo de astillamientos circulares o elípticos (pop-out) de la superficie de concreto. Como los otros rasgos mencionados, el astillamiento puede también desarrollarse por una variedad de razones por lo que es necesario tener cuidado al identificar el mecanismo particular para un problema dado.

El desarrollo del gel en una partícula de agregado reactivo cercano a la superficie del concreto causa el desarrollo de una presión excesiva conforme se expande, de ahí que un área circular se fragmente en la superficie del concreto como un semicono poco profundo cuyo vértice se centra sobre el punto de reacción.

### 3.20 EFECTOS EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.

Los efectos de la reacción álcali-sílice en las propiedades del concreto no pueden ser generalizados, ya que dependen de la relación de expansión y esta es función del agregado reactivo, tipo de cemento, contenido de cemento en el concreto y medio ambiente. Sin embargo, tanto la resistencia y módulo de elasticidad del concreto muestran pérdidas significativas. Es importante señalar que estas pérdidas no todas ocurren en la misma proporción o en proporción a la expansión sufrida por el concreto afectado.

Un estudio realizado por Bérubé y Pigeon<sup>(13)</sup> considera dos tipos de agregados calizos con propiedades mecánicas similares, uno de ellos altamente reactivo (agregado silíceo) y el otro un agregado no reactivo (caliza).

En la fig 2.16 y 2.17 se observa que la expansión máxima a un año (espécimenes almacenados a 100% H.R y 38 °C) fue 0.26% en el agregado reactivo y 0.02% en el agregado inerte; los espécimenes

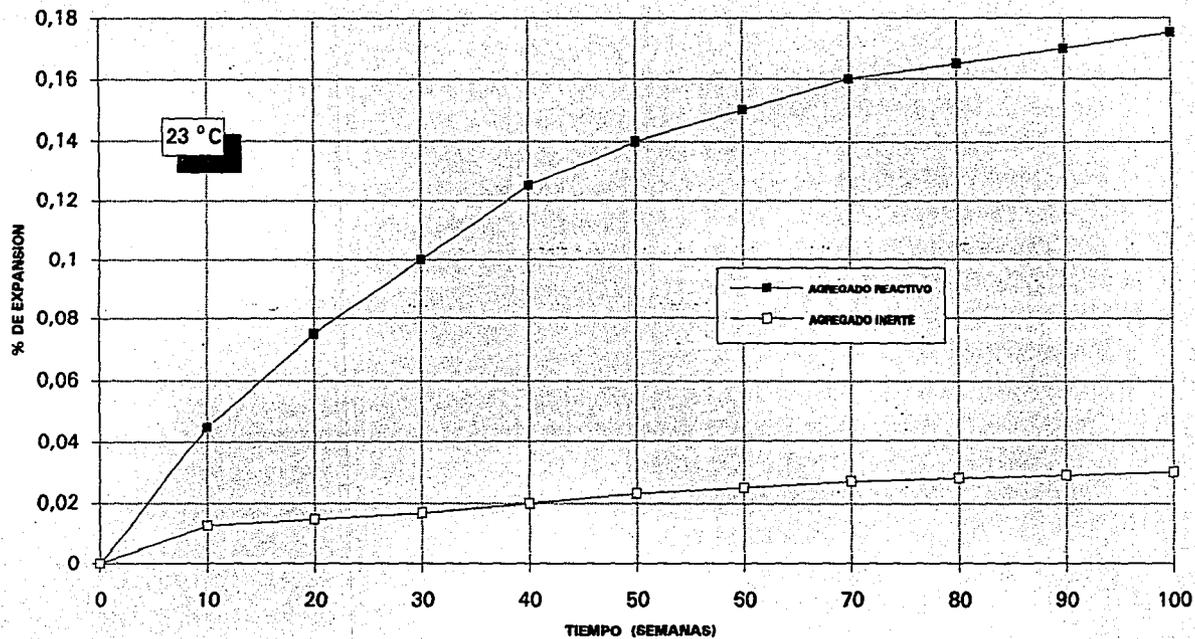


FIG. 2.16

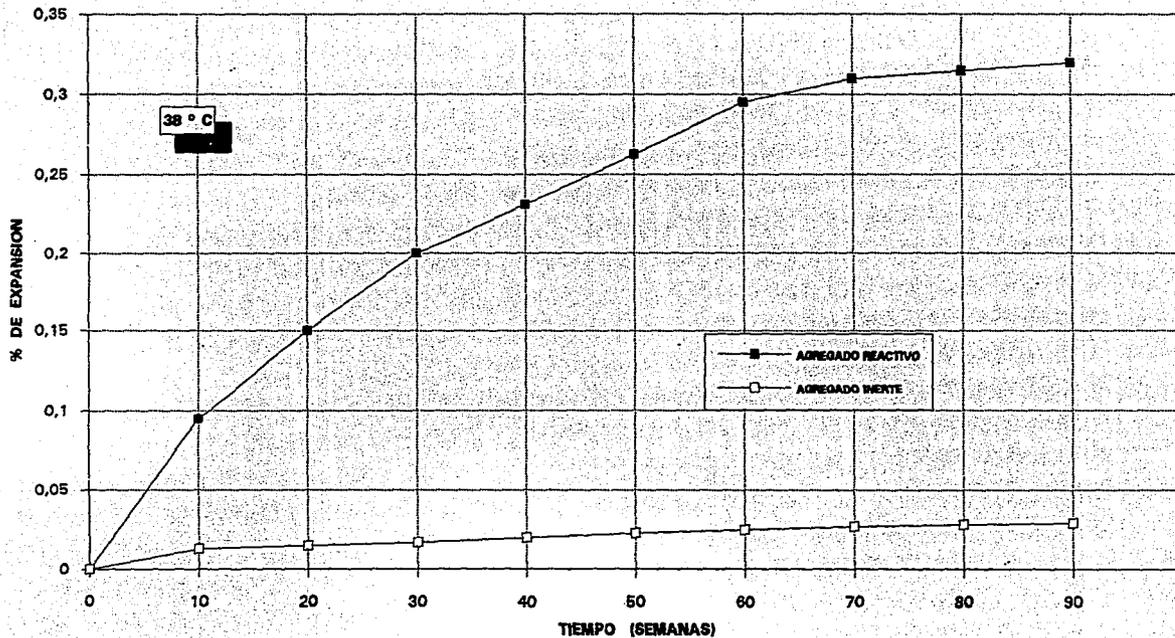


FIG. 2.17

---

fueron almacenados a 23 °C y 38 °C a 100% H.R. . La expansión sufrida por el concreto reactivo a 38 °C es el doble de la que presentó a 23 °C.

La curva esfuerzo deformación para las muestras almacenadas a 100%H.R y 38 °C se aprecian en la fig 2.18, a 28 días , las curvas son muy similares para ambos concretos. Entre 28 días y un año, el concreto con el agregado inerte presenta un comportamiento normal, la resistencia a la compresión aumentó cerca del 10% debido al proceso de hidratación. Sin embargo, la variación entre 28 días y un año es considerable para el concreto reactivo. La caída de la resistencia es casi la mitad del valor inicial, mientras que la deformación se incrementa cerca del 30%, el esfuerzo de compresión fue de 204 kg/cm<sup>2</sup>. Se observa claramente que el concreto afectado puede sufrir una mayor deformación que el concreto sano. Blight<sup>(14)</sup> observó que efectivamente que tales concretos presentan deformaciones (a 153 kg/cm<sup>2</sup> de esfuerzo de compresión), que pueden ser 3 veces mayores que en el caso del concreto sano, mientras que la deformación a largo plazo (creep) puede ser de 2.5 a 4 veces mayor.

La variación de la resistencia a la compresión con el tiempo se observa en la fig 2.19 Para concretos reactivos después de un ligero incremento cerca de la semana 12, una importante pérdida en la resistencia ocurre en un año, únicamente después de expansiones significativas (>0.1%), un ligero incremento ocurre posteriormente. La pérdida máxima en la resistencia a un año es cerca del 45% del valor máximo obtenido a 12 semanas (50% con respecto al concreto sano, a un año). Swamy observó que la pérdida en la resistencia puede llegar a ser de un 40 a 60% en el caso del agregado opalino y la sílice amorfa tabla 2.20(3).

La fig 2.21 muestra la gráfica de resistencia a la tensión contra tiempo. El concreto sano muestra un ligero incremento en la resistencia, aproximadamente de 33%. Para el concreto reactivo la

**EFFECTOS DE LA REACCION ALCALI-SILICE EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO**

PROPIEDAD	MEZCLA	EDAD (DIAS)			
		1	7	28	365
Expansión %	a.- Control	0,00	0,00	0,00	0,02
	b.- 4.5% Opalo	0,00	0,07	0,32	1,64
	c.- 15% Sílice	0,00	0,00	0,02	0,62
Resistencia a la Compresión kg/cm2	a.- Control	272,26	495,57	612,84	749,48
	b.- 4.5% Opalo	317,13	452,75	453,77	280,42
	c.- 15% Sílice			535,34	453,77
Resistencia a la Tensión kg/cm2	a.- Control	26,61	36,51	39,77	43,75
	c.- 15% Sílice			33,55	18,66
Módulo Dinámico de Elasticidad kg/cm2	a.- Control	363013,20	418077,00	433372,50	462943,80
	b.- 4.5% Opalo	345678,30	333441,90	212097,60	106048,80
	c.- 15% Sílice		402781,50	416037,60	192723,30

TABLA 2.20 REFERENCIA 3

### CURVA ESFUERZO DEFORMACION

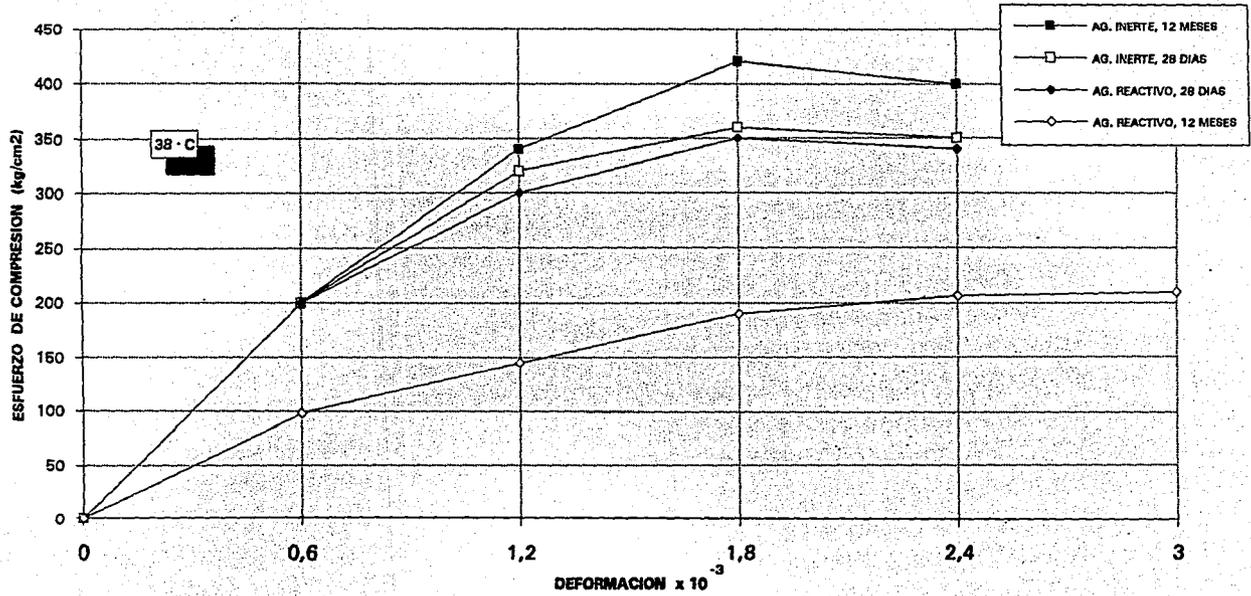


FIG. 2.18

### RESISTENCIA A LA COMPRESION CONTRA TIEMPO

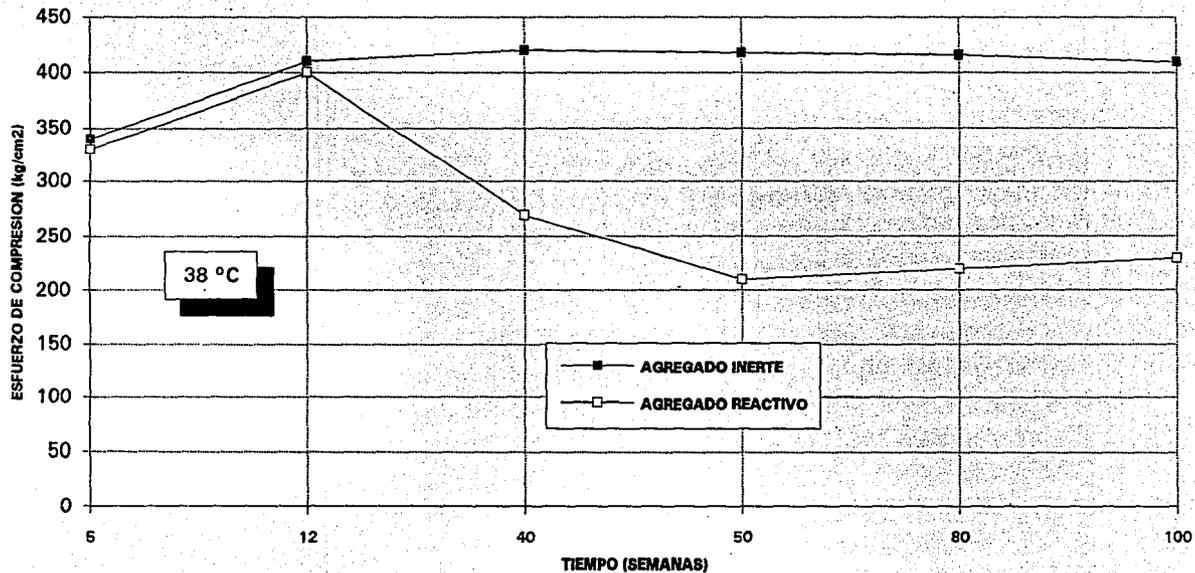


FIG. 2.19

### RESISTENCIA A LA TENSIÓN CONTRA TIEMPO PARA CONCRETOS ALMACENADOS A 38°C

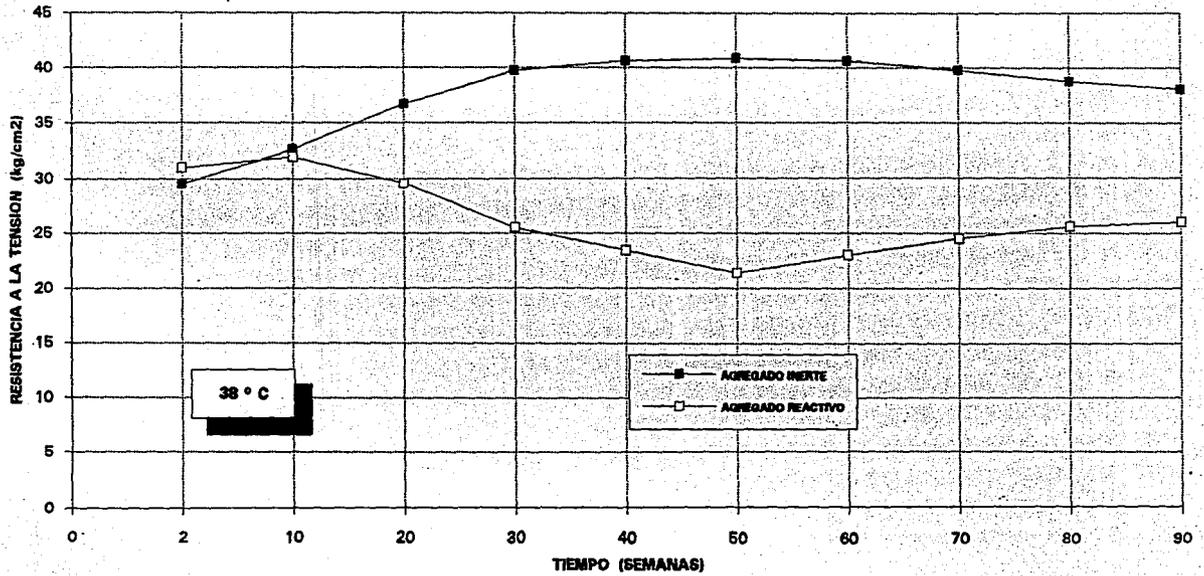


FIG. 2.21

---

resistencia a la tensión inicia con una caída después de 12 semanas hasta cerca de 1 año y posteriormente se presenta un ligero incremento. La pérdida total (a un año) es cerca de 30% del valor inicial (45% con respecto al concreto sano, a un año). Este comportamiento es similar al que se presenta en los resultados para la resistencia a la compresión, con pérdidas similares que ocurren cerca del mismo tiempo (entre 12 semanas y 1 año).

Así la relación entre la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión es relativamente constante en cualquier momento (0.07 a 0.11). Esto indica que la resistencia a la tensión del concreto no es más afectada que la resistencia a la compresión. Esta observación coincidió con otro estudio experimental (21,22) y con investigaciones de campo en estructuras de concreto construidas con caliza y roca volcánica. Sin embargo, Blight(14), observó que la resistencia a la tensión es más afectada que la resistencia a la compresión, para concretos con ópalo y sílice amorfa, Swamy (3,20), obtuvo la misma conclusión.

La fig 2.22 muestra la gráfica del módulo de elasticidad contra tiempo. El concreto sano muestra un módulo de elasticidad constante (una ligera reducción se observa con el tiempo, posiblemente relacionada con la temperatura de almacenamiento relativamente alta, tabla 2.23), para el concreto reactivo, el módulo de elasticidad exhibe una importante caída (>50%) entre 4 y 12 semanas (cuando la resistencia a la compresión y tensión aumentan), una ligera reducción hasta un año ( la pérdida máxima es cerca de 65%) , entonces alcanza un equilibrio relativo. Se observa que la expansión a 4 y 12 semanas es importante (0.05 y 0.12% respectivamente) pero aparentemente no suficiente para afectar la resistencia. Estos resultados concuerdan con otros estudios que también establecen que el módulo de elasticidad se afecta más que la resistencia (21,22,16,14,3). Además, Swamy(3) también observó que el módulo de elasticidad dinámico es afectado en etapas tempranas, previamente a cualquier expansión significativa. Los resultados de las pruebas destructivas para otras condiciones de almacenamiento son resumidas en la tabla 2.23.

## RESUMEN DE LAS PRUEBAS DESTRUCTIVAS DESPUES DE UN AÑO

AGREGADO REACTIVO				
CONDICION DE ALMACENAMIENTO	EXPANSION %	RESISTENCIA A LA COMPRESION Kg/cm <sup>2</sup>	RESISTENCIA A LA TENSION Kg/cm <sup>2</sup>	MODULO DE ELASTICIDAD kg/cm <sup>2</sup>
100% H.R Y 23°C	0,13	301,83	24,47	114104,43
100% H.R y 38°C	0,28	216,17	23,45	114920,19

AGREGADO INERTE				
CONDICION DE ALMACENAMIENTO	EXPANSION %	RESISTENCIA A LA COMPRESION Kg/cm <sup>2</sup>	RESISTENCIA A LA TENSION Kg/cm <sup>2</sup>	MODULO DE ELASTICIDAD kg/cm <sup>2</sup>
100% H.R Y 23°C	0,02	457,85	39,77	361993,50
100% H.R y 38°C	0,02	432,35	40,79	317585,57

TABLA 2.23 REFERENCIA 13

### MODULO DE ELASTICIDAD DEL CONCRETO

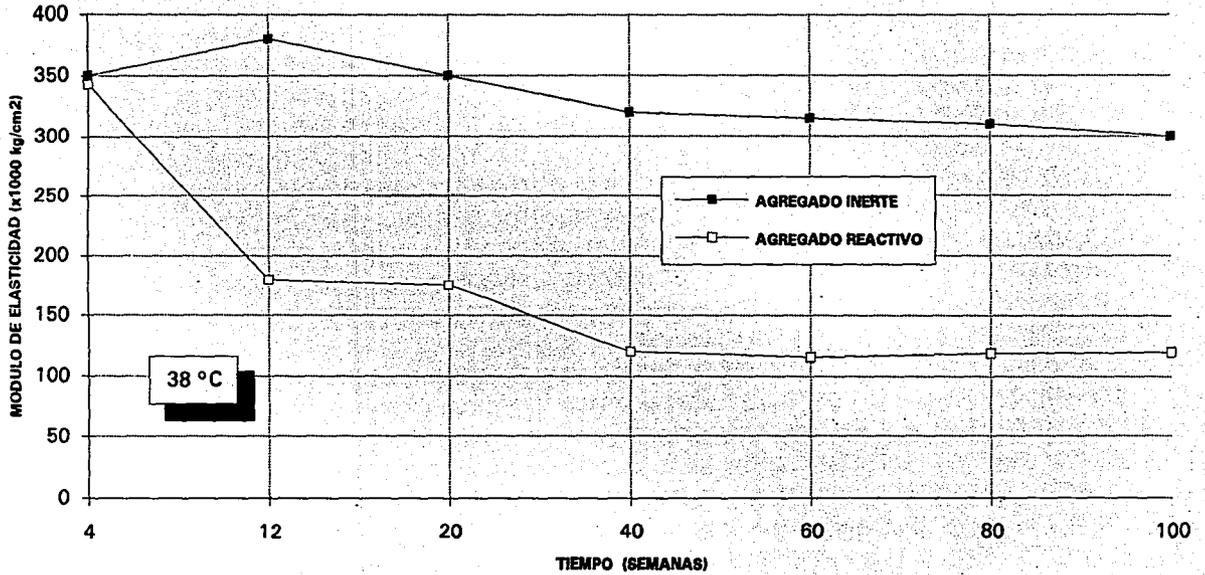


FIG. 2.22

---

Un análisis cuidadoso de la información muestra que el módulo de elasticidad y el módulo dinámico son altamente sensibles a los cambios internos que ocurren en la estructura de concreto debido a la reacción álcali-sílice. Estas propiedades muestran pérdidas significativas a temprana edad con expansiones relativamente bajas y sin agrietamiento visible, por lo tanto, estas propiedades pueden ser utilizadas para monitorear el deterioro estructural ocasionado por la reacción álcali-sílice.

### 3.30 EFECTOS EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL.

Si se piensa que la reacción álcali-sílice se encuentra presente en la estructura, tres factores importantes deben considerarse:

- 1.- La reacción es dependiente del tiempo y ocurre invariablemente cuando la estructura se encuentra en servicio, y/o cuando la estructura afectada presenta un agrietamiento severo.
- 2.- Los álcalis provenientes de fuentes externas como la sal de deshielo, agua, pueden penetrar en el concreto y sus efectos suelen ser más devastadores que los álcalis de fuentes internas (cemento, agregado, aditivos, agua, etc.) presentes en la etapa de mezclado.
- 3.- Las estructuras de concreto están expuestas a un medio ambiente variable en las condiciones de temperatura y humedad.

---

La interacción entre estos factores provoca en el concreto el desarrollo de deformaciones diferenciales expansivas. Estas deformaciones generan el subsecuente agrietamiento y el resultado es una pérdida en la resistencia y en el módulo de elasticidad. Estos cambios en las propiedades del concreto afectan la rigidez a la flexión de los miembros de concreto y llevan a distorsiones y desplazamientos de la estructura como una unidad.

Evaluar los efectos en las estructuras es importante para poder cuantificar la expansión máxima que probablemente ocurrirá con un agregado reactivo y con la dosificación de la mezcla de concreto bajo condiciones de exposición que tal vez se presenten en alguna etapa de la vida de la estructura.

### 3.31 VIGAS DE CONCRETO REFORZADO.

La resistencia a la flexión y el módulo elástico son las propiedades que más afectadas resultan de la reacción álcali-silice, por lo tanto, serán los miembros sujetos a flexión, como las vigas de concreto armado, los que presenten más distorsiones cuando sean afectados.

Experimentos con estructuras afectadas por la reacción muestran que el acero de refuerzo presenta una restricción significativa a las deformaciones expansivas, el acero de tensión sufrirá la mayor deformación y ésta será máxima cuando la cara de compresión del miembro no se encuentre restringida por la presencia del acero (23,248).

La fig 2.24 muestra las deformaciones del concreto sobre la profundidad de la viga y las deformaciones del concreto sin refuerzo en prismas de 75x75x300 mm con el propósito de comparación, mientras la fig 2.25 refleja el resultado de las deformaciones en el acero de refuerzo.

DEFORMACION DE VIGA DE CONCRETO REFORZADO AFECTADA POR LA REACCION ALCALI-SILICE

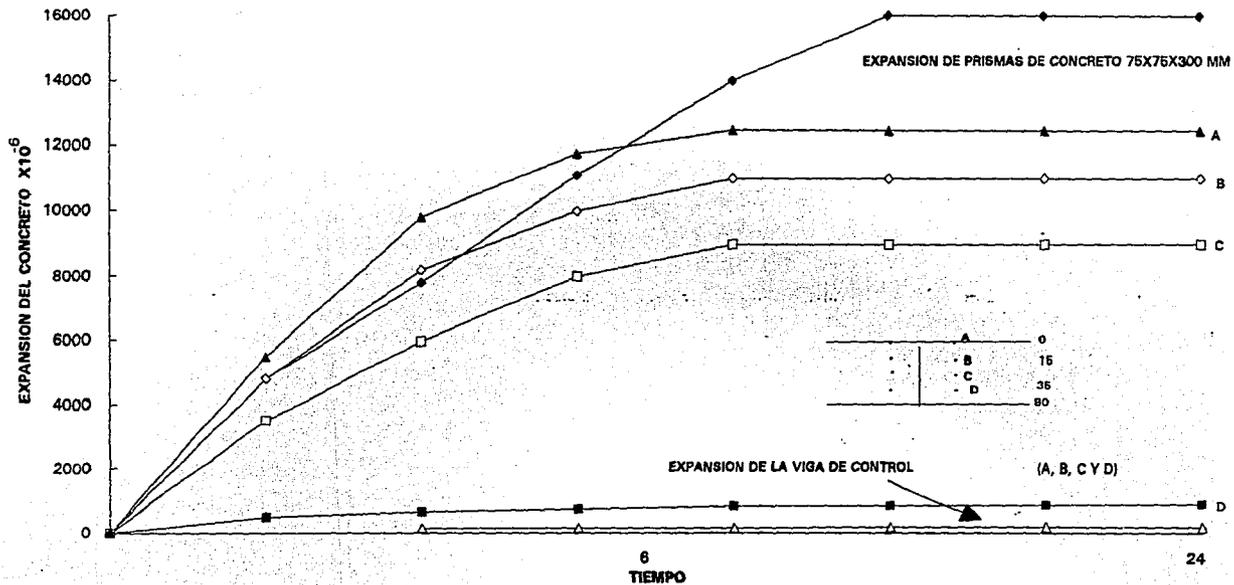


FIG. 2.24

## DESARROLLO DE LAS DEFORMACIONES EN EL ACERO DE REFUERZO DEBIDO A LA REACCION ALCALI-SILICE

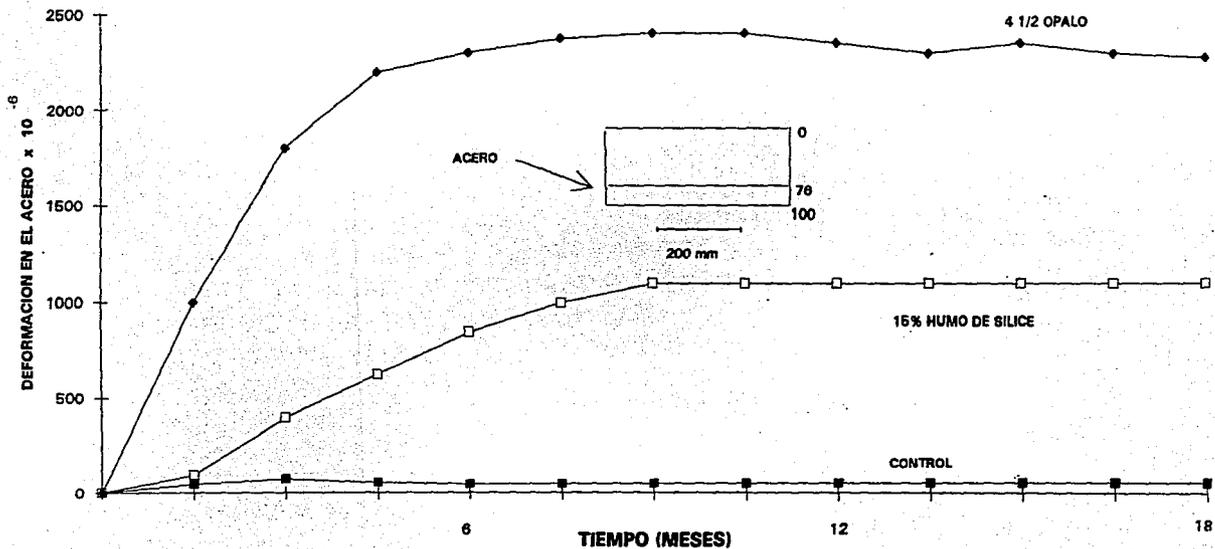


FIG. 2.25

---

Estos resultados señalan varias características importantes para miembros estructurales.

- 1.- La máxima deformación expansiva ocurre en el borde de la viga sin reforzar, por lo tanto tales bordes y esquinas son altamente susceptibles agrietarse.
- 2.- Las deformaciones expansivas en el concreto son irreversibles.
- 3.- Hay un gradiente de deformación sobre la profundidad del miembro y el máximo gradiente ocurrirá cuando la cara de compresión no se encuentre restringida por el acero de refuerzo. El gradiente también varía con el grado de reactividad.
- 4.- La presencia del acero de refuerzo ejerce un control en los efectos de la deformación.
- 5.- La expansión en el concreto también induce deformaciones irreversibles en el acero de tensión fig 2.25. Los esfuerzos de tensión debido a la deformación pueden ser del orden de  $2240 \text{ kg/cm}^2$  para deformaciones expansivas de 0.50%, aunque los esfuerzos en el acero no son proporcionales a las deformaciones expansivas en el concreto.
- 6.- El gradiente de deformación del concreto y las altas deformaciones en el acero crean un efecto de preesfuerzo que resulta en una deflexión.

En estructuras reales, estos esfuerzos y deformaciones son sobrepuestos a los producidos por las cargas que actúan en la estructura.

Si se asume un esfuerzo de tensión en el acero de  $2550 \text{ kg/cm}^2$  en una estructura de concreto bajo condiciones de servicio, hasta expansiones moderadas de 0.1 a 0.2%, pueden aumentar sustancialmente los esfuerzos en el acero y llevar a la estructura a niveles de deformación indeseables e irreversibles.

---

Las deformaciones diferenciales crean un gran número de grietas horizontales aproximadamente paralelas al acero de tensión. Las grietas son predominantes cerca del borde sin reforzar y menores en la vecindad del acero de tensión. Observaciones del agrietamiento debido a la reacción álcali-sílice en miembros sujetos a flexión en estructuras reales confirman este patrón de agrietamiento, además, en miembros de concreto reforzado afectados, la peor expansión y agrietamiento ocurre en las superficies externas, mientras que los efectos se van reduciendo progresivamente hacia el núcleo.

Hay así cuatro efectos principales posibles de la reacción en las vigas de concreto reforzado, las cuales pueden ocurrir o no al mismo tiempo, y que son probablemente aumentados cuando las vigas tienen un refuerzo inadecuado(23,24).

- 1.- Deformaciones de tensión excesivas en el concreto en la superficie sin reforzar
- 2.- Altas deformaciones en el acero de tensión.
- 3.- Agrietamiento extensivo.
- 4.- Grandes deformaciones o distorsiones.

Estos efectos pueden resultar en una pérdida considerable de la rigidez y afectar el comportamiento en servicio de las estructuras de concreto armado como se observa en la tabla 2.20, las deformaciones mostradas en la tabla son sin el efecto de la carga exterior. Los efectos de la reacción álcali-sílice en las vigas podrían no mostrarse por medio de la deflexión bajo carga externa, y habría pocos signos visibles de ductilidad previa a la falla.

---

#### 4.0 METODOS PARA EL DIAGNOSTICO DE AGREGADOS REACTIVOS

Como se ha señalado la reacción álcali-agregado se presenta en el concreto entre los álcalis del cemento (hidróxido de sodio y potasio), y ciertos agregados reactivos. Esta reacción produce una expansión y el subsecuente agrietamiento del concreto. El desarrollo del agrietamiento reduce principalmente la resistencia y el módulo de elasticidad, también permite la penetración de otros agentes deletéreos que dan origen a diferentes procesos de deterioro en el concreto que frecuentemente se superponen a los efectos de la reacción álcali-agregado.

Debido a los diversos factores que influyen en la reacción, la determinación real de la potencial reactividad de los agregados es solamente posible a través de programas de pruebas de laboratorio, además es necesario un criterio para interpretar los resultados para que se pueda predecir el riesgo de la reacción de los agregados en el concreto, con base únicamente en los resultados de laboratorio y conociendo las limitaciones de cada uno de los métodos utilizados.

En muchas ocasiones los agregados tienen que ser evaluados dentro de períodos de tiempo relativamente cortos, esto obliga a utilizar métodos de prueba que deben ser rápidos, confiables, simples y fáciles de reproducir, algunos de estos métodos son listados en la tabla 4.0, aunque no todos ellos cumplen con los criterios anteriores. No se debe perder de vista que todos estos métodos son pruebas aceleradas, pero aún así, requieren de un año para su realización y no pueden reproducir exactamente las condiciones de exposición a la que estará sujeta la estructura cuando se encuentre en servicio. Sin duda, todos los esfuerzos para predecir en menos de un año lo que puede ocurrir en la estructura después de cinco, diez, veinte años o más, han provocado que en muchos casos las pruebas resulten muy severas para los agregados inocuos, además de que presenten una pobre correlación con el comportamiento en campo; no obstante lo anterior, las pruebas de laboratorio son el único punto de partida en la evaluación de los agregados y su susceptibilidad al medio alcalino.

**MÉTODOS DE PRUEBA UTILIZADOS PARA LA DETECCIÓN  
DE LA REACCIÓN ALCALI-AGREGADO**

Método de Prueba	Duración de la Prueba	USADO PARA	
		RAS*	RAC*
Examen Petrográfico ASTM C 295	> 1 día	X	X
Método Químico ASTM C 289	2 a 3 días	X	
Método de la Barra de Mortero ASTM C 227	6 meses	X	
Método Acelerado ASTM C9-P214 o CSA	2 semanas	X	
Método del Prisma de Concreto CAN/CSA A23.2-14A	1 año	X	X
Propuesta en 1N NaOH a 38°C (Canadá)	6 meses	X	?
Método Acelerado en 1N NaOH a 80 °C	1 mes	X	?

RAS\* REACCIÓN ALCALI-SILICE

TABLA 4.0

RAC\* REACCIÓN ALCALI-CARBONATO

**Límites de Expansión de los Agregados propuestos  
con el Método Acelerado de la Barra de Mortero**

Referencia	Tipo de Agregado	Criterio de aceptación	Observaciones
Davies & Oberholster (12) (Sudáfrica)	Para todo agregado	<0.10% - 12 días	0.10-0.25%: expansión lenta > 0.25% expansión rápida
Shayan et al. (18) (Australia)	Para todo agregado	< 0.22% - 22 días	<0.10%/10 días & >0.10%/22 días: expansión lenta >0.10%/10 días: expansión rápida
Gratten-Bellew (15) (Canadá)	Agregados silíceos	<0.10% - 14 días	
	Grauvaca, argilita	<0.20% - 14 días	
	Otros	<0.15% - 14 días	
Bérubé et al. (16) (Canadá)	Agregados de Cantera	<0.10% - 14 días	
	Arena natural y Gravas	<0.20% - 14 días	
Hooton & Rogers (17) (Canadá)	Para todo agregado	<0.15% - 14 días o <0.33% - 28 días	
ASTM C9 Propuesta P 214 (14) E. U.	Para todo agregado	<0.10% - 14 días	0.10 - 0.20%: expansión lenta > 0.20%: expansión rápida
CSA (1) (Canadá)	Para todo agregado	<0.15% - 14 días	

---

Para poder acelerar el proceso de la reacción se utilizan algunas de las siguientes condiciones de prueba.

- 1.- Aumentar la concentración de álcalis a las que estará expuesto el agregado.
- 2.- Establecer condiciones de almacenamiento de los especímenes de prueba a altas temperaturas,  
por ejemplo 38 ° C, 80 °C, y aún más en tratamiento en autoclave
- 3.- Exponer a los especímenes a altas presiones en autoclave
- 4.- Colocar los especímenes en un medio ambiente con alta humedad,  
100% H.R. o sumergirlos en soluciones acuosas y/o incrementar el área específica reduciendo las muestras de agregado a tamaño de arena.

#### 4.1- Examen Petrográfico ASTM C 295

El examen petrográfico de los agregados evalúa la potencialidad de éstos para reaccionar con los álcalis del concreto, es una inspección que establece la presencia y cantidad de formas de silice reactiva dentro de las partículas del agregado. Los minerales que pueden producir expansiones nocivas son identificados por el microscopio óptico en núcleos de concreto (corazones) tomados de los especímenes o de estructuras afectadas. El análisis petrográfico generalmente reconoce minerales tales como el ópalo, cristobalita, tridimita, vidrio volcánico, pedernal, calcedonia y el cuarzo microcristalino.

Las técnicas complementarias al estudio petrográfico incluyen la difracción del rayo X, la medición del ángulo ondulatorio de extinción de los granos de cuarzo y la microscopía electrónica, aunque la efectividad del método del ángulo ondulatorio es cuestionada actualmente (26).

---

El examen petrográfico no puede proveer información en cuanto a la expansibilidad del concreto, sin embargo, un petrógrafo experimentado puede predecir el comportamiento probable de los agregados en el concreto. Este análisis es a veces suficiente para aceptar o rechazar el agregado para su empleo en la fabricación del concreto; si hay duda en los resultados, ayuda a seleccionar las pruebas adicionales que deberán realizarse, considerando la naturaleza de los agregados bajo estudio, lo que permite reducir el tiempo de realización de las pruebas. Es importante reconocer que el examen petrográfico y demás estudios complementarios son únicamente el primer paso en la evaluación de la susceptibilidad del agregado en un medio alcalino como la del concreto.

Cuando exista información de un comportamiento satisfactorio de los agregados en condiciones de servicio similares a la estructura que se requiere construir y en combinación con un cemento similar al que se pretende utilizar, esta prueba puede omitirse.

#### **4.2.- Prueba de Fluorescencia del Gel**

Es una técnica de identificación in-situ de los productos de la reacción álcali-sílice en el concreto, que ha sido desarrollada recientemente por Natesaiyer y Hoover, en la Universidad de Cornell (1,3).

En esta prueba de fluorescencia, los productos de la reacción son identificados al aplicar iones de uranil a la muestra de concreto que al observar se bajo una luz ultravioleta (UV) de onda corta presenta una fluorescencia amarilla verdosa.

La prueba consiste en sustituir los iones que son absorbidos por el gel (Na, K, Ca) por iones de uranil, ya que su absorción es muy rápida, produce fluorescencia y por lo tanto fácil de identificar.

---

Los espécimenes tomados de las estructuras afectadas o de las barras de mortero son lavados con agua destilada y rociados con una solución de acetato de uranil por 10 minutos, este proceso se deberá realizar con medidas de protección para evitar la inhalación del reactivo, después de la absorción de los iones de uranio, por los productos de la reacción (si existen), los espécimenes son lavados nuevamente para retirar la solución de uranio que no fue absorbida y posteriormente la muestra tratada se observa bajo una luz UV de onda corta en un cuarto oscuro.

La presencia del gel "álcali-sílice" es indicada por la fluorescencia amarilla verdosa característica del ion de uranio absorbido. El ion de uranio se excita mejor bajo la luz ultravioleta de onda corta y muestra cómo se ha señalado una fluorescencia amarilla verdosa que puede ser distinguida fácilmente en espécimenes de concreto tratados.

Se recomienda que las muestras sean observadas antes de una hora después del tratamiento, ya que conforme la solución de uranio se seca la muestra produce una fluorescencia que puede ser confundida como presencia del gel.

La prueba puede identificar claramente los productos de la reacción entre los álcalis y el sílice reactivo. Una comparación que se realizó entre las expansiones que se presentaron en las barras de mortero y la cantidad de gel, muestra que la prueba de fluorescencia no puede ser utilizada como un indicador de la posible expansión del concreto<sup>(29)</sup>. Sin embargo, puede ser utilizada adecuadamente para determinar la presencia o ausencia de los productos de la reacción álcali-sílice y así proveer indicios de las causas probables del deterioro observado en el concreto.

---

#### 4.3.- Método Químico ASTM C 289.

Es una de las pruebas más utilizadas para evaluar la reactividad potencial de los agregados. Su popularidad se debe principalmente a que requiere solamente pequeñas cantidades de material y los resultados se pueden obtener en pocos días. En esta prueba se toman 25 gr. de muestra del agregado y se trituran a un tamaño entre 150 micras (malla No100) y 300 micras (No 50), se colocan en 25 ml de una solución de NaOH a 80 °C por 24 hrs; la solución es filtrada y analizada en cuanto al sílice disuelto (Sc) y la reducción en la alcalinidad (Rc). Los resultados son dibujados en una gráfica estándar que muestra tres campos que corresponden a agregados inocuos, nocivos y potencialmente nocivos. De acuerdo con Vivian y Tamura cuando los resultados muestran menos de 100 o 250 mmoles/l, respectivamente, de sílice disuelta, el agregado es poco probable que cause expansiones significativas en el concreto.

Esta prueba es aplicable para la reacción álcali-sílice solamente, sin embargo, un gran número de agregados reactivos conocidos pasan la prueba, mientras otros con un comportamiento aceptable en el concreto son rechazados. Hay varias razones para esto:

1.- Una pobre representatividad de los agregados que se utilizaron para diseñar la prueba.

La carta de decisión original ASTM fue basada en la expansión de las barras de mortero y en el análisis petrográfico, en la que se estudiaron cerca de 71 tipos de rocas que contenían minerales silíceos muy reactivos como el ópalo, calcedonia y el vidrio volcánico. Sin embargo, la aplicación de la prueba a agregados de diversos países, permitió llegar a la conclusión de que la carta original no es universalmente aplicable (30).

2.- La interferencia de minerales creadas por las fases de minerales como calcio, magnesio y hierro, silicatos de magnesio, sulfato de calcio (yeso), minerales de arcilla, materia orgánica y óxidos féreos, resulta en:

---

a) Subestimación de los valores de Sílice disuelta ( $S_c$ ) debido a la precipitación de sílice o interferencia durante el análisis químico.

b) Sobrestimación de los valores  $R_c$  debido a las reacciones  $Na^+$  y  $OH^-$  (31). En particular, el carbonato de calcio que origina la precipitación de parte del sílice disuelto como  $CSH$ , causa así la aceptación de varios agregados reactivos.

Una versión modificada del método químico, consiste en ejecutar el procedimiento de prueba en seco "residuo insoluble", el tamaño del agregado es de 0 a 300  $\mu m$  (malla No 50). Este método a pesar de que produjo información interesante en la estabilidad química de los residuos insolubles de los agregados investigados en la solución alcalina, mostró solamente un éxito limitado al diferenciar a los agregados potencialmente reactivos de los inocuos.

3.- Durante el proceso de trituración y cribado de la muestra del agregado para obtener el material requerido para la prueba, el material que pasa la malla No 50 y se retiene No 100, gran parte de la fase reactiva puede ser extraída de las muestras de prueba cuando se criba el material para eliminar la fracción menor a la malla No 100, debido a que la cuarcita reactiva se pega alrededor de los granos de cuarzo no-reactivos en algunas areniscas (32).

La experiencia del pasado ha mostrado que el método químico ASTM C 289 es severo para algunos agregados inocuos, mientras que no resulta ser lo suficientemente severo para muchos agregados deletéreos. En Canadá esta prueba no es utilizada y ha sido substituida por la nueva versión de CSA estándar para la reacción álcali-agregado (33).

---

#### 4.4.- Método de la barra de mortero ASTM C 227.

Las barras de mortero se hacen con el agregado bajo estudio y cemento con un alto contenido de álcalis (0.7-1.10% del equivalente de  $\text{Na}_2\text{O}$ ) de uso general o representativo. La relación de cemento y agregado es 2.25. La cantidad del agua de mezclado es ajustada para obtener una mezcla fluida. Las barras tienen un tamaño de 25x25x285 mm, son mantenidas en sus moldes 24 hrs a 23 °C y posteriormente almacenadas a 38 °C y 100%H.R, en recipientes sellados; las mediciones en los cambios de longitud se realizan frecuentemente a intervalos. Los límites de la expansión son 0.10% a 6 meses, 0.05% a 3 meses. De acuerdo con Grattan-Bellow (34), estos límites deberían ser reportados a 12 y 6 meses respectivamente.

Esta prueba no es aplicable para la reacción álcali-carbonato, y también ha demostrado que "no" es capaz de detectar la reacción álcali-sílice cuando presenta una expansión lenta, en particular con la grauvaca y argilita(35).

#### Varios factores influyen en los resultados de la prueba como son:

1.- La prueba es afectada por la presencia o no de la envoltura de algodón dentro del recipiente de almacenamiento fig 4.2. (36). En los recipientes que contienen algodón un gran número de agregados reactivos satisfacen los requisitos de la prueba debido a que presentan una excesiva lixiviación de los álcalis de la barra de mortero, esto lleva a bajas expansiones. Como resultado de numerosas pruebas realizadas se determinó que cuando los agregados son declarados inocuos, es dudoso el resultado si las barras han sido almacenadas en recipientes con algodón en su interior.

2.- Las variaciones permitidas en el contenido de álcalis en el cemento para la prueba pueden también explicar parte de las variaciones experimentales observadas en el pasado. (fig 4.3). Una práctica actual en muchos laboratorios consiste en añadir NaOH al agua de mezclado para aumentar el contenido de álcalis a 1.25% (equiv. de  $\text{Na}_2\text{O}$ ) por peso de cemento.

### EXPANSION DE BARRAS DE MORTERO ASTM C 227 ALMACENADAS EN DIFERENTES RECIPIENTES

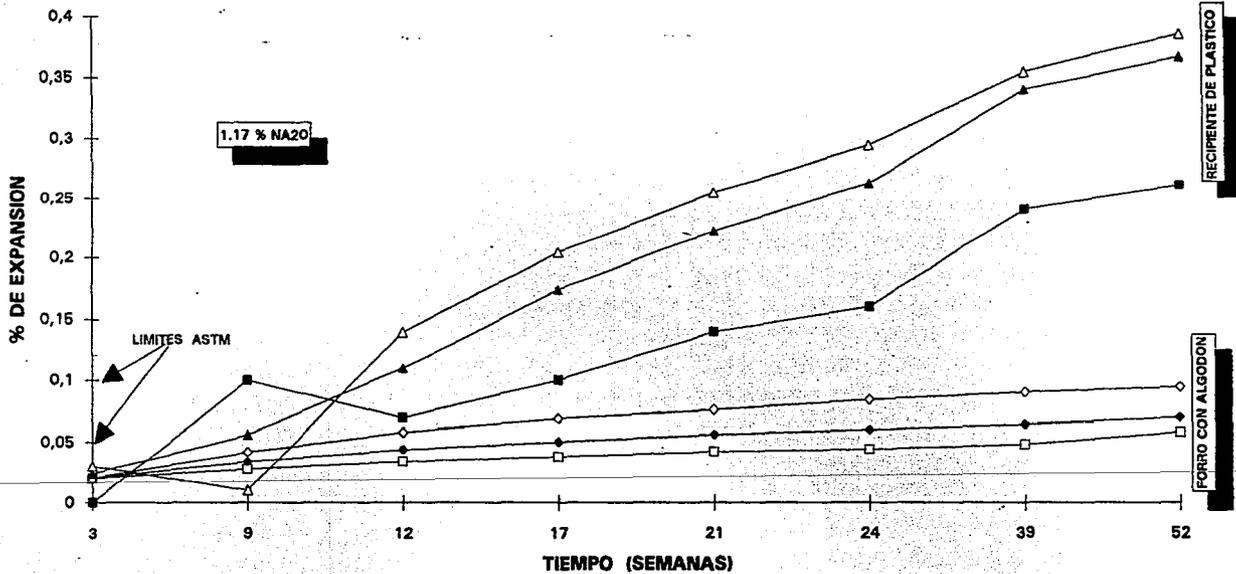


FIG. 4.2

### EFFECTOS DEL CONTENIDO DE ALCALIS EN LA EXPANSION DE BARRAS DE MORTERO ASTM C 227

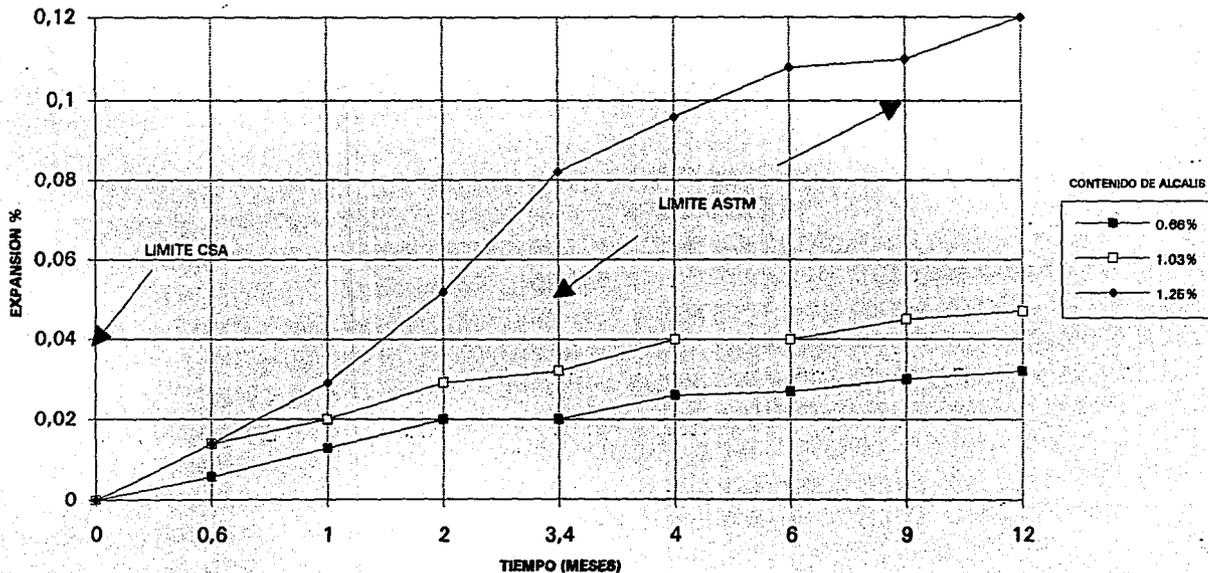


FIG. 4.3

---

3.- La relación w/c no está especificada en la prueba, el agua se añade hasta alcanzar un revenimiento especificado. Sin embargo, se ha observado que las variaciones en la relación w/c pueden afectar significativamente los resultados de la expansión (fig 4.4). Este comportamiento puede ser atribuido a una menor cantidad del agua de poro "libre" en relaciones bajas de w/c en las mezclas, que resulta en concentraciones altas de álcalis en la solución de poro. Una menor porosidad y una relación w/c baja ofrece menos lugares para almacenar los productos de la reacción nociva, mientras tales mezclas son posiblemente menos susceptibles de lixiviar los álcalis debido a una permeabilidad relativamente más baja.

4.- Como en esta prueba se tritura finamente el agregado grueso para reducirlo a tamaño de arena, no se reproduce su verdadero comportamiento en el concreto, ya que se ha observado que los fragmentos con tamaño de arena producen más expansión que los fragmentos con tamaño de grava (38).

Algunos agregados que han pasado esta prueba han presentado expansiones nocivas en las estructuras. Holster y Davies (39), han sugerido que el período de almacenamiento debe ser entre 3 y 6 meses para agregados opalinos y entre 6 y 12 meses para agregados que contengan cuarzo.

Por todo esto el método del prisma de concreto CSA, que no toma más tiempo, se considera más confiable y es preferible sobre la barra de mortero ASTM C 227. Sin embargo, cuando la prueba de mortero se tiene que realizar es recomendable:

- a) Utilizar un recipiente sin cubierta de algodón
- b) Aumentar el contenido de álcalis a 1.25% (equiv. de  $\text{Na}_2\text{O}$ ) de peso del cemento, añadiendo NaOH al agua de mezclado.
- c) Controlar la relación w/c a 0.50 (0.44 para arena sin triturar).
- d) Comparar los resultados obtenidos con las referencias que existan del agregado.

### EFFECTOS DE LA RELACION W/C EN LA EXPANSION DE LAS BARRAS DE MORTERO ASTM C 227

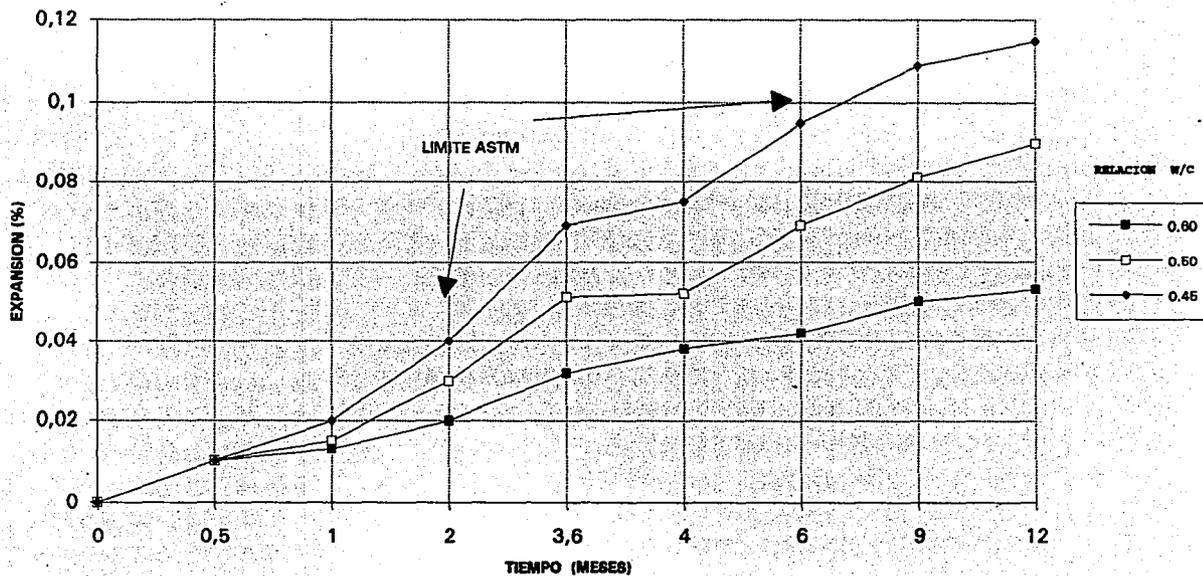


FIG. 4.4

---

#### 4.41.- Método acelerado de la barra de mortero (ASTM C 9-P 214 & Propuesta CSA)

Las barras de mortero para esta prueba son preparadas de acuerdo con ASTM C 227. Después de 24 hrs. de iniciado el curado en los moldes, las barras son colocadas en un recipiente que se sella y se llena con agua a 23 °C; posteriormente el recipiente se coloca en un horno a 80 °C, al día siguiente se toma la lectura cero y las barras se transfieren a una solución de 1N NaOH a 80 °C por 2 semanas (12 días en la propuesta original NBRI (41)), las mediciones se hacen cada día. En esta prueba, la expansión de las barras de mortero aumentan generalmente cuando se incrementa la relación w/c (32,39,42). La ASTM C 9-P 214 (43) y CSA (33) proponen utilizar un arreglo w/c de 0.50 para agregados manufacturados y 0.44 para arena natural.

Se ha llegado a la conclusión de que los agregados que se expanden menos de 0.10% después de 14 (o 12) días son considerados inocuos (tabla 4.01); los criterios que se muestran en la tabla son severos para varios agregados cuyo comportamiento en campo es satisfactorio(33), además los agregados que exceden estos límites propuestos deberán ser sujetos a una mayor investigación.

El método acelerado de la barra de mortero debe ser utilizado con cuidado para rechazar agregados, ya que muchos agregados inocuos que tienen un comportamiento satisfactorio en campo y/o en otras pruebas de laboratorio en especímenes de mortero o concreto, han sido reportados por no haber pasado en esta prueba , cuando se utilizan los límites de 0.10% o 0.15% de expansión a 14 días, en este caso se deberán ampliar los estudios de los agregados que excedan los límites. No obstante, esta prueba es una herramienta de cribado útil que reconoce en un plazo de 2 semanas los agregados más nocivos, mientras que identifica correctamente un alto porcentaje de agregados inocuos.

---

Este método de prueba ha sido aplicado a un gran número de agregados en varios países. Además, su precisión ha sido evaluada por varios investigadores<sup>(39,42,44,45)</sup>, con resultados muy satisfactorios.

#### 4.5.- Método del Prisma de Concreto CAN/CSA A23-2-14A

Se fabrican tres prismas de concreto, no menores de 75x75x300 mm y no mayores que 120x120x450 mm, se hacen con el agregado grueso bajo estudio, se utiliza arena no-reactiva y cemento portland normal con un contenido de álcalis entre 0.8% y 1.2% (equiv. de Na<sub>2</sub>O). El contenido de cemento especificado es 310 kg/m<sup>3</sup> y la cantidad del agua de mezclado es ajustada para obtener un revenimiento de 8 ± 1 cm.

Desde 1986, se ha utilizado un contenido total de álcalis mayor a 1.25% (equiv. de Na<sub>2</sub>O) por peso de cemento, añadiendo NaOH al agua de mezclado. Esto corresponde a un contenido total de álcalis de 3.88 kg/m<sup>3</sup> de concreto. Los prismas son almacenados ya sea en un cuarto de curado a 23 °C o en un recipiente sellado con agua a 38 °C, las mediciones en los cambios de longitud se realizan periódicamente. Los recipientes almacenados a 38 °C serán extraídos de las condiciones de almacenamiento 16± 4 horas antes de la medición.

El prisma de prueba será entonces sumergido por 30 minutos. en baño maría a 23 °C antes de la medición. La condición de almacenamiento a 23 °C fue la primera en proponerse para detectar la reacción álcali-carbonato, mientras la versión "acelerada" así llamada, a 38 °C, se utiliza actualmente para detectar la reacción álcali-sílice. La expansión a un año no debe exceder de 0.025% a 23 °C o 0.04% a 38 °C.

---

### **Influencia de las proporciones en la mezcla (w/c, agregado grueso/fino)**

De acuerdo con el estándar, el agua se incorpora a la mezcla de concreto para dar una fluidez especificada, a cualquier relación w/c. Sin embargo, al igual de lo que se observó en el método de la barra de mortero ASTM C 227 fig 4.4, variaciones en la relación w/c pueden tener efectos significativos en el proceso de expansión fig 4.5 (33). Por ejemplo con una relación w/c baja, se obtiene normalmente un concreto de mayor resistencia menor permeabilidad y una menor porosidad, pero a la vez presenta una alta concentración de álcalis en el agua de poro libre, y un menor espacio para almacenar los productos de la reacción.

Varios factores afectan la demanda del agua en la mezcla de concreto, y no están controlados completamente en el procedimiento actual, como la forma de la partícula, que puede ser influenciada principalmente por el tipo de triturado empleado para preparar los agregados, y la relación entre el agregado grueso y el fino, la cual puede variar entre 50:50 y 65:35, esto causa también variaciones en la cantidad de partículas reactivas en el agregado.

### **Influencia de las condiciones de almacenamiento.**

De acuerdo con Rogers y Hooton(36,46), una cantidad significativa de álcalis son lixiviados progresivamente en la prueba del prisma de concreto. Con la expansión medida a largo plazo se puede deducir la cantidad de álcalis restantes en los prismas. Por ejemplo, después de 130 semanas de prueba los especímenes hechos con agregado reactivo álcali-carbonato de Ontario (Canadá) sufrieron el 63% de álcalis lixiviados a 23 °C (en el cuarto de curado) y 42% a 38 °C (recipientes de plástico forrado con algodón). Los experimentos han mostrado que la expansión a un año de los prismas de concreto almacenados en agua a 38 °C, en recipientes sellados, es similar o ligeramente menor cuando el algodón es removido de los recipientes (39,47), mientras que disminuyen cerca del 15% a 20% cuando los especímenes de concreto son sumergidos durante 30

### EFFECTOS DE LA RELACION W/C EN LOS PRISMAS DE CONCRETO CSA

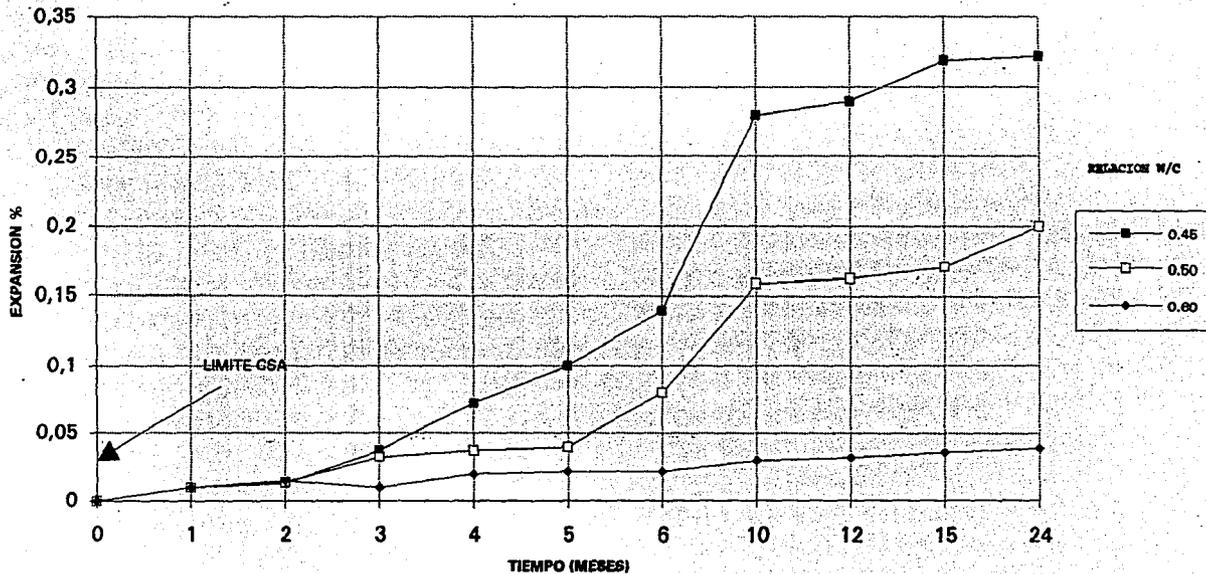
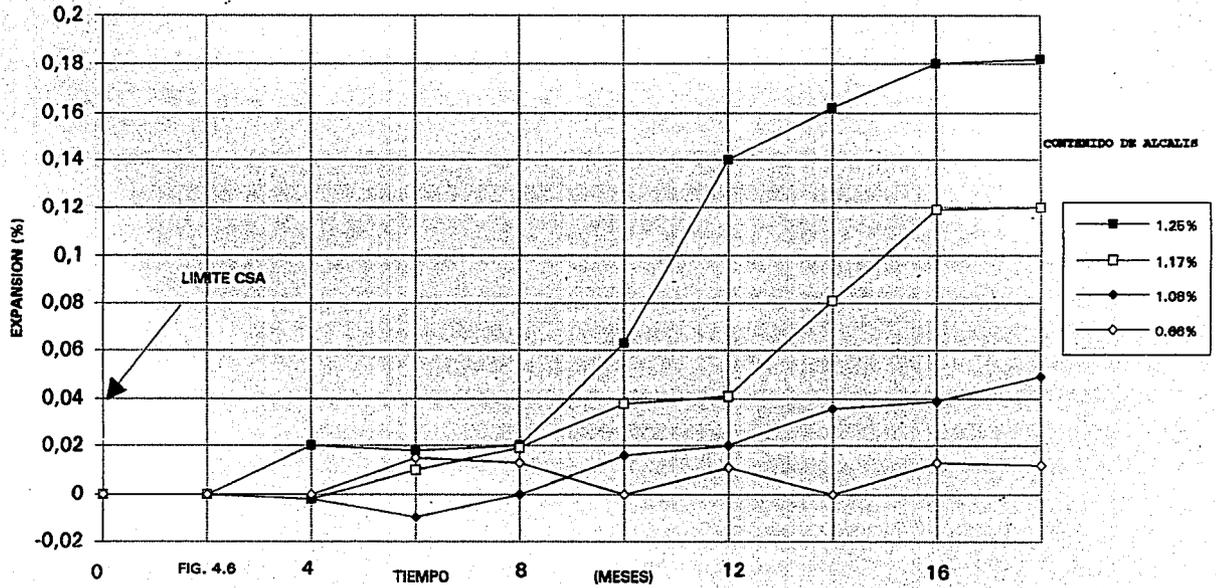


FIG. 4.5

### EFFECTO DEL CONTENIDO DE ALCALIS EN LOS PRISMAS DE CONCRETO CSA



---

minutos. en agua antes de cada medición (como se especifica en CSA), comparado con los que no se sumergen (47), como resultado de la disolución de álcalis en el agua. La lixiviación de los álcalis de los prismas de concreto se ha mencionado como uno de los posibles factores que explican por qué las curvas de expansión caen después de algunos meses de pruebas.

El método actual puede detectar una gran variedad de agregados reactivos, con la excepción de un número de agregados de baja reactividad tales como son la grauvaca, argilita, cuarcita, filita, arcosa, arena. De acuerdo con Rogers (46,48), para reconocer estos agregados de baja reactividad, la prueba debería ser modificada para evitar la lixiviación excesiva de los álcalis, por ejemplo, utilizando recipientes de plástico sellados para almacenar los prismas, o para compensar este fenómeno añadiendo más álcalis y/o utilizando más cemento en la mezcla de concreto.

A pesar de todas las limitaciones anteriores, el método del prisma de concreto es aún considerado en varios países como el método más realista utilizado para evaluar los agregados potencialmente reactivos en el concreto en laboratorio. Sin duda, la prueba es capaz de reconocer a los agregados más reactivos excepto algunos que presentan una expansión lenta, por lo que se requiere un contenido más alto de cemento del orden de  $410 \text{ kg/m}^3$  (39)

#### 4.51.- Nueva Propuesta al Método del Prisma de Concreto CAN/CSA-A23.2-14A

Para responder a varios problemas que han sido identificados en el método actual, se propusieron algunas modificaciones al método(33) incluyendo las siguientes:

- 1.- El contenido de cemento se aumentó a  $420 \text{ kg/m}^3$ , se ajusta el contenido de álcalis a 1.25% (equiv. de  $\text{Na}_2\text{O}$ ) por peso de cemento, añadiendo NaOH al agua de mezclado, esto da un contenido de álcalis en el concreto de  $5.25 \text{ kg/m}^3$ . Fig. 4.6

- 
- 2.- El uso de cemento para esta prueba es el cemento portland con un contenido de álcalis de 0.9 +- 0.1 (equiv. de  $\text{Na}_2\text{O}$ ), comparado con el +- 0.2% del estándar actual.
  - 3.- La relación w/c es controlada entre 0.42-0.45
  - 4.- La relación entre el agregado grueso/fino es 60/40 (con algunas excepciones para agregados con alta y baja densidad)
  - 5.- La sección de cruz de los prismas de concreto se mantiene a 75x75 mm con la posibilidad de variar su longitud entre 275 y 405 mm.
  - 6.- La prueba siempre se realiza a 38 °C
  - 7.- Se sumerge 30 minutos en agua a 23 °C antes que la lectura sea tomada.
  - 8.- El recipiente de almacenamiento es de plástico de 22 a 25 lbs., el algodón que es el material absorbente está aún situado alrededor de la pared interior.

La prueba puede ser utilizada para evaluar la reactividad potencial de los agregados, utilizando un agregado fino o grueso no-reactivo respectivamente. La expansión menor que 0.1% en el método acelerado de la barra de mortero ASTM C 9-propuesta-P 214, o menor que 0.015% en el método del prisma de concreto (nuevo procedimiento). A un año, el límite de expansión de 0.04% es aún utilizado para aceptar el agregado. La prueba podría ser utilizada para probar una combinación de agregado grueso-fino, además debería permitir la detección de los agregados reactivos que presentan una expansión lenta. Sin embargo, basados en la experiencia de Quebec y al menos para concretos hechos con un contenido de cemento menor que 375 a 385  $\text{kg}/\text{m}^3$ , el método podría ser severo para muchos agregados inocuos o potencialmente reactivos. Sin embargo, en la mitad de todas las gravas representativas de Quebec que han sido estudiadas en la Universidad de Lavat, utilizando un contenido de cemento de 410  $\text{kg}/\text{m}^3$ , la expansión fue más del 0.04% después de un año, mientras que solamente en algunos casos se observó que tuvieron un comportamiento deletéreo en campo.

---

#### 4.6.- Método de la barra de Mortero en Autoclave.

Algunos investigadores propusieron probar bajo altas temperaturas y presión los especímenes en que se involucra el curado a vapor y/o en agua en ebullición o en soluciones alcalinas. Las dimensiones de las muestras así como la proporción de las mezclas utilizadas y el procedimiento adoptado varían de un autor a otro, pero son similares o versiones modificadas del método original propuesto por Tang, Tamura y Nishibayashi (54,53).

El potencial de reactividad de los agregados es determinado por los cambios en la longitud, o por inspección visual de la superficie del concreto y por las mediciones de la degradación interna. Estos métodos generalmente dan resultados confiables, al menos para los agregados investigados., también se han utilizado para evaluar el efecto de los aditivos minerales en la reactividad álcali-silice y la susceptibilidad futura del concreto fresco a la reacción (53).

La prueba propuesta por Tang y co-autores requiere dos días. Se elaboran pequeñas barras de mortero de 10x10x40 mm, fabricadas con una proporción de cemento: agregado: agua de 10:1:3 y con un contenido de álcalis arriba de 1.5% (equiv. de  $\text{Na}_2\text{O}$ ) de peso del cemento, incorporando NaOH al agua de mezclado. Las barras son curadas por 24 hrs. a 20 °C y 100% H.R, después curadas en vapor por 4 hrs., posteriormente se sumergen en una solución de 10% de KOH por 6 hrs a 150 °C, en autoclave. La expansión en exceso de 0.10-0.15% corresponde a agregados que son potencialmente deletéreos en el concreto.

Desafortunadamente, la prueba falla en detectar ciertos agregados reactivos, como la andesita, riolita; además muchos autores señalan que los agregados que han sido identificados como reactivos en la prueba de autoclave pueden no necesariamente reaccionar en el medio alcalino del concreto.

---

La principal ventaja es que únicamente requiere de una pequeña cantidad de material, de modo que puede ser utilizada, por ejemplo, para evaluar la reactividad de partículas de grava individuales.

No hay que perder de vista que actualmente no hay una prueba que sea 100% segura, pero se consideran que son tres los métodos que pueden ser aplicables en la mayoría de los agregados del concreto.

- a) Examen petrográfico ASTM C 295
- b) Método acelerado de la barra de mortero (ASTM C 9-P214 o propuesta CSA)
- c) Prisma de concreto CSA A23.2-14A

No se debe olvidar que la información más confiable de la potencial reacción del agregado en el concreto es suministrada por el comportamiento en el campo de las estructuras existentes. Si tal información no estuviera disponible o fuera considerada insuficiente, entonces los agregados tendrán que ser estudiados en el laboratorio. En tal situación, tiene que señalarse que el examen petrográfico debe ser siempre el primer paso que se debe dar, y puede ser utilizado para aceptar o rechazar el agregado bajo estudio, o al menos para seleccionar los métodos de prueba más apropiados para evitar posibles errores, siempre y cuando sea realizado por un petrógrafo con experiencia en este fenómeno.

La prueba de fluorescencia determina adecuadamente si los productos de la reacción se encuentran presentes en la estructura, pero no puede ser utilizada como un indicador de posibles expansiones provocadas por dicha reacción.

El método químico ASTM C 289 carece de confiabilidad y no es recomendado, principalmente por la interferencia de los carbonatos, que resulta en la aceptación de numerosos agregados deletéreos.

---

El método químico modificado (ASTM C 289 de residuos insolubles) tampoco es recomendable, porque es demasiado complejo, difícil de reproducir y no es más eficiente que el método acelerado de la barra de mortero, el cual toma poco tiempo.

El método acelerado de la barra de mortero ASTM C 9-propuesta-P214. es una prueba severa para un gran número de agregados inocuos (gravas naturales, calizas, arena, etc), por lo tanto, no puede ser utilizado para rechazar agregados; sin embargo, es una herramienta útil para clasificar, ya que solamente algunos agregados nocivos no pueden ser detectados, los cuales pueden ser identificados rápidamente por el examen petrográfico. Además es menos severo que el método acelerado del prisma de concreto (inmerso en 1N NaOH a 80 °C), que actualmente se utiliza en Quebec.

El método de la barra de mortero en el autoclave parece muy prometedor, aún antes de que se utilice como una prueba de rutina. Este método así como cualquier otro tiene que ser verificado por diferentes investigadores; lamentablemente muchos de los métodos propuestos se han encontrado con la necesidad de realizar más investigaciones, esto refleja claramente la situación actual, ya que todos los métodos de prueba acelerados dan resultados satisfactorios, únicamente en los agregados que han sido estudiados, y en muchos casos no pueden ser aplicados indistintamente en otros países.

Si al realizar las investigaciones permaneciera alguna duda después de ejecutar el examen petrográfico y el método acelerado de la barra de mortero, no hay otro camino que realizar la prueba del prisma de concreto CAN/CSA A23.2-14A a 38 °C. (1 año). El método de la barra de mortero ASTM C 227 no es recomendable porque los resultados son afectados por las condiciones de almacenamiento (tipo de recipiente, cubierta), la relación w/c y el contenido de álcalis, además de que el período de prueba (6 meses) es casi tan largo como el método de prueba de CSA.

---

Cuando el tiempo no es crítico, es recomendable que la prueba de concreto CSA se realice inmediatamente, ya que es más realista y puede ser requerida de cualquier forma, sus desventajas es que es afectada por la relación w/c, la finura del cemento y las condiciones de almacenamiento y posiblemente por la relación en la proporción del agregado grueso/fino. Estos parámetros probablemente serán controlados en la versión siguiente de CSA estándar.

---

## SITUACION DEL EFECTO ALCALI-AGREGADO EN LA REPUBLICA MEXICANA

Como el tiempo en que tarda en manifestarse la reacción es muy variable ( 1 a 30 años ), y además de que no es fácilmente identificable, no es posible establecer si en los países en donde dicho fenómeno no se ha registrado, eso se debe principalmente a que los factores de riesgo no han coincidido, o posiblemente a que el fenómeno no ha podido ser identificado como la causa del deterioro del concreto. Por esto, no se puede establecer si en los países en donde aparentemente el fenómeno no se ha presentado éste llegue o no a manifestarse posteriormente.

México no ha permanecido ajeno al deterioro que sufre el concreto ocasionado por la reacción álcali-agregado, ya que las condiciones para que el fenómeno se presente y se desarrolle están dadas, debido a que con frecuencia se utilizan agregados que contienen sílice reactiva y se emplean cementos con un alto contenido de álcalis debido a los nuevos sistemas de producción del cemento. Ante esta situación la Comisión Federal de Electricidad encabezó una serie de esfuerzos para establecer una regionalización de las principales zonas de la República en que pueden hallarse los diferentes tipos de rocas identificadas como potencialmente reactivas con los álcalis del cemento.

A continuación se incluye la descripción de dichas zonas, cuya delimitación de carácter general de ninguna manera excluye la posibilidad de la existencia de agregados potencialmente reactivos fuera de ellas, como ocurre con los agregados naturales que fueron acarreados y depositados fuera de su zona de origen por diferentes agentes de transporte como pueden ser los ríos, el viento o las fuerzas que se liberan en las erupciones volcánicas.

Tomando como base la constitución geológica de la República Mexicana, la SPP<sup>(70)</sup> ha establecido un marco fisiográfico subdividiéndola en 15 provincias fisiográficas que rigen fundamentalmente por la composición y las formas que prevalecen en una determinada

---

asociación litológica. Utilizando este marco fisiográfico, es factible delimitar en forma aproximada zonas o regiones en cuyos materiales pueden estar presentes aquellos componentes que comúnmente se identifican como reactivos con los álcalis. De esta manera se han agrupado las regiones cuyas características fisiográficas son comunes en cuanto a la probable existencia de rocas y minerales reactivos que pueden producir la reacciones álcali-agregado

### **REGIONES CON ROCAS PROPENSAS A LA REACCION ALCALI-SILICE.**

#### **Región de agregados potencialmente inocuos.**

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

#### **Región de agregados moderadamente reactivos.**

Abarca la porción más al Noroeste de la República, así como la porción sur de la misma, ocupando parcialmente las provincias fisiográficas de la Península de Baja California y del desierto de Sonora, en donde suelen hallarse rocas volcánicas y rocas metamórficas de muy variada composición, y totalmente la que corresponde a la Sierra Madre del Sur, donde es posible encontrar toda clase de rocas ( ígneas volcánicas y plutónicas, sedimentarias de origen químico

---

y mecánico y gran diversidad de rocas metamórficas de los complejos de Xolapa, Acatlan y Oaxaqueño).

#### **Región de agregados altamente reactivos.**

Comprende la porción sur de la Península de Baja California y las provincias fisiográficas de la Llanura Costera del Pacífico, la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico. En esta región predominan las rocas de origen volcánico con diferentes contenidos vitreos (sílice amorfa) que comprenden en orden ascendente los basaltos, las andesitas, las dacitas y las riolitas, con sus respectivas tobas fig 5.2.

#### **REGIONES CON ROCAS PROPENSAS A LA REACCION ALCALI-CARBONATO.**

Las rocas que normalmente intervienen en esta reacción son las calizas dolomíticas, las calizas arcillosas (margas) y otras rocas calcáreas que contienen dolomía. Sin embargo, debido a que estas rocas suelen hallarse intercaladas en formaciones constituidas por rocas similares pero no reactivas, el grado de reactividad del material explotado en conjunto en una misma formación, depende de la proporción en que se encuentre la fracción reactiva. Por tal motivo, una de las medidas preventivas que suelen recomendarse para evitar esta reacción, consiste en efectuar la explotación selectiva del banco o por lo menos reducir el agregado reactivo a no más del 15 % del agregado total en el concreto (27).

Dado lo irregular de la distribución del material potencialmente reactivo dentro de las formaciones existentes en cada provincia fisiográfica, resulta muy difícil tratar de hacer una delimitación de regiones con distinto grado de reactividad potencial, como se hizo en el caso de las rocas que contienen sílice reactiva. En consecuencia, lo que se intenta en el siguiente mapa



PROVINCIAS FISIGRAFICAS

- I PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA
- II DESIERTO DE SONORA
- III SIERRA MADRE OCCIDENTAL
- IV SIERRA Y LLANOS DEL NORTE
- V SIERRA MADRE ORIENTAL
- VI GRAN LLANURA NORTEAMERICANA
- VII LLANURA COSTERA DEL PACIFICO
- VIII LLANURA COSTERA DEL GOLFO NORTE
- IX MESA DEL CENTRO
- X EJE NEOVOLCANICO
- XI PENINSULA DE YUCATAN
- XII SIERRA MADRE DEL SUR
- XIII LLANURA COSTERA DEL GOLFO SUR
- XIV SIERRA DE CHAPAS
- XV CORDILLERA CENTROAMERICANA

REGION DE AGREGADOS MODERADAMENTE REACTIVOS

REGION DE AGREGADOS ALTAMENTE REACTIVOS

FIG. 5.2 DELIMITACION DE REGIONES CON ROCAS SILICEAS POTENCIALMENTE REACTIVAS CON LOS ALCALIS

---

de la República Mexicana fig 5.3 es señalar aquellas provincias fisiográficas o zonas en que suelen hallarse rocas carbonatadas del tipo considerado como potencialmente reactivo, sin pretender calificar su grado de reactividad, lo cual debe ser motivo de estudio de cada banco o cantera en particular, previamente a su explotación con el fin de obtener agregados para el concreto.

#### **Región de agregados potencialmente inocuos.**

Esta zona ocupa prácticamente toda la República Mexicana, con excepción de la Sierra Madre Oriental, las Sierras de Chiapas y la porción sedimentaria (plataforma Morelos-Guerrero) de la Sierra Madre del Sur.

#### **Región de agregados moderadamente reactivos.**

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

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

#### **Región de agregados altamente reactivos.**

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

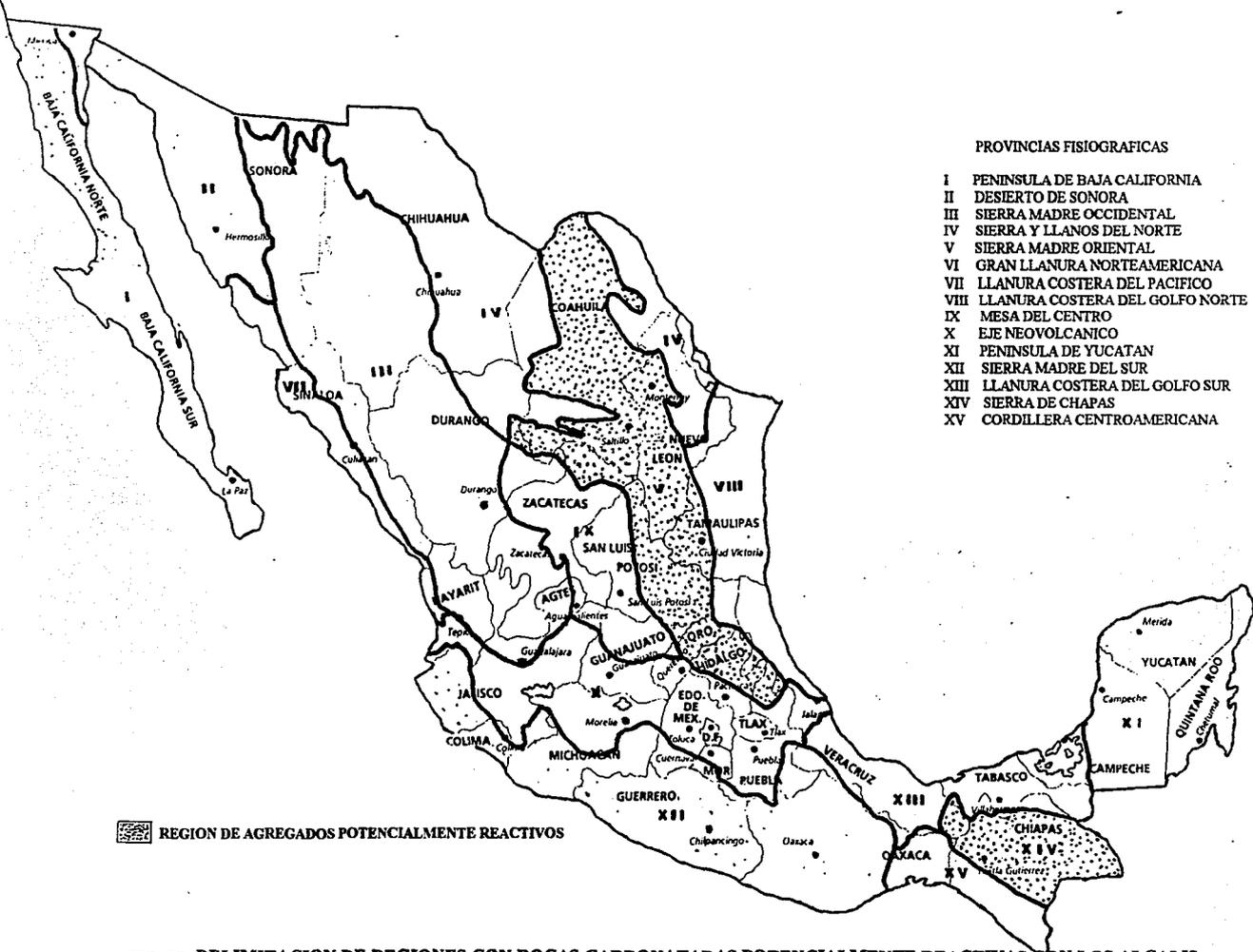


FIG. 5.3 DELIMITACION DE REGIONES CON ROCAS CARBONATADAS POTENCIALMENTE REACTIVAS CON LOS ALCALIS

---

Estas son las principales regiones donde es probable encontrar agregados potencialmente reactivos con los álcalis del cemento, en la siguiente tabla 5.40 se señalan estas rocas y su abundancia en la República Mexicana.

No se debe olvidar que para que ocurra una reacción deletérea en el concreto no basta con la sola presencia de estos agregados, sino que deben presentarse en ciertas proporciones críticas que varían en función del tipo de roca y mineral.

**ROCAS Y MINERALES QUE NORMALMENTE REACCIONAN CON LOS ALCALIS DEL CEMENTO**

Tipo de Roca	Componente Reactivo	Existencia en México
<p><b>1.- Reacción álcali-sílice</b></p> <p>Rocas que contienen ópalo, (rocas calcedónicas, calizas síliceas y pedernales, ciertas pizarras y areniscas ).</p> <p>Rocas volcánicas vítreas (riolitas, dacitas, latitas, andesitas y sus tobas, ciertos basaltos)</p> <p>Rocas de alto contenido de sílice (ortocuarzitas, areniscas, granito microcristalino (aplita), ciertos esquistos</p> <p>Grauvacas, argilitas, filitas, algunos esquistos y pizarras</p>	<p>Opalo, tridimita</p> <p>Sílice amorfa</p> <p>Cuarzo cristalino (sólo reactivo si es microcristalino o está muy deformado)</p> <p>Hidromica (illita)</p>	<p>Reducida</p> <p>Muy Frecuente</p> <p>Regular</p> <p>Regular</p>
<p><b>2.- Rocas álcali-carbonato</b></p> <p>calizas dolomíticas arcillosas y otras rocas dolomíticas</p>	<p>Dolomita meta-estable, y tal vez calcita criptocristalina</p>	<p>Regular</p>

TABLA 5.40

---

---

### CASO REAL EN MEXICO

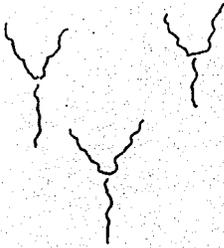
En nuestro país son pocas las estructuras en las que oficialmente se ha aceptado que han sido afectadas por la reacción álcali-agregado, a pesar de que el daño que muestran algunas de ellas evidentemente ha sido provocado por dicho proceso, y el origen del deterioro se ha atribuido de manera no oficial a dicho fenómeno. Desafortunadamente la información y experiencia que se ha obtenido en cada uno de estos casos permanece restringida, debido a que estos estudios no han sido publicados ya que permanecen con un carácter confidencial.

Nuestro caso real se trata de una estructura de concreto con una resistencia a la compresión de  $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ , el agregado grueso utilizado se obtuvo de la trituración de rocas calizas, con un tamaño máximo de 2", el agregado fino es un material de origen natural y está constituido por pequeñas gravas y fragmentos de feldespatos y una variedad de rocas ígneas principalmente de origen volcánico, el cemento empleado fue un cemento portland con un alto contenido de álcalis, se utilizó una relación agua-cemento que vario de 0.40-0.50, con un revenimiento de 5 a 10 cm.

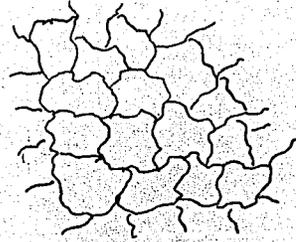
La temperatura y humedad media anual a la que está sujeta la estructura es de  $27.2^\circ \text{C}$  como máxima y una mínima de  $8^\circ \text{C}$ , con una humedad relativa en promedio del 59%.

Esta estructura se terminó de construir en 1987, y después de 3 o 4 años de tener un comportamiento satisfactorio bajo condiciones de servicio, comenzó a presentar un deterioro cuyo efecto principal se reflejó en un agrietamiento generalizado de la superficie del concreto. Presentando básicamente tres patrones de agrietamiento como se observa en la fig. 5.50.

- o Tres brazos
- o Tipo mapa (mosaico o poligonal)
- o Longitudinal



TRES BRAZOS



TIPO MAPA



LONGITUDINAL

FIGURA 5.50. TIPO DE AGRIETAMIENTO OBSERVADO EN EL CONCRETO AFECTADO.

---

Ante esta situación se tomó la decisión de realizar una serie de estudios para tratar de determinar el origen inexplicable hasta ese momento del agrietamiento.

Como el proceso de deterioro ocasionado por la reacción álcali-sílice es más complejo que otros procesos y más difícil de reconocer, no fue fácil la identificación de la reacción como el origen del agrietamiento, ya que los resultados de los primeros estudios señalaban que el agrietamiento era el resultado de tres causas "probables": daño estructural, procedimiento constructivo deficiente, y un deterioro progresivo debido a las condiciones de intemperismo a que estaba expuesta la estructura, además, los resultados nunca fueron concluyentes en cuanto al origen del agrietamiento, ya que únicamente señalaban causas probables.

En el primer estudio petrográfico realizado, se pueden observar evidencias claras de la presencia de la reacción en el concreto, como son, los bordes de reacción en el agregado reactivo, microfisuras y huecos rellenos por el gel álcali-sílice (material cristalino) como se puede observar en las fotomicrografías (anexo fotográfico 1), y cuyos resultados de acuerdo a la opinión de expertos extranjeros y nacionales no fueron interpretados correctamente.

Ante esto se contrató a un laboratorio nacional de reconocido prestigio (IMCYC) para que realizara un análisis del concreto, además se enviaron dos muestras al laboratorio de Estudios e Investigaciones de Materiales de Paris, Francia. para un estudio mineralógico. En el primero se determinó la resistencia a la compresión simple, el módulo de elasticidad del concreto, y se realizó el examen petrográfico ASTM C-856-83 "Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. En el segundo se observaron las muestras con el microscopio óptico, el microscopio de barrido electrónico (MEB) y se realizó el análisis del espectrómetro de dispersión de energía (EDS).

---

Para las pruebas de resistencia y la petrografía se obtuvieron 10 núcleos de concreto (corazones), 6 de ellos de 2" de diámetro y 4 de 4". En los ensayos de resistencia a la compresión, se ensayaron 6 núcleos de 2" cortados y cabeceados, según la norma NOM C 162, y se instrumentaron 2 núcleos con extensómetros eléctricos para obtener el módulo de elasticidad del concreto, los resultados se muestran en la tabla 5.60 y gráficas 5.70 y 5.71.

El análisis petrográfico se efectuó con el auxilio de un microscopio de luz polarizada, se obtuvieron láminas delgadas de cada núcleo, las cuales fueron revisadas con un microscopio estereoscópico según la norma ASTM C-856-83 " Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete" (anexo 1). Además se examinó la superficie del concreto con un líquido contrastante (prueba de fluorescencia) los resultados se presentan en el anexo fotográfico 3.

En estas pruebas se determinó que la resistencia a la compresión simple del concreto medida en los núcleos de 2" y 4", en ningún caso fue menor de 350 kg/cm<sup>2</sup>, siendo el valor más bajo de 361 kg/cm<sup>2</sup>. El módulo de elasticidad medido fue de :

$$Ec1 = 210,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$Ec2 = 221,000 \text{ kg/cm}^2$$

### **OBSERVACION CON EL MICROSCOPIO ESTEREOSCOPICO**

**Agregado grueso:** se obtuvo de la trituración de rocas calizas microcristalinas que ocasionalmente presentan superficies estilolíticas y microfósiles, algunos fragmentos de caliza recristalizada (mármol) y una pequeña fracción de roca volcánica de composición andesítica y de textura porfídica, que son materiales potencialmente reactivos (deletéreos) en la solución alcalina

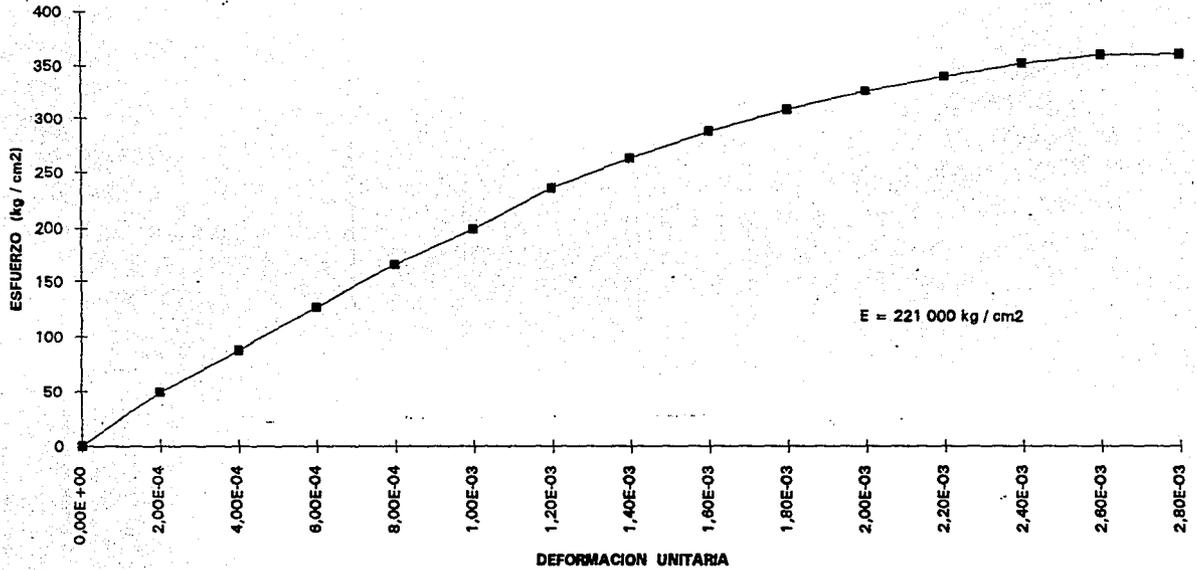
**PRUEBA DE LOS NUCLEOS DE CONCRETO**

ESPECIMEN No	DIAMETRO (cm)	ALTURA SIN CABECEAR (cm)	ALTURA CABECEADO (cm)	H/D	FACTOR DE CORRECCION	AREA (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	PESO (gr)	PESO VOL (kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MAXIMA (kg)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
M-3	5.9	11.27	11.64	1.97	0.9988	27.34	308.1	720.0	2337	9850	360
M-4	5.9	11.20	11.60	1.97	0.9988	27.34	306.2	703.2	2297	16900	617
M-5	5.9	11.30	11.65	1.97	0.9988	27.34	308.9	729.3	2361	17900	654
M-6	5.9	11.26	11.62	1.97	0.9988	27.34	307.8	707.5	2299	10420	381
M-7	5.9	11.24	11.59	1.96	0.9988	27.34	307.3	684.6	2228	13980	511
M-8	5.88	10.14	10.48	1.78	0.9988	27.34	275.3	623.2	2295	14420	526
M-9	5.88	11.27	11.62	1.98	0.9988	27.34	306.0	700.0	2288	12230	450

CURADO DEL ESPECIMEN: SIETE DIAS EN SECO DE ACUERDO A LA NOM C-169 EN VIGOR

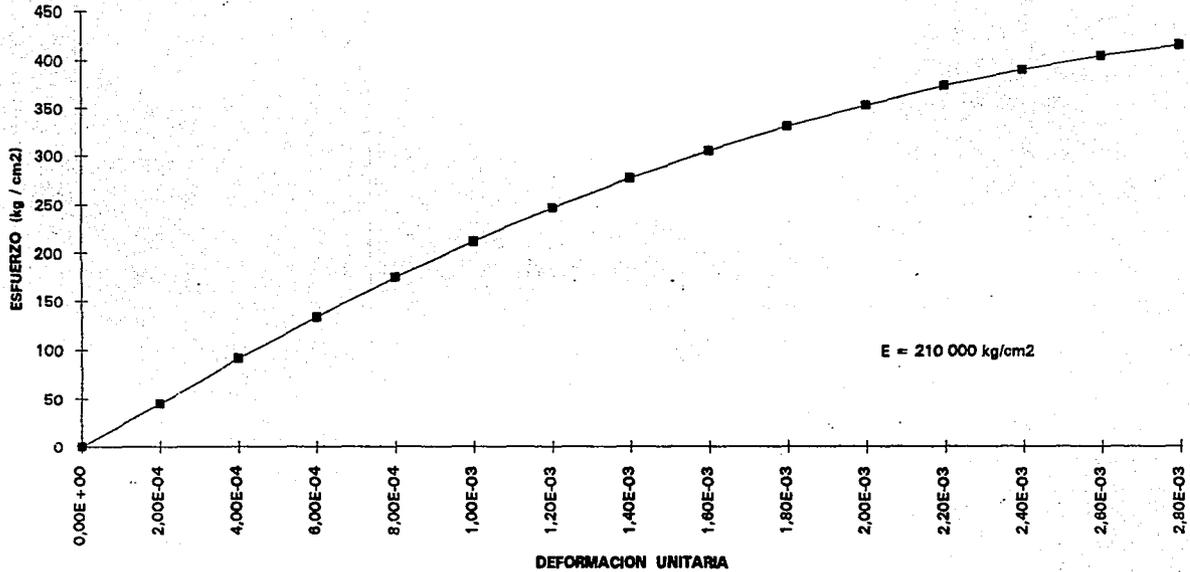
TABLA 5.60

### GRAFICA ESFUERZO - DEFORMACION



GRAFICA 5.70

### CURVA ESFUERZO - DEFORMACION



GRAFICA 5.71

---

del concreto, en muchos de los casos estos agregados presentaron bordes oscuros de hasta 1mm de espesor.

**Agregado fino:** Es un material de origen natural y está constituido por elementos como cuarzo, feldespatos, hornblenda, pómez, calcita, biotita y andesita, estos productos son de origen volcánico a excepción de la calcita, y deben ser clasificados en el caso de la andesita y la pómez como potencialmente reactivos en la solución de poro.

## **OBSERVACION CON EL MICROSCOPIO PETROGRAFICO DEL AGRIETAMIENTO**

### **Agrietamiento tipo 3 brazos**

Presentan bordes perimetrales de reacción en las rocas andesíticas, de aspecto clarificado, y asociados a estas fisuras se observaron poros mayores (aprox. 1.0 cm); esta evidencia se puede observar en el anexo fotográfico N° 2.

### **Agrietamiento tipo mapa**

Se observan abundantes bordes de reacción (clarificados) asociados íntegramente a las andesitas, pómez y tobas vítreas (todos reactivos), algunos de estos bordes se comunican con las fisuras.

Existen fisuras que comunican Agregado-Pasta-Poro, frecuentemente se observaron rellenas con un material de apariencia cristalina (el gel) ver anexo fotográfico N°2.

### **Agrietamiento longitudinal**

Se observaron con bordes de reacción (clarificado), aislado y sin asociación a fisuras y/o poros

---

En este estudio se concluyó que el agrietamiento observado en los núcleos de concreto está relacionado con la formación de geles expansivos resultantes de la reacción álcali-silice, entre ciertos agregados silíceos (la mayoría de las rocas volcánicas de la arena) y los álcalis en el concreto, se observaron las siguientes características en el concreto afectado:

- a) Presencia del gel en los huecos y fisuras, particularmente cerca de los granos reactivos.
- b) Anillos de reacción dentro de los granos afectados
- c) Grietas y microgrietas en el agregado fino reactivo, principalmente extendiéndose en la frontera del agregado y la pasta
- d) Microfisuras que afectan a la pasta

La reacción álcali-silice ha ocasionado los daños en el concreto representado por los núcleos inspeccionados. La contracción por secado de la pasta rica en cemento, contribuyó a los problemas del agrietamiento.

En la prueba de fluorescencia aplicada sobre una sección recientemente quebrada, se revela la presencia del gel álcali-silice, el cual se aprecia con un color verde brillante o líneas azules (anexo 3)

Para el estudio mineralógico, se examinaron dos probetas de aproximadamente 1.5 kg cada una; se observaron en el microscopio óptico en luz transmitida, cuatro láminas delgadas de (60 x 90mm) y en luz reflejada dos secciones pulidas, además de la observación bajo el microscopio de barrido electrónico (MEB) asociado con el análisis al espectrómetro de dispersión de energía (EDS) de diversas grietas tomadas sobre toda la altura de las probetas.

---

---

### **Determinación de la pasta de cemento:**

Los exámenes en luz reflejada indican que el cemento utilizado para la elaboración del concreto es un cemento portland tipo A (CPA), que contiene el conjunto de componentes habituales del clinker. Este cemento portland es relativamente rico en aluminato tricálcico  $C_3A$ . Este aluminato tricálcico, se presentó bajo una forma prismática que indica un contenido de álcalis nada despreciable. Esta observación es de tomarse en cuenta en el caso de la reacción álcali-sílice.

La observación al microscopio de luz polarizada muestra que la fracción de arena está compuesta de cuarzo, feldespatos alcalinos zonificados y manchados y algunos granos de biotita, fragmentos de roca microgranular cuarzosa y de rocas volcánicas básicas. Estas últimas están también presentes en la parte de la grava, que está esencialmente compuesta de roca caliza, que contiene sílice microcristalino potencialmente reactivo en la solución alcalina del concreto.

Las rocas volcánicas son del tipo andesítico esencialmente compuestas por feldespatos de plagioclasa, hornblenda y de biotita englobados en un compuesto vítreo, hay otros fragmentos que contienen además algunos granos de cuarzo que son del tipo dacítico. Estos granos están generalmente atravesados por las fisuras que afectan al concreto. Ellos forman rosarios que constituyen los nudos de la red de discontinuidad, su estructura es en general muy afectada por las fisuras (Anexo 1).

La observación en ampliación de las fisuras, muestra que están rellenas de un producto nacido de la reacción álcali-sílice, responsable del agrietamiento (Anexo 1).

La observación en el microscopio de barrido electrónico permitió precisar la naturaleza y la textura del gel expansivo. Las fotografías fueron efectuadas siguiendo los planos de las microfisuras preexistentes (zonas de fragilidad del concreto) llenas del gel.

---

Todas las probetas mostraron la presencia del gel álcali-sílice de naturaleza sílico-alcálico, donde la señal en potasio es generalmente más intensa que la del sodio.

El gel se desarrolló, al contacto con los granos vesiculares de la andesita. Dos tipos de productos de la reacción (aparición diferente) se observaron: productos cristalizados en "rosetas" (foto 5.81) por una parte y el gel amorfo agrietado (foto 5.80) por la otra. La composición elemental de los dos productos son: sílico-calcico-álcalico.

En este estudio se confirmaron los resultados anteriores de que el agrietamiento fue originado por la formación de geles expansivos de la reacción álcali-agregado. Los agregados reactivos provienen de rocas volcánicas del tipo andesítico y/o dacita que contienen feldespatos de plagioclasa, una fase vítrea y de sílices criptocristalinos potencialmente reactivos, los álcalis necesarios para la reacción provienen de una parte del cemento rico en álcalis como lo atestigua la forma prismática del aluminato tricálcico, y otra de los agregados de origen volcánico más o menos ricos en óxidos alcalinos.

---

## EXAMEN PETROGRAFICO ASTM C 856

### MUESTRA

**Identificación:** M-1

**Dimensiones:** Diámetro = 10 cm, Largo = 27 a 28 cm

**Grietas, Uniones, Poros:** No se observan uniones o juntas, grietas longitudinales o poros, numerosas grietas pequeñas orientadas perpendicularmente al corte del núcleo, se observan a todo lo largo del espécimen.

### AGREGADOS

**Grava:** Compuesta por roca caliza triturada

**Arena:** Pequeñas gravas y fragmentos de feldspatos y una variedad de rocas ígneas principalmente de origen volcánico. Las rocas volcánicas incluyendo la andesita, son potencialmente reactivas con los álcalis de la pasta, se observó una pobre cantidad de caliza.

**Graduación y Tamaño máximo**

Bien graduada y con un tamaño máximo de agregado de 2"

### PASTA DE CEMENTO

**Color:** Gris medio

**Dureza:** Moderadamente dura a duro

**Lustre:** Vítreo a subvítreo

**Hidróxido de Calcio:** 4 a 8% por volumen de pasta

**Partículas de Clinker no Hidratados:** 3 a 5%

---

**Profundidad de Carbonatación** Aproximadamente 2 a 3 mm de la superficie

**Aire Incluido:** Menor de 2%

**Depósitos Secundarios:** Cristales de etringita y gel álcali-silice son abundantes, en vacíos o microfisuras particularmente cercanas a agregados reactivos, rastros de portlandita ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) son observados en pequeños poros y grietas.

**Microfisuras:** Las microfisuras son abundantes en la pasta de todo el corazón, algunas son largas y orientadas paralelamente al corte del núcleo, otras microgrietas tienen orientación irregular, las microgrietas están comúnmente dentro del agregado reactivo y se extienden rodeando la unión pasta agregado.

**Relación Agua-Cemento Estimada:** 0.40 a 0.45 para la muestra 1  
0.45 a 0.50 para la muestra 2

**ANEXO FOTOGRAFICO No 1**



x 1 250

FIG. 5.80 GEL AMORFO AGRIETADO  
MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO



x 1 250

FIG. 5.81 PRODUCTOS CRISTALIZADOS EN ROSETAS  
ES PROBABLE QUE SE DESARROLLEN DEL GEL AMORFO



x15

DETALLE DE FOTOGRAFIA ANTERIOR

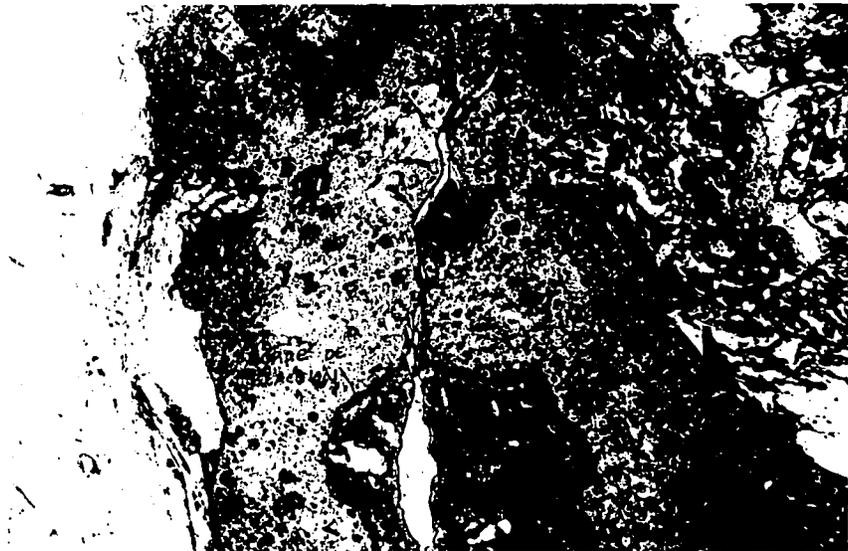


Foto 1. Borde de reacción asociado a fisura y rodeando agregados.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-20-12.

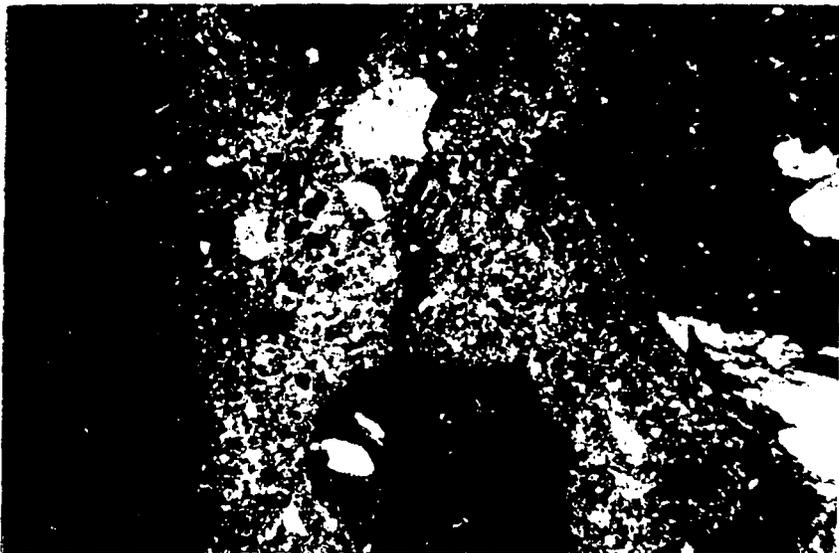


Foto 2. Repetición de la foto 1 con luz polarizada (NX).

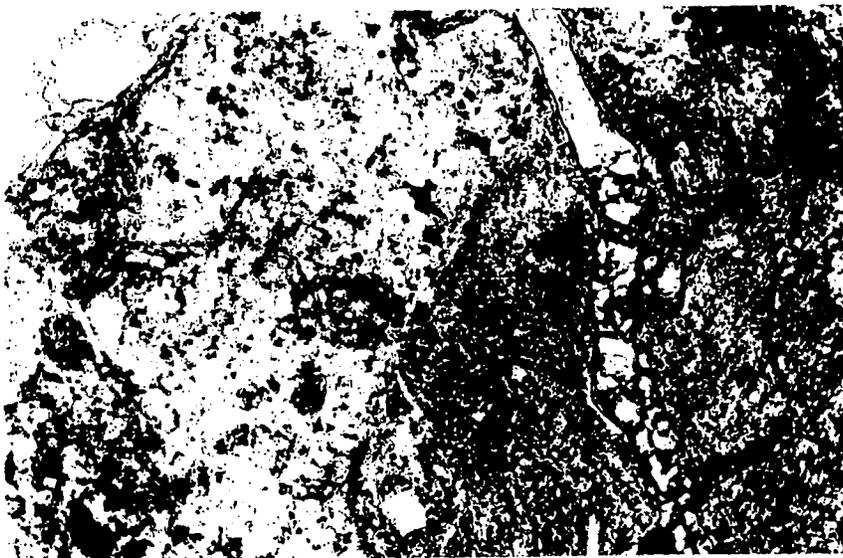


Foto 3. Microfisura con relleno de aspecto cristalino en la pasta.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-20-12.



Foto 4. Microfisuras con relleno de aspecto cristalino en la pasta.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-20-12.

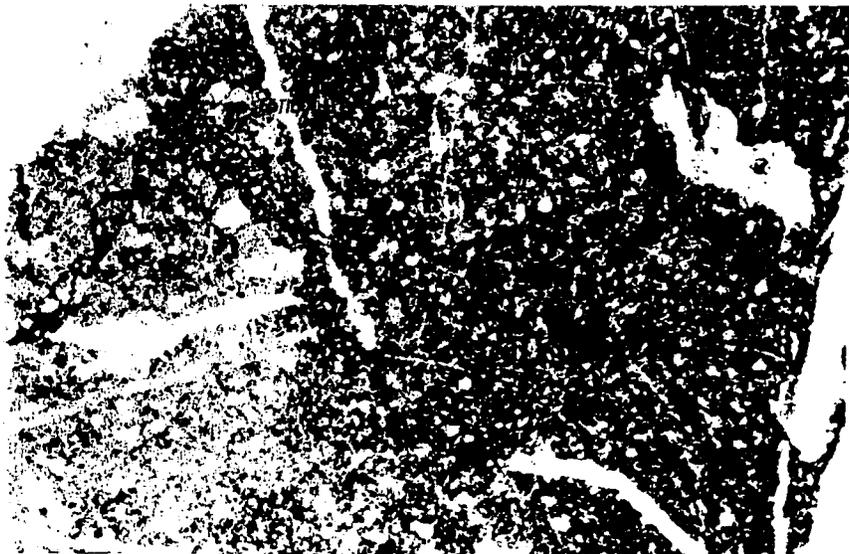


Foto 5. Superficie estilolítica con relleno de minerales arcillosos en una caliza microcristalina.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-26-23.



Foto 6. Poro de forma irregular en contacto con material reactivo. Observación con Luz Paralela. Muestra II-26-23.



Foto 7. Fisuramiento asociado a poros.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-26-23.

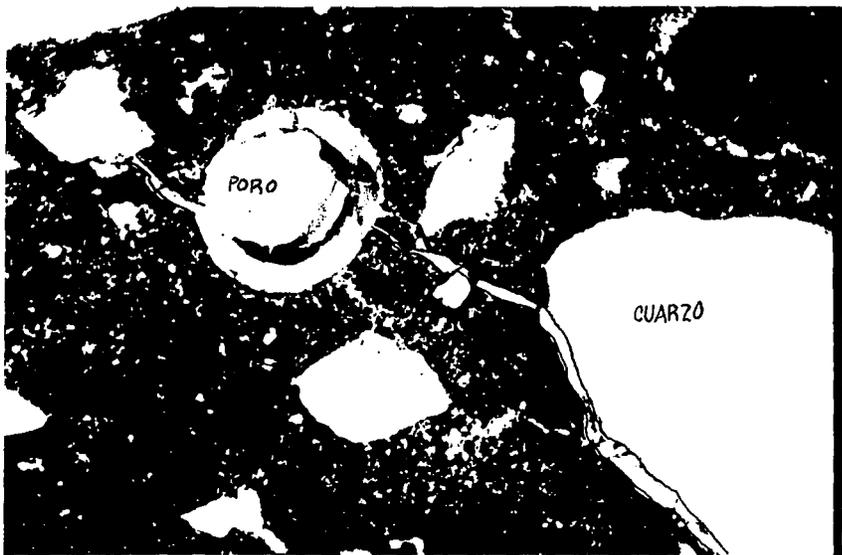


Foto 8. Fisura afectando pasta y comunicando agregado con poro. La fisura rodea parcialmente al agregado y está rellena de un material de aspecto cristalino.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-23-19.

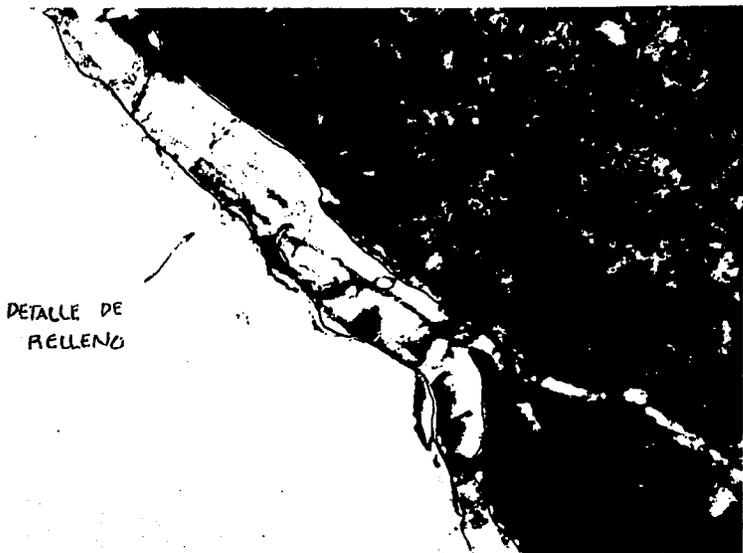


Foto 9. Detalle del relleno de la fisura de la  
foto 8.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-23-19.

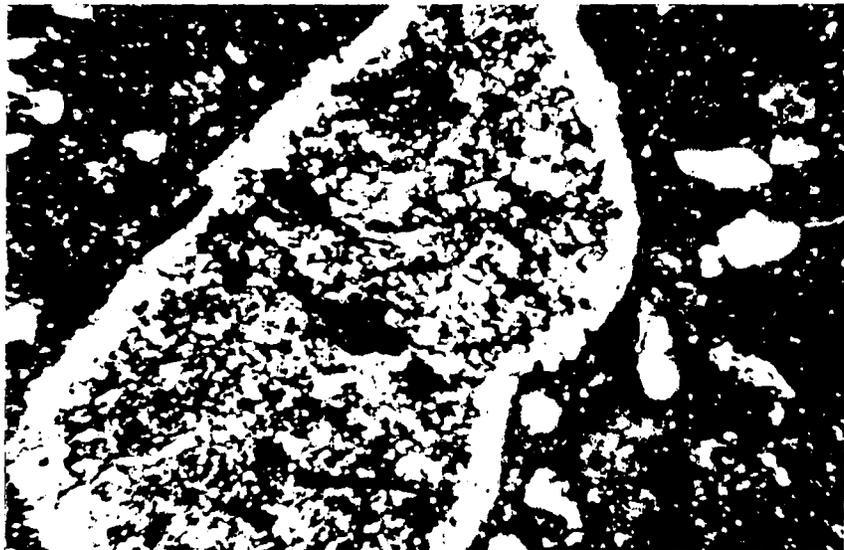


Foto 10. Borde de reacción clarificado en toba andesítica.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-23-19.

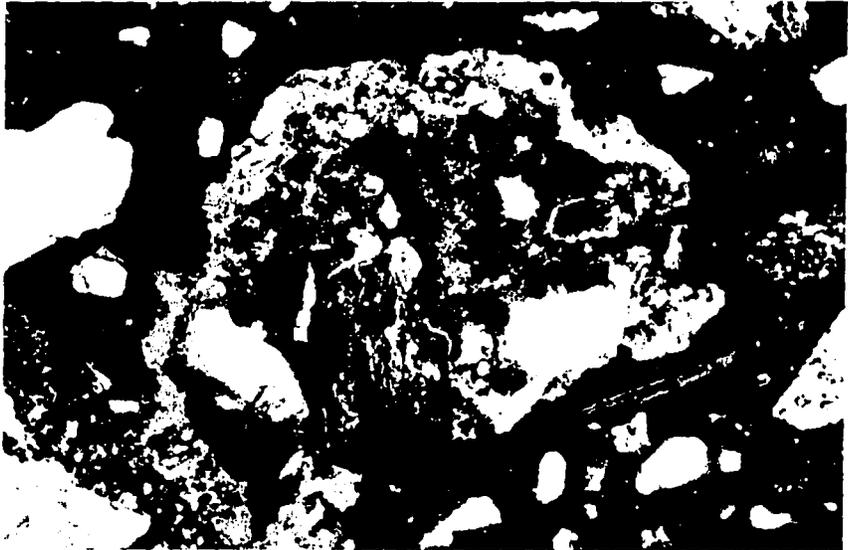


Foto 11. Borde de reacción clarificado en toba  
vítrea.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-23-19.

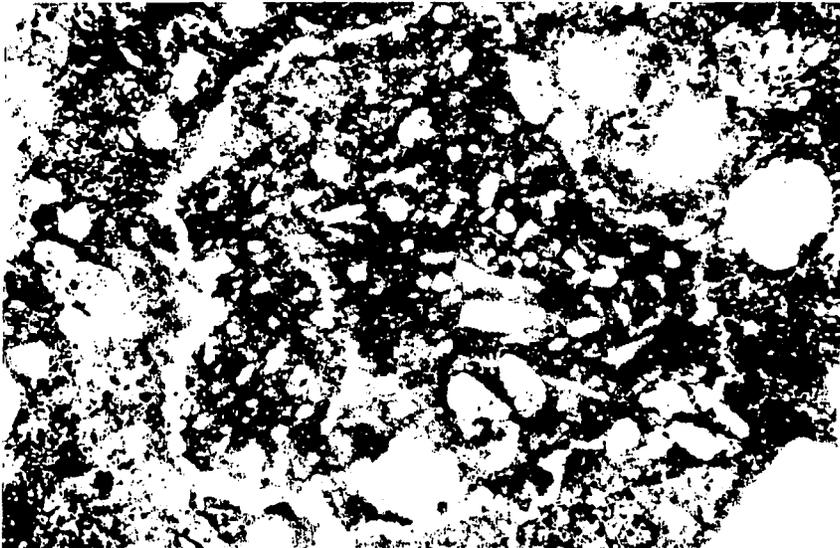


Foto 12. Borde de reacción clarificado en toba vitrea.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-18-11.

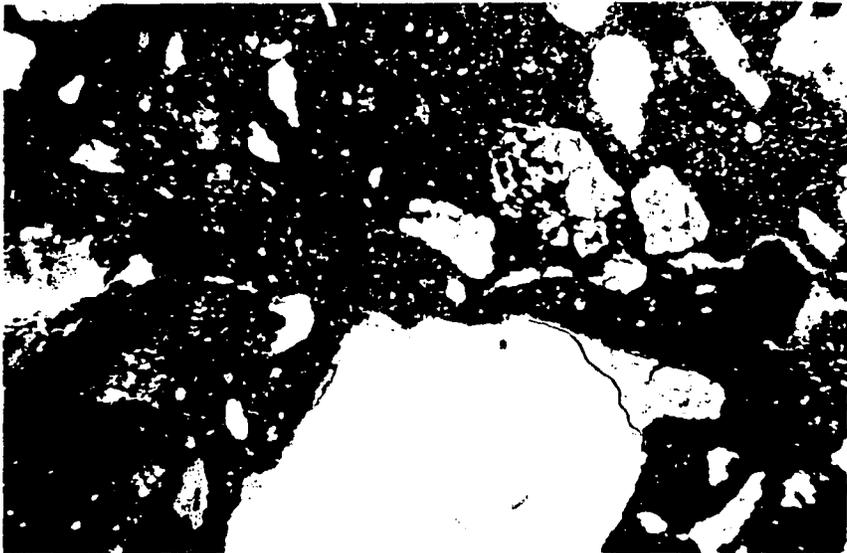


Foto 13. Sobrecrecimiento en cristal de cuarzo  
y fisura rodeando agregados.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra I-9-11.



Foto 14. Repetición de la foto 13.  
Observación con Luz Polarizada.  
Muestra I-9-11.



Foto 15. Borde de reacción clarificado en material potencialmente reactivo. Observación con Luz Paralela. Muestra I-9-11.

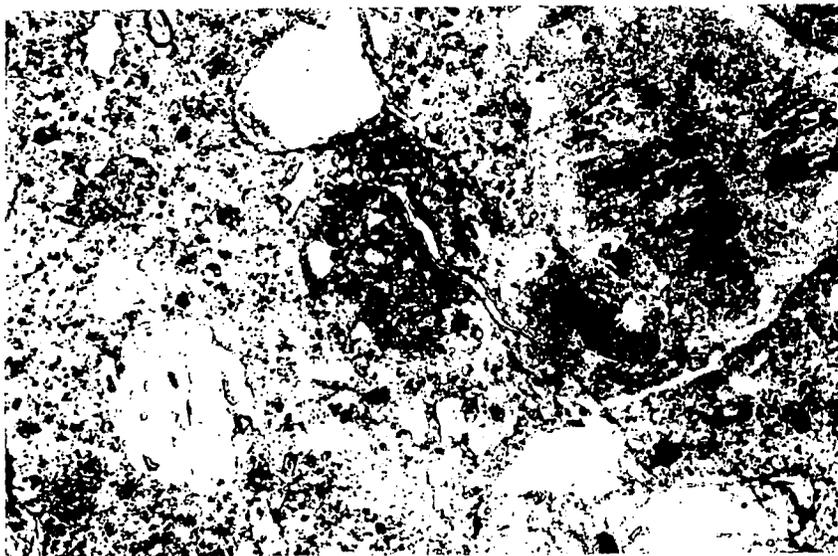


Foto 16. Fisura atravesando material reactivo y  
con relleno cristalino.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-18-11.

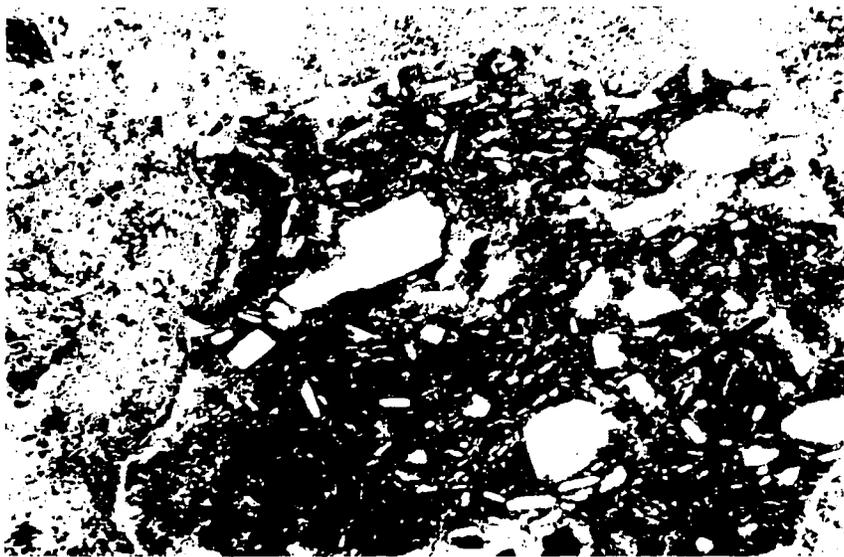


Foto 17. Borde de reacción incipiente.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra I-9-11.

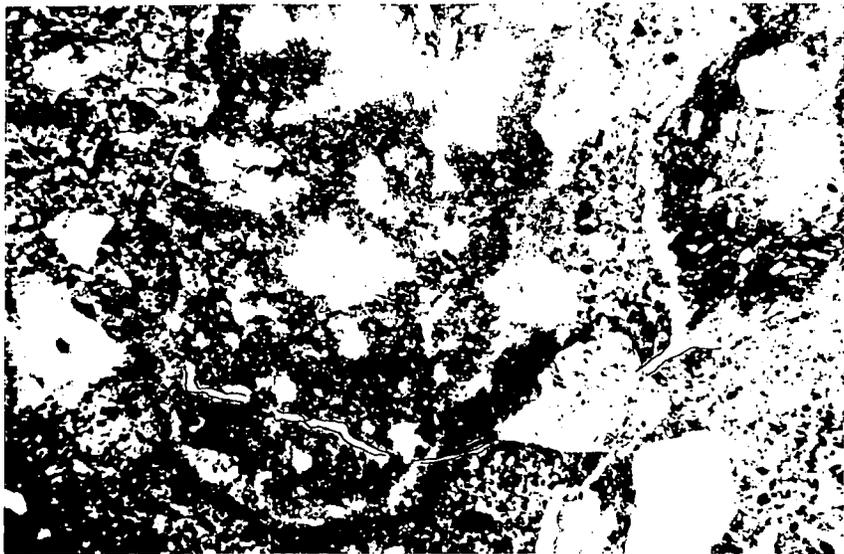


Foto 18. Fisura afectando agregado y pasta asociada a borde de reacción. Observación con Luz Paralela. Muestra I-6-5.

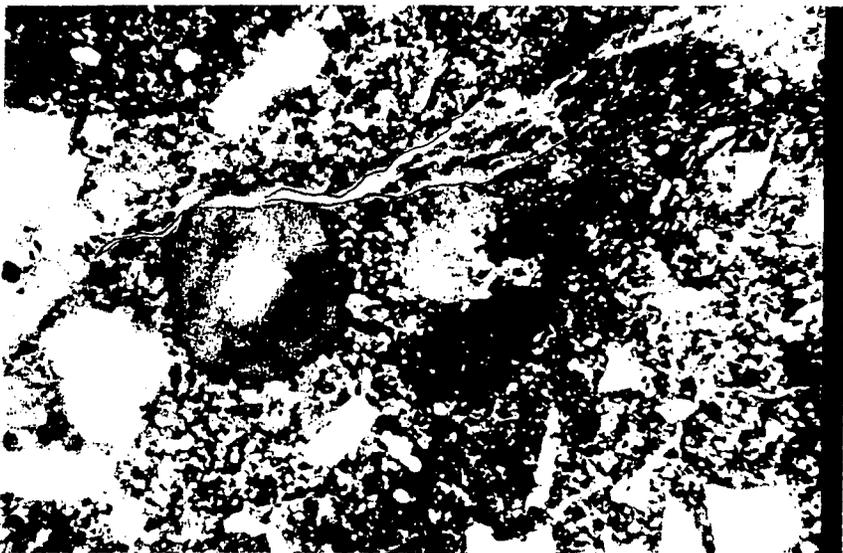


Foto 19. Fisura sin relleno, afectando pasta y agregado.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra I-6-59.

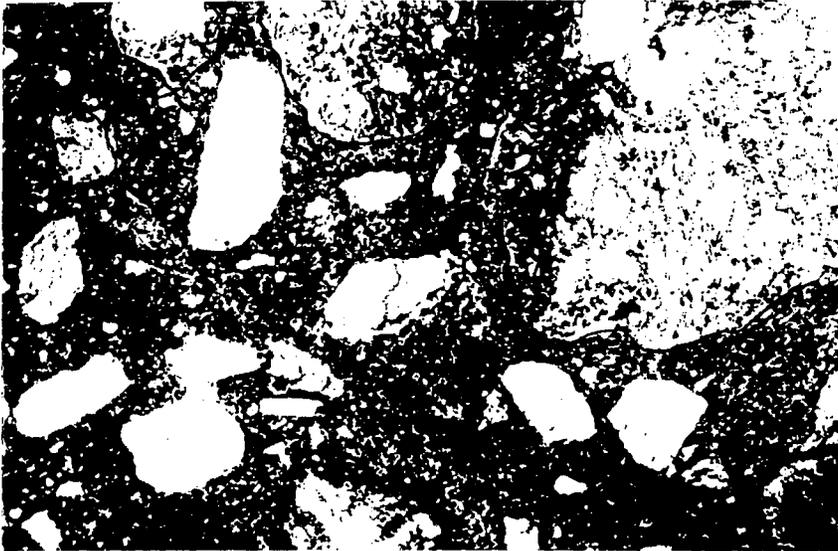


Foto 20. Bordos de reacción múltiples en asociación con agregados reactivos. Observación con Luz Paralela. Muestra II-18-11.

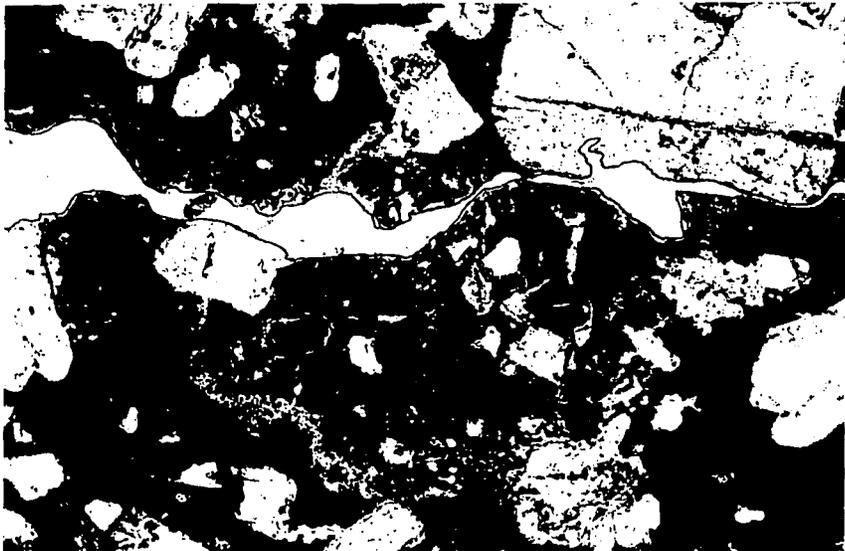


Foto 21. Fisura sin relleno, en pasta y rodeando agregados.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-3-3.



Foto 22. Repetición de la foto 21.  
Observación con Luz Polarizada.  
Muestra II-3-3.

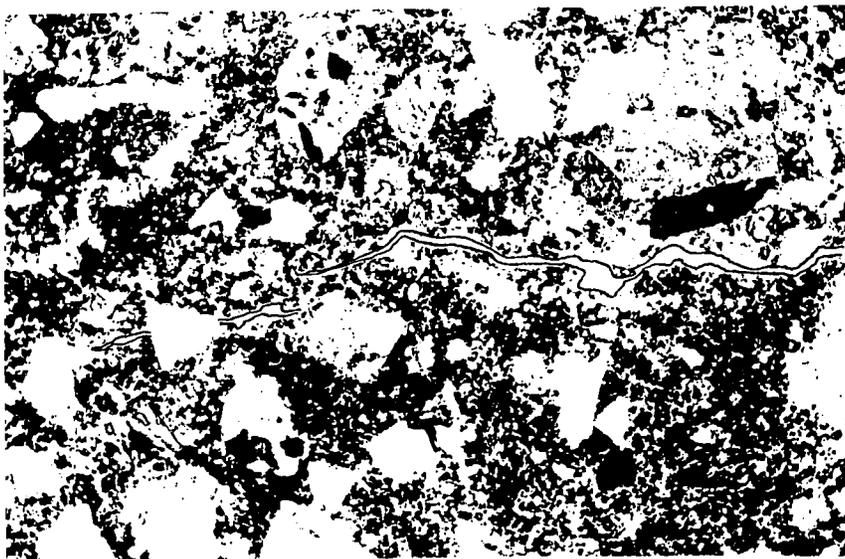


Foto 23. Fisura continua sin relleno.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-3-3.

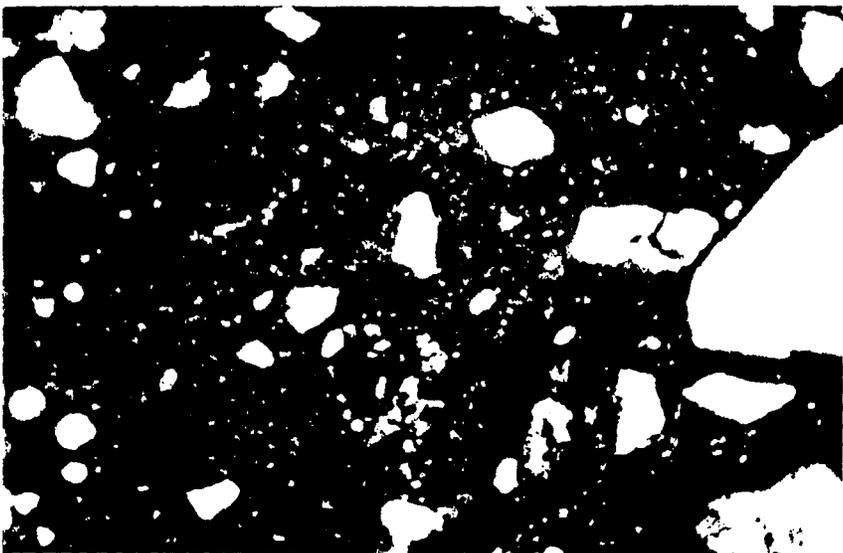
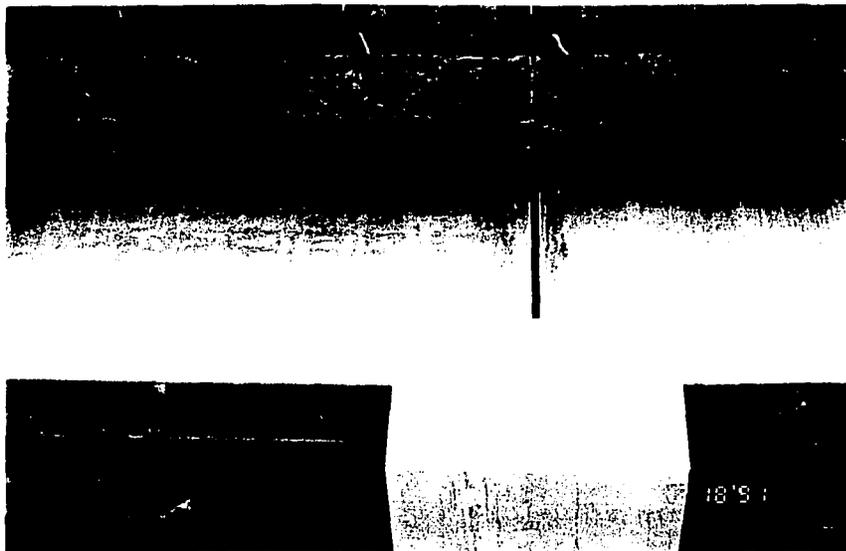


Foto 24. Material sano sin poros , ni bordes,  
ni fisuras.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-20-13.



Foto 23. Borde de reacción en toda vítrea y  
poro asociado.  
Observación con Luz Paralela.  
Muestra II-20-13.

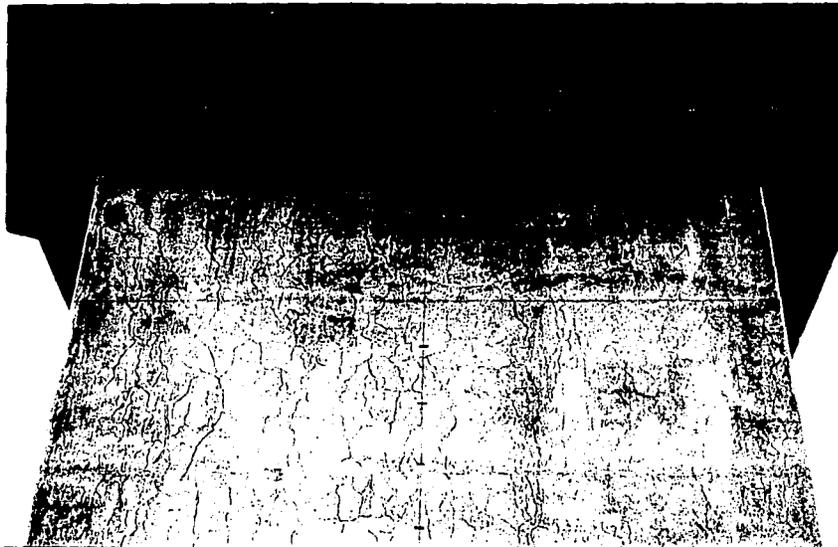
## **ANEXO FOTOGRAFICO No 2**



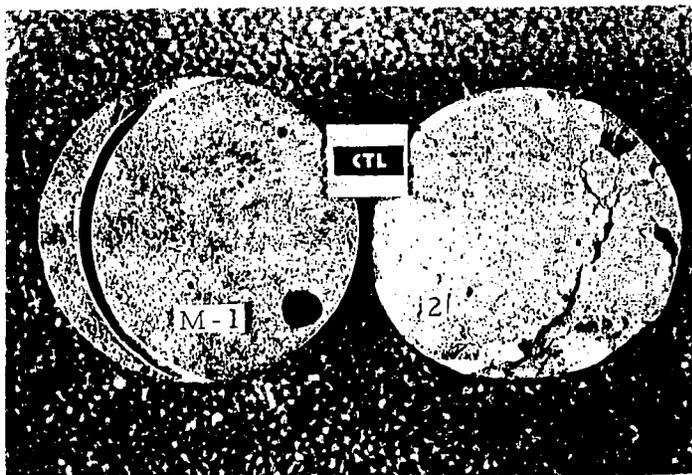
FOTOGRAFÍA 1.- TRABES DE CONCRETO PRESFORZADO  
SIN FISURAMIENTO APARENTE.



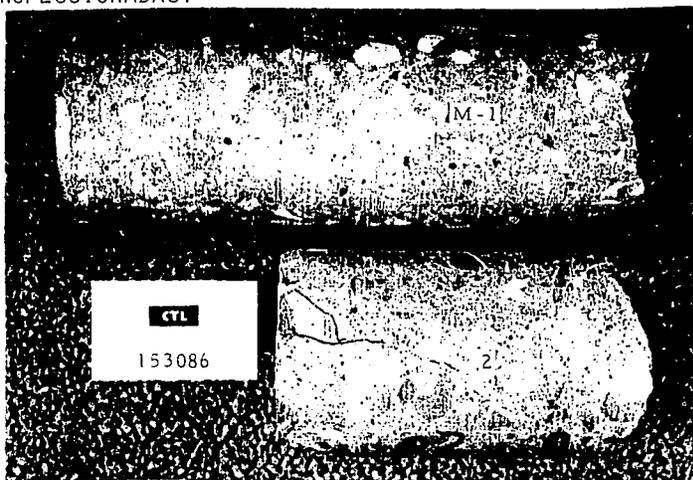
FOTOGRAFÍA 2.- PARTE SUPERIOR DE LA PILA, FISURAS  
SIN ORIENTACIÓN DEFINIDA.



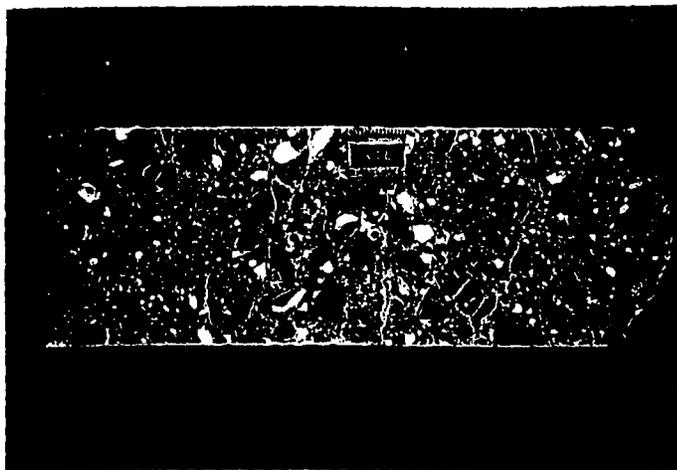
FOTOGRAFÍA 3.- SE OBSERVA UNA MAYOR DENSIDAD DE FISURAS EN LAS PARTES SUPERIORES DE LAS PILAS Y LOS CABEZALES.



FOTOGRAFÍA 4.- VISTA DE LA SUPERFICIE DE LAS MUESTRAS INSPECCIONADAS.



FOTOGRAFÍA 4A.- VISTA LATERAL DE LA SUPERFICIE DE LAS MUESTRAS.

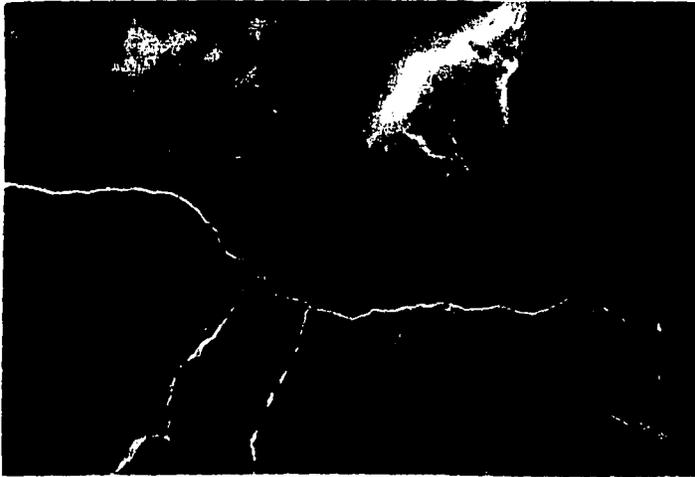


FOTOGRAFÍA 5.- CORTE LONGITUDINAL DE LAS MUESTRAS. MUESTRAN GRIETAS ATRIBUIBLES A LA EXPANSIÓN DE LA REACCIÓN ALCALI-AGREGADO, CADA NÚCLEO FUE REVISADO CON LÁMPARA ULTRAVIOLETA. LAS GRIETAS POR EXPANSIÓN ALCALI-AGREGADO APARECEN DE COLOR VERDE BRILLANTE O LÍNEAS AZULES.



FOTOGRAFÍA 6.- FOTO TOMADA EN EL MICROSCOPIO DE 2  
ÁREAS DONDE LAS LÍNEAS DE COLOR VERDE O AMARILLO  
FUERTE, MUESTRAN LAS MICROGRIETAS DENTRO DEL MATERIAL  
REACTIVO (A) Y RODEANDO LA PASTA (B).

0.70



FOTOGRAFÍA 6'.- FOTO TOMADA EN EL MICROSCOPIO DE 2  
ÁREAS DONDE LAS LÍNEAS DE COLOR VERDE O AMARILLO  
FUERTE, MUESTRAN LAS MICROGRIETAS DENTRO DEL MATERIAL  
REACTIVO (A) Y RODEANDO LA PASTA (B).



FOTOGRAFÍA 7.- SECCIÓN DEL NÚCLEO 2, MUESTRA EL GEL ALCALI-SÍLICE (FLECHA ROSA) LÍNEAS O MICROGRIETAS, LAS CUALES SE EXTIENDEN DEL AGREGADO REACTIVO HACIA EL BORDE DE LA PASTA O MATRIZ.



FOTOGRAFÍA 8.- VISTA MICROSCÓPICA DE LA SUPERFICIE  
PULIDA DEL NÚCLEO 2, MUESTRA UN BORDE DE REACCIÓN  
ALCALI-AGREGADO (FLECHA VERDE) EN UN GRANO DE PIEDRA  
VOLCÁNICA.

---

## CONCLUSIONES

El agrietamiento que sufre el concreto puede ser generado por causas externas o internas. el daño provocado por efectos externos presenta manifestaciones localizadas en la estructura, esto permite su rehabilitación, mediante la reparación de las zonas afectadas, o eliminando el agente externo de deterioro. Mientras que el daño que se inicia en el interior del concreto tiende a manifestarse en forma generalizada, por lo tanto, las reparaciones que se realizan no son definitivas, ya que únicamente funcionan como paliativos que buscan prolongar la vida útil y restituir la apariencia de la estructura.

Ante esta situación, aunque las estructuras afectadas por factores intrínsecos no son muy comunes, esta tienen efectos técnicos y económicos más importantes, ya que generalmente reducen la vida útil de la estructura.

La reacción álcali-agregado inicia desde que los agregados entran en contacto con la solución alcalina del concreto, pero esta evoluciona lentamente al inicio, por lo que pasa prácticamente desapercibida, pero si las condiciones en el interior del concreto son favorables la reacción continua evolucionando. En la mayoría de los casos que se conocen, una vez que se ha iniciado la reacción y se han manifestado sus efectos (agrietamiento), lo más probable es que ésta continúe desarrollándose, con el consiguiente deterioro del concreto. Sin embargo, como este proceso de deterioro es muy lento no provoca una falla súbita de la estructura, y al mismo tiempo permite hacer el seguimiento de su estado con el objetivo de programar los trabajos de reparación que busquen prolongar la vida de la estructura, ya que actualmente no se conocen medidas definitivas para detener el proceso de la reacción.

---

La reacción álcali-agregado muestra una incompatibilidad entre el cemento y los agregados. Los productos formados por esta reacción crean acciones internas que pueden provocar la microfisuración del concreto

Los factores principales que gobiernan la reacción son: naturaleza, tamaño y cantidad de partículas silíceas reactivas, contenido de álcalis del cemento, así como el contenido de cemento en el concreto, cantidad de álcalis que pueden ser lixiviados de los agregados, fuentes externas de álcalis y condiciones ambientales (humedad y temperatura)

Lo que provoca que este fenómeno sea poco común y más complejo que otros procesos de deterioro, es que la reacción álcali-agregado es más difícil de identificar, y que después de que se ha manifestado (agrietamiento), provee un medio para que otras causas de deterioro se desarrollen, quedando esta en segundo término con respecto a la importancia del deterioro.

Las propiedades mecánicas del concreto que resultan afectadas por la reacción son principalmente la resistencia a la compresión, a la tensión y el módulo de Young

Como los álcalis pueden ser aportados por fuentes diferentes a la del cemento (agregados, agua, aditivos, sal del deshielo, puzolanas etc.), el contenido de álcalis se debe evaluar en la mezcla del concreto, de acuerdo con las proporciones y sus respectivos contenidos de álcalis.

La mayoría de los agregados empleados en la fabricación del concreto contienen alguna forma de sílice reactiva, ya sea como componente primario o secundario, por lo que el riesgo de que reaccionen en el medio alcalino del concreto no debe dejar de tomarse en cuenta.

Una forma de sílice reactiva es un requisito fundamental para que la reacción se desarrolle. El volumen para que se produzcan efectos deletéreos es muy pequeño, ya que en algunos casos se

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

---

han reportado del 2%. Para que un agregado reaccione con la solución alcalina del concreto se requiere que se cumplan dos requisitos: debe contener alguna forma de sílice reactiva, y ésta se debe presentar en una proporción (pésima) adecuada para causar la reacción.

La humedad es un factor muy importante en el desarrollo de la reacción, ya que funciona como agente excitador y de transporte de los álcalis en la etapa de formación del gel. En el proceso de expansión el gel absorbe la humedad (interna y/o externa) por lo cual se dilata generando presiones internas en el concreto que son capaces de agrietarlo. Por esto, todas las medidas de protección tienden a impedir el acceso de humedad al concreto, para tratar de retrasar las expansiones que pueden afectar al concreto.

El hecho de que participen un gran número de factores hace que la detección sea extremadamente difícil. Muchos de los factores mencionados anteriormente pueden controlarse, sin embargo, la importancia del medio ambiente juega un papel fundamental.

Son muchos los métodos de detección que se utilizan actualmente, pero ninguno de ellos garantiza por sí mismo los resultados. En el estudio realizado se observó que el método Químico ASTM C-289 no es confiable, ya que de acuerdo con los resultados obtenidos en dos estudios de estructuras que han sido afectadas por este proceso de deterioro, se señalaba en ambos casos que los agregados pétreos estudiados con dicha prueba eran inocuos para la reacción álcali-agregado. Ante esto y con la experiencia internacional que se tiene en esta prueba, se recomienda que este método no debe ser concluyente en sus resultados, o que deje de utilizarse como una prueba de rutina, como ha sucedido en varios países.

Debe señalarse que ninguno de los métodos disponibles actualmente para el diagnóstico de la reactividad de los agregados a la reacción álcali-sílice garantiza por sí sólo seguridad en la detección de los materiales deletéreos, por lo que es aconsejable, que por un lado se hagan

---

estudios de carácter general para identificar zonas en las que los materiales tengan altas probabilidades de ser reactivos, y que por otra parte, cuando vaya a construirse una obra importante en una de esas zonas sea aconsejable estudiar los agregados bajo varios métodos de prueba.

En México al igual que en los países desarrollados la industria de la construcción se debe encaminar hacia el uso de los "Concretos de alto Comportamiento" para las estructuras que son esenciales para el desarrollo de país, reservando el uso del concreto tradicional (artesanal) para las casas habitación.

Se define como concretos de alto comportamiento aquellos que además de alcanzar una mayor resistencia garantizan una mayor durabilidad de la estructura, y mejoran otras propiedades características del concreto que determinan un mejor comportamiento del material ante las acciones exteriores, tanto mecánicas como climáticas.

Los concretos de alto comportamiento se obtienen de diversas maneras entre las que se pueden señalarse la reducción de la relación w/c recurriendo al uso de aditivos superfluidificantes o la inclusión de cenizas volantes o productos de escorias o humos de sílice, que sellan los poros entre agregados y cemento, aumentando la compacidad, la impermeabilidad y la resistencia. Este tipo de agregados de muy pequeño tamaño sella también el paso de la humedad y en consecuencia puede reducir el peligro de que se desencadene la reacción álcali-sílice.

---

---

## MEDIDAS DE REPARACION

El comportamiento de las estructuras de concreto afectadas por la reacción álcali-agregado es diferente al que presentan las estructuras afectadas por causas externas, por eso, las técnicas de reparación que se utilizan en estas estructuras no han sido adecuadas para el concreto afectado por la reacción álcali-agregado.

Las técnicas de reparación que se utilizan actualmente se basan en los requisitos básicos para inhibir la reacción, que consisten en eliminar el suministro de humedad del exterior, la cual es esencial para que la reacción continúe, para este propósito se inyectan o rellenan las grietas dependiendo del ancho de estas con un recubrimiento hidrófugo, de modo que restrinja la penetración del agua del exterior pero que no impida la salida del agua por evaporación hacia el exterior, así la estructura se encuentra recubierta con materiales que le proporcionan aislamiento del agua, sin embargo, cuando la reacción se ha iniciado, el efecto de impedir el acceso del agua del exterior no funciona adecuadamente, debido a que la humedad en el interior del concreto puede ser suficiente para que la reacción continúe.

---

## RECOMENDACIONES

### REACCION ALCALI-SILICE

El primer paso que debe tomarse en el caso de la Reacción álcali-silice, es la de cambiar el banco de los materiales por otro cuyos agregados no sean reactivos, la sustitución parcial de agregados reactivos por los no reactivos no reduce el riesgo de que ocurra la reacción. Al hacer el estudio económico del cambio de banco de materiales, deberá considerarse en contrapartida el costo que ocasionaría las medidas preventivas, si después de evaluar las alternativas no resulta factible el cambio de banco de materias, las medidas preventivas se enfocan a limitar el contenido de álcalis en el concreto y a restringir el acceso del agua externa al concreto.

Se deberán utilizar relaciones w/c bajas, empleando, aditivos reductores del agua, para reducir al mínimo el contenido del agua de mezclado. El cemento debe poseer un bajo contenido de álcalis 0.6% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , el contenido total de álcalis en el concreto no debe exceder de 2.5  $\text{Kg/m}^3$  de concreto.

Uso de cenizas volantes, puzolanas o escoria de alto horno para reducir el consumo de cemento, estos materiales están constituidos principalmente por sílice reactiva con los álcalis su inclusión en el concreto incrementa el contenido de sílice reactiva, rebasándose así el intervalo pésimo y reduciendo la expansión.

Los materiales antes citados, son altamente reactivos, de modo que si se utilizan como agregado grueso pueden dar lugar a expansiones muy fuertes, pero molidos a una finura igual o mayor a la del cemento y si forman parte del concreto de manera homogénea el efecto es contrario.

# MEDIDAS DE PROTECCION

En la mezcla de concreto

En el concreto endurecido

Medidas preventivas menores

Medidas preventivas mayores

-Utilizar relaciones bajas de w/c

-Utilizar aditivos reductores de agua

-Considerar una resistencia moderada de proyecto del concreto ( $f'c$ )

-Disponer en obra de los medios necesarios para lograr una buena uniformidad en la resistencia, con el objeto de reducir el margen de seguridad ( $fcr - f'c$ ) necesaria para cumplir las especificaciones

-Utilizar cementos con bajo contenido de álcalis menor del 0.6 %

-Limitar el contenido total de álcalis en la mezcla de concreto menor de 2.5 kg/m<sup>3</sup>

-Incorporar al concreto materiales que puedan inhibir la reacción (aditivos puzolánicos)

- a) escoria de alto horno
- b) humo de sílice
- c) ceniza volante

Impermeabilización de la estructura

Cualquier medida de protección que impida el acceso del agua al interior del concreto puede, sino evitar la reacción, por lo menos retardar las manifestaciones de la expansión.

---

La reacción álcali-agregado, como toda reacción tiene lugar preferentemente sobre los materiales reactivos más finos (que por ser lo, son precisamente más activos), los cuales al encontrarse homogéneamente distribuidos en la masa del concreto. En tales condiciones, la reacción expansiva se desarrollará en muchos puntos de la masa material, y como se encuentran distribuidos uniformemente, la intensidad de la reacción en cada uno de ellos es muy débil, en estas condiciones el concreto tiene posibilidad de resistir las tensiones internas que se generan.

### REACCION ALCALI-CARBONATO

Al utilizar agregados de carbonato que puedan reaccionar con los álcalis del concreto, las medidas preventivas que se recomiendan son:

- 1) Emplear gravas cuyo tamaño máximo sea lo más reducido posible.
- 2) Limitar a un 20% del contenido del material reactivo en el agregado grueso, o de 15% entre el agregado grueso y el fino.\*
- 3) Utilizar un cemento con un bajo contenido de álcalis 0.4% de  $\text{Na}_2\text{O}$
- 4) Como una medida complementaria, también es recomendable la impermeabilización del concreto con un impermeabilizante hidrófugo.

\* Esta condición se puede lograr mezclando el agregado reactivo con otro que sea inocuo.

\* Proteger a la estructura contra el acceso de la humedad, colocando una barrera que impida el acceso de ésta.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- Graham West and Sibbick G. " Mechanism for Alkali-Silica Reaction in Concrete Roads". 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. Kyoto, Japan, 1989. pp. 95-100.
- 2.- Swamy, R.N. " The Alkali-Silica Reaction in Concrete". Blackie Glasgow London, First published, 1992, 332 pp.
- 3.- Swamy, R.N, and Al-Asali, M.M., "Influence of Alkali-Silica Reaction on the Engineering Properties of Concrete." Alkalies in Concrete, ASTM publ. STP-930, 1985, pp 69-86.
- 4.- Dent-Glasser, L:S and Kataoka, N. "The Chemistry of Alkali-Aggregate Reaction". Fifth International Conference on Alkali-Aggregate Reactions, 1981, pp. 66.
- 5.- Dent-Glasser, L:S. "Osmotic Pressure and The Swelling of gels.". Cement Concrete, 1979, pp. 515-517.
- 6.- Flanagan, J.C; "Alkali-Aggregate Reaction: Practical Preventive and Remedial Measures", 5th. International Conference on Alkali-Aggregate Reaction art. S 252/17, Cape Town, 1981, Africa del Sur.
- 7.- Hobbs, D.V; "Expansion Due to Alkali-Silica Reaction and the Influence of Pulverized fuel Ash"; 5th International Conference, Cape Town, Africa del Sur, 1981, S 252/30.
- 8.- Jones, F.E , and Tarleton, R.D "Reaction Between Aggregates and Cement". National Building Research, paper 25, 1958, London.
- 9.- Palmer, D; "Alkali-Aggregate Reaction - Recent Occurrences in the British Isles", Effect of Alkalies in Cement and Concrete, 4Th International Conference, Purdue University, USA, June 1978, pp. 285-298.
- 10.- Ono, K; "Damaged Concrete Structures in Japan due to Alkali-Silica Reaction", International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 10, No4, Nov. 1988, pp.247-257.
- 11.- Dahms, J; "Influence of the Alkali-Aggregate Reaction Under Field Conditions", The Effect of Alkalies on the Properties of Concrete, Proc. of Symposium, London, 1976, pp. 277-290.
- 12.- Arumagasamy, P; and Swamy, R.N; "Moisture Movements in Reinforced Concrete Columns." II Cement, Vol. 3, 1978, pp 121-128.

- 13.- R. Pleau, M.A. Bérubé, M. Pigeon. "Mechanical Behavior of Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction". 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Kyoto, Japan, 1989, pp 721-726.
- 14.- Bligh, G.E, McIver, J.R; "The Effects of Alkali-Aggregate Reaction in Reinforced Concrete Structures made with Witwatersrand Quartzite Aggregate". 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Cape Town, 1981, pp S252/15.
- 15.- Stark, D; "Alkali-Silica Reactivity in the Rocky Mountain Region", Effect of Alkalies in Cement and Concrete, 4th International Conference, Purdue USA, 1978, pp. 229-234.
- 16.- Mehta, P.K; "Effect of Chemical Additions on the Alkali-Silica Reaction". Effect of Alkalies in Cement and Concrete. 4th International Conference, Purdue USA, 1978, pp 240-250.
- 17.- Visresvaraya, H:C Rajkumar, C; and Mullick, A.K "Analysis of Distress due to Alkali-Aggregate Reaction in Gallery Structures of a Concrete Dam", Concrete Alkali-Aggregate Reactions 7th International Conference, Ottawa, Canada, 1986, pp. 188-193.
- 18.- Swamy, R.N, and Al-Asali, M.M., "Alkali-Silica Reaction- Sources of Damage", Highways and Transportation, Vol. 35, No12, 1988, pp. 24-29.
- 19.- Swamy, R.N, and Al-Asali, M.M. " Influence of Alkali-Silica Reaction on the Engineering Properties of Concrete" Alkalies in Concrete, ASTM . STP-930, 1985, pp. 90-100.
- 20.- Swamy, R.N, and Al-Asali, M.M. "Expansion of Concrete due to Alkali-Silica Reaction", ACI Material Journal, Vol. 85, No1, Jan-Feb. 1988, pp. 33-40.
- 21.- Hobbs, D; "Alkali-Silica Reaction in Concrete. Structural Engineer", 62A, 1986, 26-34.
- 22.- Hobbs, D; "Some Tests on Fourteen year old Concrete Affected by the Alkali- Silica Reaction". 7th. International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Ottawa, Noyes, 1987, pp. 367-374.
- 23.- Swamy, R.N, "Alkali- Silica Reaction and Concrete Structures", Structural Engineering Review, Vol. 2, 1990, pp. 89-103.
- 24.- Swamy, R.N, "Structural Implications of Alkali-Silica Reaction". 8th International Conference, Kyoto, Japan, 1989, pp. 683-689.
- 25.- Kobayashi, Kazusuke and Shiraki Ryouji; "Influence of Alkali Concentration Distribution Occurring in Concrete Members on Expansion and Cracking due to Alkali-Silica Reaction". 8th International Conference, Kyoto, Japan, 1989, pp.641-646.
- 26.- Grattan- Bellew, P.E " High Undulatory Extinction in Quartz Indicative of Alkali-Expansivity of Granitic Aggregates". 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Noyes Pub. Park Ridge, New Jersey, USA, 1987, pp. 434-439.

- 27.- Natesaiyer, K; and Hover, K.C, "Insitu Identification Of Alkali-Silica Reaction Products in Concrete". Cement Concrete Res; 18, 1988, pp. 455- 463.
- 28.- Natesaiyer, K; and Hover, K.C."Some Field Studies of the New Insitu Method of Identification of Alkali-Silica Reaction Products".8th.International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, 1989, Society of Materials Science, Kyoto, Japan.
- 29.- Natesaiyer, K; and Hover, K.C,"Identification of Chemical Agent for the Control of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete." Final Rep. SHRP-IDEA Project, Strategic Highway Research Program, Washinton, D.C, 1991.
- 30.- Turrizianni, R. "Internal Degradation of Concrete:Alkali-Aggregate Reaction", 8th International Conference on the Chemistry of Cement, Rio, Brazil, Sub-Theme 4.3, Vol.1, 1986, pp 388-441.
- 31.- Mielenz, R.C and Benton, " Evaluation of the Quick Chemical Test for Alkali-Reactivity of Concrete Aggregates". HRB Bulletin No. 171, 1958, pp. 1-15.
- 32.- Canadian Standard Association " Proposed Changes to CSA A23.1 and A23.2 as Regards Alkali-Aggregate Reactivity and Associated Test Methods". Cement-Aggregate Reactivity Sub Committe CSA-AS Task Group. Drft Document, October 1992, 83 pp.
- 33.- Bérubé, M.A and Fournier, B. "Acelerated Test Methods for Alkali-Aggregate Reactivity" Advances in Concrete Technology. V. M: Malhotra ed. CANMET, Ottawa, Canada, 1992, pp. 583-627.
- 34.- Grattan-Bellew, P.E "Test Methods and Criteria for Evaluating the Potential Reactivity of Aggregates". 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japan, 1989, pp. 279-294.
- 35.- Bérubé, M.A and Fournier, B. "Effectiveness of the Accelerated Mortar Bar Method, ASTM C9-Proposal-P214 or NBRI, for Assessing potential Alkali-Aggregate Reaction in Quebec". The 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. The Concrete Society, London, 1992, pp. 91-101.
- 36.- Rogers, C.A and Hooton, R.D "Leaching of Alkalies' in Alkali-Aggregate Reaction Testing".8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japan , 1989, pp. 327-332.
- 37.- Moore, A.E, "An Attempt to Predict the Maximum Forces that Could be Generated by Alkali-Silica Reaction". 4th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete,1978, pp. 363-365.

- 38.- Grattan-Bellew. "Canadian Experience with Mortar Bar Rapid Test for Alkali-Aggregate Reaction". Canadian Developments in testing Concrete Aggregates for Alkali-Aggregate Reactivity. Ministry of Transportation of Ontario, 1990, pp. 17-34.
- 40.- Poole, A.B. and Al-Dabbagh, I. "Reactive Aggregates and The products of Alkali-Silica Reaction in Concretes", 6th International Conference on Alkalis in Concrete, 1983, pp. 175-185.
- 41.- Oberholster, R.E and Davies, G. "An Accelerated Method for testing the Potential Alkali Reactivity of Siliceous Aggregates". Cement and Concrete Research. Vol. 16, 1986, pp. 181-189.
- 42.- Fournier, B. And Bérubé, M.A. "Application of the NBRI Accelerated Mortar Bar test to Siliceous Carbonate Aggregates Produced in the St. Lawrence Lowland". Cement and Concrete Research, Vol. 21, 1991, pp. 853-862.
- 43.- ASTM C 9 - Proposal-P214 "Proposed Test Method for Accelerated Detection of Potentially Deleterious Expansion of Mortar Bars due to Alkali Silica Reaction", Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Concrete and Mineral Aggregates, ASTM, Philadelphia, USA, 1991, pp. 755-758.
- 44.- Davies, G. and Oberholster, R.E "An Interlaboratory test Programme on the NBRI Accelerated test to Determine the alkali-Reactivity of Aggregates". NBRI, CSIR, South Africa, 1987, 16 pp.
- 45.- Hooton, R.D. "Interlaboratory Study of the NBRI Rapid Test Method and CSA Standardization Status". Canadian Developments in testing Concrete Aggregates for alkali-Aggregate Reactivity. Canada, 1990, pp. 225-240.
- 46.- Rogers, C.A "Interlaboratory Study of the Concrete Prism Expansion test for the Alkali-Carbonate Reaction", Canadian Development in testing Concrete Aggregates for Alkali-Aggregate Reactivity. Canada, 1990, pp 136-149.
- 47.- Fournier, B. and Bérubé, M. A. "General Notions on Alkali-Aggregate Reactions", Course Manual, CANMET, Ottawa, Canada, 1991, pp. 7-69.
- 48.- Rogers, C.A "Concrete Prism Expansion Testing to Evaluate slow/late Expanding Alkali-Silicate, Silica Reactive Aggregates", Canada, Report EM-92, 1990, pp 96-110.
- 49.- The Diagnosis of Alkali-Silica Reaction, report of working party, British Cement Association Publication 45.042, 1982, 36 pp.
- 50.- Neville M. Adam. " Tecnología del Concreto", IMCYC, 1992, pp. 212-218.
- 51.- Steven H. Kosmatka and Anthony E. "Detecting and Avoiding Alkali-Aggregate Reactivity". Portland Cement Association, Vol. 12, Number 3, 1991, 8 pp.
- 52.- Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Building Research Establishment Digest, March 1988, 9 pp.

- 53.- Nishibayashi, S. Yamura, K. and Matsushita, H, " A Rapid Method of Determining the Alkali-Aggregate Reaction in Concrete by Autoclave", 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Ottawa, Canada 1986, pp. 299-303.
- 54.- Tang, M. S. Han, S.F and Zhen, S.H; "A rapid Method for Identification of Alkali-Reactivity of Aggregate". Cement and Concrete Research, 1983, pp. 417.
- 55.- Cottier Caviades J. L. "Efectos de la Reacción Alcali-Agregado en el Concreto". Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto: Durabilidad, UANL, México, 1993, pp. 15-30.
- 56.- Mena Ferrer Manuel.; "Reacción Alcali-Sílice en el Concreto: Causas, Efectos y medios de prevención". Revista IMCYC, Vol. 21, 1983, pp. 17-31.
- 57.- Callejas José. "Posibilidades de Utilización de Aridos Locales para Hormigones de firmes Rígidos". Curso de Pavimentos de Hormigón del Colegio de Ingenieros de Caminos y Puertos. España, 1986.
- 58.- Verolli, Dante J. E "Durabilidad de los Hormigones". Reacción Aridos-Alcali. Monografía No. 352, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, Septiembre 1978.
- 59.- Petterson, Karin; "Effects of Silica Fume on Alkali-Silica Expansion in Mortar Specimens", Cement and Concrete Research, Vol. 22, 1992, 22 pp.
- 60.- Diamond S, "Alkali Reactions in Concrete Pore Solution Effect", 6th International Conference Alkali in Concrete, Copenhagen, 1983, pp. 155-166.
- 61.- Malhotra, V. M. Soles J. A. "Performance of Various Test Methods for Assessing the Potential Alkali Reactivity of some Canadian Aggregates", ACI Materials Journal. November-December 1991, pp. 613-619.
- 62.- Stanton, T. E; "Expansion of Concrete through Reaction Between Cement and Aggregate". ASCE, Vol. 66, 1940, pp. 1781-1811.
- 63.- Fuji M. et al. "The Static and Dynamic Behaviour of Reinforced Concrete Beams with Cracking due to Alkali-Silica Reaction". 7th International Conference, Concrete Alkali-Aggregate Reaction, Ottawa, Canada, 1986. pp. 126-130.
- 64.- Somerville, G. "Engineering Aspect of . Alkali-Silica Reaction".Cement and Concrete Association. Wexham Springs. Slough, 1985. Interim Technical note 8.
- 65.- Swenson, E. G. and Gillot, J. E. " Alkali Carbonate Rock Reaction". Cem. Aggregate Reaction, 1974, No 525, pp. 21-40.

- 66.- Mac Neill, S. G. and Langley, W. S. "Alkali-Aggregate Reaction in Nova Scotia: CANMET Studies of their Distribution and Control of the Reactivity". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 15, 1993, pp.7-12.
- 67.- Tamura, H, Takahashi. T and Ohashi, H. A. "Test Method on Rapid Identification of the Future Susceptibility of Alkali-Aggregate Reaction in Fresh Concrete". The 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Kyoto, Japan, 1989, pp. 351-356.
- 68.- Chen, H and Malhotra V. M: "Investigations of Supplementary Cementing Materials for Reducing Alkali-Aggregate Reactions". *Cement and Concrete Composites*. Vol. 15, 1993, pp. 75-84.
- 69.- Suplemento Mexicano del Informe del ACI-201, "Guía para la Durabilidad del Concreto". México, Noviembre, 1989.
- 70.- Tamayo J. L. "Geografía Moderna de México" Ed. Trillas, 9a Edición. México, D.f. 1980.
- 71.- Manual de Tecnología del Concreto. Comisión Federal de Electricidad. Ed. Limusa, Vol. 1, y II, 1994.
- 72.- Steven H. Kosmatka y William C. Panarese. "Diseño y Control de Mezclas de Concreto".IMCYC, 1992,pp. 53-56.
- 73.- Kobayashi, K. and Kojima T. "Repair of Concrete Structures Damaged by Alkali-Silica Reactions and its Effects". 8th International Conference on Alkali-Aggregate, 1989, pp. 863-868.
- 74.- Kojima, T. and Takagi, N. "Effectiveness of Silica Fume in Reducing Damage due to Alkali-Silica Reaction". 8th International Conference on Alkali-Aggregate, 1989. pp. 265-270.
- 75.- Concrete Society Working Party Alkali-Aggregate Reaction. Minimising the risk of Damage. Guidance Notes and Model Specification Clauses. Concrete Society. London, 1987. Repor 30.
- 76.- Koike, M., Katawaki, K. "Development of Injection Materials and the Standard for Repairing Damage to Structures Caused by Alkali-Aggregate", 8th ICAA, Kyoto, Japan, 1989.
- 77.- Okada, K; Kobayashi, K; "Repair of Concrete Structures Damaged by Alkali-Aggregate Expansion". Transaction of the Japan Concrete Instituto, Vol. 9, 1987, pp. 219-225.
- 78.- Ministry of Construction "Guideline for Repairing of Concrete Structures Damaged by ASR (draft)." Technology for Improving Durability of Concrete, Japan 1989.