



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

TESIS

“FISURAMIENTO NO SÍSMICO DEL CONCRETO”

**PRESENTADA POR EL BACHILLER
REYNALDO SABINO CENTENO VELÁZQUEZ**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

**LIMA – PERÚ
NOVIEMBRE, 2016**

DEDICATORIA

A mis padres, esposa e hijos, por brindarme su apoyo incondicional en cada uno de mis proyectos que realizo.

AGRADECIMIENTO

**A la Universidad Alas Peruanas y a mis docentes por sus enseñanzas,
formándome en esta profesión maravillosa que es la Ingeniería Civil.**

RESUMEN

En la presente tesis se hace conocer con mayor detalle la fisuración del concreto debido a problemas de durabilidad y cambios volumétricos.

Se analiza las causas que originan la fisuración y degradación del concreto, tratando de reconocer o de realizar tipos de patrones de fisuración por las causas ya determinadas (por medio de ensayos complementarios, inspección visual, análisis químicos, etc.).

La justificación del trabajo se da por el desarrollo del tema de durabilidad del concreto, tan poco difundido en nuestro medio y a la vez tan peligroso; además este trabajo tiene una gran importancia para aquellos profesionales que se dediquen a la reparación de estructuras de concreto o que busquen una mayor información acerca del tema de durabilidad y cambios volumétricos en el concreto.

PALABRAS CLAVE: FISURACIÓN NO SÍSMICA, CONCRETO

ABSTRACT

In this thesis becomes insight into concrete cracking due to durability problems and volumetric changes.

The causes cracking and degradation of the concrete, trying to recognize or perform types of patterns causes cracking and certain (through further testing, visual inspection, chemical analysis, etc.) is analyzed.

Work justification is given for the development of concrete durability issue, so little spread in our midst and yet so dangerous; This work also has great importance for professionals engaged in the repair of concrete structures or seek more information on the subject of durability and volume changes in concrete.

KEYWORDS: NO SEISMIC CRACKING, CONCRETE

INTRODUCCIÓN

El concreto es un material bastante complejo y requiere de un estudio minucioso en cuanto a su naturaleza, propiedades, bien en estado plástico como endurecido, además el análisis de sus características frente a ambientes agresivos y el ataque de agentes degradantes. El concreto es un material híbrido y está compuesto por: el cemento, agregados, el agua y aditivos, cada uno debe ser estudiado independientemente, además de las reacciones que resulta de la combinación de estos. La durabilidad no es un concepto absoluto que dependa sólo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente y las condiciones de trabajo.

El presente trabajo se desarrolla ampliamente en ocho capítulos, que a continuación se indican:

- En el primer capítulo nos referiremos al diseño de la investigación, en donde se formula las hipótesis, justificación de la investigación, objetivos, variables.
- El segundo capítulo tratará del estudio del concreto por medio de sus propiedades y características.
- En el tercer capítulo se desarrollará los problemas de durabilidad que aqueja el concreto, mejor dicho ataques químicos, abrasión, ciclos de congelación-deshielo, corrosión del refuerzo, etc.; además profundizaremos en el tema de los mecanismos de fisuración del concreto debido a problemas de durabilidad, recomendaciones.
- En el capítulo cuarto haremos un estudio de los problemas del concreto en su estado plástico debido a cambios volumétricos, mecanismo de fisuración, asiento plástico, contracción plástica, recomendaciones.

- El capítulo quinto se refiere tan bien al cambio volumétrico pero en este caso, al concreto en estado endurecido, cuyos problemas son mayores y desarrollaremos los mecanismos de fisuración de la contracción por secado, efectos térmicos, efectos químicos, recomendaciones.
- El capítulo sexto será un tema referido a la evaluación del concreto fisurado y dañado o degradado, este concreto será sometido a ensayos complementarios como son los ensayos destructivos y no destructivos, estos nos sirven para determinar la causa de fisuración, grado de daño, recomendaciones, etc.
- En el capítulo séptimo hablaremos de la reparación del concreto, explicaremos las técnicas de reparación por medio de remoción del concreto, preparación de la superficie, reparación del refuerzo, materiales de reemplazo, además nos referiremos a la protección de superficies, sellado de juntas, recomendaciones.
- Luego desarrollaremos las conclusiones en que culmina la presente investigación.

En el trabajo de investigación se hace mención de los métodos de ensayos para la evaluación y reparación del concreto, estos métodos son utilizados en la actualidad, además viene a ser la tecnología de punta referente a la evaluación y reparación del concreto, frente a problemas de fisuración y degradación.

La investigación está basada en referencias americanas y europeas, además la reglamentación o normatividad referente a los problemas de durabilidad, cambios volumétricos, métodos de ensayos para la evaluación y reparación del concreto son americanas (ACI), europeas (CEB), y peruanas (NTP).

En el desarrollo de la presente investigación se presentaron diferentes limitaciones y problemas como: la poca bibliografía en español referente al tema de durabilidad que no está muy bien difundido en nuestro medio, la falta de información referente a la evaluación y reparación de estructuras, la traducción al español de normas americanas y libros americanos, estudio de los complicados métodos de ensayos, estudio de las reacciones químicas de los elementos.

ÍNDICE

	Página
DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
INTRODUCCIÓN	V
ÍNDICE	VII

CAPITULO I

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.0 TIPO DE INVESTIGACIÓN	1
1.2.0 JUSTIFICACIÓN DE LA REALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN ...	2
1.3.0 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	3
1.4.0 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.5.0 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS Y VARIABLES	4
1.6.0 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS	6

CAPITULO II

PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO

2.1.0 INTRODUCCIÓN	7
2.2.0 NATURALEZA DEL CONCRETO	7
2.3.0 CEMENTOS	20
2.4.0 AGREGADOS	32
2.5.0 EL AGUA PARA EL CONCRETO	43
2.6.0 ADITIVOS	47

CAPITULO III
DURABILIDAD DEL CONCRETO

3.1.0	CONGELACIÓN Y DESHIELO	54
3.2.0	ATAQUES AL CONCRETO	72

CAPITULO IV
CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FISURACION DEL CONCRETO NO ENDURECIDO
(ESTADO PLASTICO)

4.1.0	INTRODUCCIÓN	152
4.2.0	ASIENTO PLÁSTICO	153
4.3.0	CONTRACCIÓN O RETRACCIÓN PLÁSTICA	157

CAPITULO V
CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FISURACION DEL CONCRETO ENDURECIDO

5.1.0	INTRODUCCIÓN	164
5.2.0	CONTRACCIÓN POR SECADO	164
5.3.0	EFFECTOS TÉRMICOS	175
5.4.0	AGRESIVIDAD QUÍMICA INTERNA Y EXTERNA	196

CAPÍTULO VI
EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN DEL CONCRETO

6.1.0	INTRODUCCIÓN	198
6.2.0	DETERMINACIÓN DE LA UBICACIÓN Y EXTENSIÓN DE LA FISURA	198
6.3.0	SELECCIÓN Y PROCEDIMIENTO DE REPARACIÓN	239

CAPÍTULO VII
REPARACIÓN DEL CONCRETO

7.1.0	EVALUACIÓN DE DAÑOS-SELECCIÓN DEL MÉTODO DE REPARACIÓN	240
7.2.0	TIPOS DE REPARACIONES	241

CONCLUSIONES	289
RECOMENDACIONES.....	301
BIBLIOGRAFÍA.....	302
ANEXOS.....	309

CAPÍTULO I

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.0 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este tipo de investigación es:

➤ **Descriptiva :**

- Describe situaciones y eventos que ocurren en el proceso químico de la mezcla del cemento con ciertos elementos reactivos que causan fisuración del concreto.
- Describe los mecanismos de fisuración del concreto debido a problemas de durabilidad y cambios volumétricos.
- Describe los métodos de ensayos para la evaluación, análisis y reparación del concreto fisurado.
- Describe los tipos de fisuras y degradación del concreto.
- Mide el grado de fisuración y degradación del concreto por medio de ensayos especiales.
- Hace un estudio de las manifestaciones con un determinado fenómeno o varios fenómenos que pueden afectar al concreto, como pueden ser el aumento y disminución de la temperatura ambiental, exposición a agentes degradantes, intemperismo, etc.

➤ **Explicativa**

- Explica las causas que originaron la fisuración, daño o degradación del concreto.
- Explica los fenómenos de fisuración en el concreto.
- Explica las propiedades del concreto frente a cambios volumétricos, debido a condiciones de temperatura, vientos, humedad.

- Explica los problemas de durabilidad: problemas de abrasión-erosión, congelación –deshielo, corrosión, ataque por sulfatos, etc.
- Explica los fenómenos químicos, físicos, físico-químicos y electroquímicos.
- Explica por qué ocurre el proceso de fisuración y degradación del concreto.

1.2.0 JUSTIFICACIÓN DE LA REALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Esta Investigación nos sirve para darnos cuenta de las degradaciones y fisuraciones que puede darse en el concreto debido al incremento o disminución de temperatura, exposición a agentes nocivos o degradantes, medio ambiente agresivo, etc.

Nos hace conocer lo diferentes métodos de ensayos que se debe realizar al concreto para determinar su grado de deterioro, fisuración o degradación.

Existe un gran temor por parte de la sociedad a las fisuras en construcciones de concreto, pues muchas veces puede pensarse que podría ocurrir un desastre mayor o un colapso total de las estructuras. Por medio de esta Investigación se hará un estudio muy detallado de los tipos, patrones y características de las fisuras en el concreto, y así determinar si son solamente superficiales o de mayor profundidad que puedan causar un colapso de las estructuras.

Esta investigación será beneficiosa para aquellos ingenieros que quisieran especializarse, dedicarse a la reparación de estructuras fisuradas, o simplemente utilizarla como una guía de procedimiento en el caso que tengan problemas de fisuración, degradación, daño, etc. Pues en esta investigación veremos ampliamente el desarrollo de los métodos de reparaciones de estructuras con problemas de fisuración.

Esta investigación será beneficiosa, pues ampliaremos los vagos conocimientos en el estudio del concreto, los problemas de durabilidad, desarrollados muy poco en el Perú, pero sí ampliamente en los Estados Unidos y Europa.

1.3.0 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

a. OBJETIVOS GENERALES

- Determinar las causas que originan la degradación y fisuración del concreto.
- Evaluar y analizar los factores que pueden influenciar en el desempeño de las estructuras de concreto.
- Diseñar estructuras de concreto mucho más durables y que soporten los cambios volumétricos debido a cambios de temperatura, exposición a agentes degradantes, intemperismo, etc.
- Ampliar el conocimiento referente a los problemas de fisuración del concreto debido a problemas de durabilidad y cambios volumétricos.
- Reconocimiento e identificación de los patrones de fisuración.
- Reparar y rehabilitar estructuras de concreto fisuradas y degradadas.
- Dar a conocer las Normas Peruanas y americanas referentes a los problemas de fisuración y reparación del concreto.
- Utilizar el concreto sin tener el temor de que sufra algún tipo de daño, fisuración, degradación debido a problemas de durabilidad y cambios volumétricos.

b. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la degradación y fisuración del concreto por medio de ensayos destructivos y no destructivos.
- Reparar estructuras de concreto utilizando métodos de reparación según las Normas del American Concrete Institute (ACI).
- Dar a conocer los diversos métodos de remoción del concreto dañado, fisurado y degradado.
- Proponer medidas de prevención de la fisuración del concreto frente a problemas de durabilidad y cambios volumétricos.
- Controlar la fisuración del concreto por medio de juntas de contracción, dilatación, etc.

1.4.0 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

La importancia de esta investigación es dar a conocer las fallas del concreto no solo referido a las fisuraciones propias del concreto debido a cambios volumétricos por causa de cambios de temperatura de la superficie, o agrietamiento del concreto referido a las características inherentes del concreto, fisuración del concreto debido a la corrosión de las barras de refuerzo etc. Además, de los problemas que ocurren en el concreto debido a sus propiedades inherentes, nos hace reflexionar hacer un a investigación no sólo al concreto sino también a sus componentes.

Además se hace una evaluación de los agrietamientos y por medio de ensayos e investigaciones experimentales se determina la magnitud de la degradación del concreto, para su posterior reparación de la estructura.

El agrietamiento o fisuración del concreto se debe a muchas causas, de estas algunas aún no se determina su origen. Pero existen investigaciones mucho más minuciosas del concreto, pues a medida que existe gran variedad de tipos de cementos utilizados en diversas situaciones, estos causan un tipo diferente de fisuración, claro de acuerdo a los componentes químicos que llevan el cemento, pues el comportamiento de este, difiere uno de otro.

1.5.0 PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS Y VARIABLES

- La fisuración del concreto se debe a la falta de conocimiento de las características y propiedades inherentes del concreto.
- Los problemas en el concreto se deben muchas veces al uso del cemento.
- Los problemas en el concreto se deben a la mala aplicación de las especificaciones técnicas.
- Cuando se incrementa la relación agua/cemento disminuye la durabilidad del concreto.
- La reparación del concreto será efectiva si se utilizan adecuadamente los métodos de ensayo de reparación del concreto.

- Podremos determinar su grado de fisuración, degradación o daño si aplicamos correctamente los ensayos destructivos y no destructivos en el concreto.
- La humedad relativa, temperatura ambiente, vientos, etc. son factores que incrementan los problemas en el concreto.
- Los problemas en el concreto se dan cuando existen errores en la elaboración, transporte y colocación del concreto.
- Tendremos problemas de durabilidad, cambios volumétricos, fisuración y degradación si no utilizamos adecuadamente los componentes del concreto como son: el cemento, el agua, los agregados, los aditivos.
- Cuando los ingenieros piensan muchas veces en el concreto, piensan muchas veces en la resistencia y que soporte esfuerzos de compresión de 210 kg/cm², 280 kg/cm², etc. Pero no pensamos muchas veces en la durabilidad del concreto y su vida útil.

TABLA 1.1 Variables independientes y dependientes.

VARIABLES INDEPENDIENTES	VARIABLES DEPENDIENTES
<ul style="list-style-type: none"> • La falta de conocimiento de las características y propiedades inherentes del concreto. 	<ul style="list-style-type: none"> • La fisuración del concreto
<ul style="list-style-type: none"> • Uso del cemento • Mala aplicación de las especificaciones técnicas. • La humedad relativa, temperatura ambiente, vientos. • Cuando existen errores en la elaboración, transporte y colocación del concreto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas en el concreto
<ul style="list-style-type: none"> • Cuando se incrementa la relación agua/cemento 	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuye la durabilidad del concreto.

<ul style="list-style-type: none">• Si se utilizan adecuadamente los métodos de ensayo de reparación del concreto.	<ul style="list-style-type: none">• Efectiva reparación del concreto
<ul style="list-style-type: none">• Si aplicamos correctamente los ensayos destructivos y no destructivos en el concreto.	<ul style="list-style-type: none">• Podremos determinar su grado de fisuración, degradación o daño.
<ul style="list-style-type: none">• Si no utilizamos adecuadamente los componentes del concreto como son: el cemento, el agua, los agregados, los aditivos.	<ul style="list-style-type: none">• Tendremos problemas de durabilidad, cambios volumétricos, fisuración y degradación del concreto.

1.6.0 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS

Esta investigación está basada en datos bibliográficos y casos reales de elementos de concreto afectados por problemas de durabilidad, cambios volumétricos y fisuración. Además en esta investigación consideraremos una metodología para evaluar, analizar y reparar las estructuras de concreto sujetas a estos problemas.

Para el caso de los problemas de durabilidad del concreto utilizamos, bibliografía Americana, Mexicana, Española, Alemana y Peruana, además de las Normas Americanas (ACI y ASTM), Normas Europeas (CEB), y Normas Peruanas de estructuras de concreto (ACI-PERÚ).

En el problema de cambio de volumen con problemas de fisuración nos basamos en bibliografía Americana, Mexicana, Española, Alemana y Peruana, además de las Normas Americanas ACI y ASTM, Normas Europeas CEB, y Normas Peruanas de Estructuras de concreto.

Para el caso de la evaluación y reparación de las estructuras de concreto con fisuras, daños, degradación, etc. Se utilizaron métodos de ensayos de las Normas Americanas (ACI), Normas Europeas (CEB), y Normas Peruanas pero sólo en el caso del método de ensayo de esclerometría, probetas de extracción diamantinas y pruebas de carga.

CAPÍTULO II

PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO

2.1.0 INTRODUCCIÓN

El concreto es un material bastante complejo y requiere de un estudio minucioso en cuanto a su naturaleza; sus propiedades, bien estado plástico como endurecido; características, etc. Además es necesario estudiar al concreto de acuerdo a su preparación, colocación, mezcla, transporte y control.

El concreto es un material híbrido y está compuesto por: el cemento, los agregados, el agua, y aditivos, cada uno de estos debe ser estudiado independientemente, además de las reacciones que resulta de la combinación de estos.

En el siguiente capítulo veremos todos estos casos con mayor detenimiento, además de las recomendaciones y control de calidad del concreto, puesto que la prevención y control son factores muy importantes, pues así nos evitaremos problemas complejos inherentes al concreto.

2.2.0 NATURALEZA DEL CONCRETO

2.2.1 DEFINICIÓN DEL CONCRETO

El concreto es el material constituido por la mezcla en ciertas proporciones de cemento, agua, agregado y opcionalmente aditivos, que inicialmente denota una estructura plástica y moldeable, y que posteriormente adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes, lo que lo hace un material ideal para la construcción.

De esta definición se desprende que se obtiene un producto híbrido, que conjuga en mayor o menor grado las características de los componentes, que bien proporcionados, aportan una o varias de sus propiedades individuales para constituir un material que manifiesta un comportamiento particular y original.

En consecuencia, para poder dominar el uso de este material, hay que conocer no sólo las manifestaciones del producto resultante, sino también la de los componentes y su interrelación, ya que son en primera instancia los que le confieren su particularidad.

Como cualquier material, se contrae al bajar la temperatura, se dilata si ésta aumenta, se ve afectado por sustancias agresivas y se rompe si es sometido a esfuerzos que superan sus posibilidades, por lo que responde perfectamente a leyes físicas y químicas. Luego pues, la explicación a sus diversos comportamientos siempre responde a algunas de estas leyes; y la no obtención de los resultados esperados se debe al desconocimiento de la manera cómo actúan en el material, lo que constituye la utilización artesanal del mismo o porque durante su empleo no se respetaron o se obviaron las consideraciones técnicas que nos dan el conocimiento científico sobre él.

El concreto es un producto artificial compuesto que consiste de un medio ligante denominado pasta, dentro del cual se encuentran embebidas partículas de un medio ligado denominado agregado.

La pasta es el resultado de la combinación química del material cementante con el agua. Es la fase continua del concreto dado que siempre está unida con ella misma a través de todo el conjunto de éste.

El agregado es la fase discontinua del concreto dado que sus diversas partículas no se encuentran unidas o en contacto unas de otras, sino que se encuentran separadas por espesores diferentes de pasta endurecida.

2.2.2 IMPORTANCIA DEL CONCRETO

Actualmente el concreto es uno de los materiales de más uso en la construcción en el ámbito mundial. Si bien la calidad final del concreto depende en forma muy importante del conocimiento del material y de la calidad profesional del ingeniero, el concreto es, en general, desconocido en muchos de sus siete grandes aspectos: naturaleza, materiales, propiedades, selección de las proporciones, puesta en obra, control de calidad e inspección, y mantenimiento de los elementos estructurales.

Es un material temporalmente plástico que puede colarse o moldearse y, más tarde, se convierte en una masa sólida por reacción química. El usuario desea resistencia adecuada, facilidad de colocación y durabilidad, al mínimo costo. Además del proyectista del concreto puede variar las proporciones de los componentes dentro de los límites amplios, para lograr esos objetivos. Las variantes principales son la relación agua-cemento, la proporción cemento-agregado, tamaño del agregado grueso, proporción entre agregado grueso y agregado fino, tipo de cemento y productos incluidos en la mezcla.

2.2.3 REQUISITOS DE LAS MEZCLAS

Las mezclas de concreto deberán cumplir con los siguientes requisitos básicos:

1. La mezcla recién preparada deberá tener la trabajabilidad, consistencia y cohesividad que permita su adecuada colocación en los encofrados. Esta mezcla deberá estar libre de segregación y tener una exudación mínima.
2. La mezcla endurecida deberá tener las propiedades especificadas en función del empleo que se va a dar a la estructura.
3. El costo de la unidad cúbica de concreto endurecido deberá ser el mínimo compatible con la calidad deseada.

2.2.4 COMPOSICIÓN DEL CONCRETO

2.2.4.1 PASTA

A. ELEMENTOS FUNDAMENTALES

Aquella parte del concreto endurecido conocida como pasta, que comprende a cuatro elementos fundamentales:

- a. El gel, nombre con el que se denomina al producto resultante de la reacción química e hidratación del cemento;
- b. Los poros incluidos en ella;
- c. El cemento no hidratado, si lo hay;
- d. Los cristales de hidróxido de calcio, o cal libre, que pueden haberse formado durante la hidratación del cemento.

Estos cuatro elementos tienen un papel fundamental en el comportamiento del concreto.

B. FUNCIONES DE LA PASTA

La pasta tiene cuatro grandes funciones en el concreto;

- a. Contribuir a dar las propiedades requeridas al producto endurecido.
- b. Separar las partículas de agregado.
- c. Llenar los vacíos entre las partículas de agregado y adherirse fuertemente a ellas.
- d. Proporcionar lubricación a la masa cuando ésta aún no ha endurecido.

C. PROPIEDADES DE LA PASTA

Las propiedades de la pasta dependen de:

- a. Las propiedades físicas y químicas del cemento.
- b. Las proporciones relativas de cemento y agua en la mezcla.
- c. El grado de hidratación del cemento, dado por la efectividad de la combinación química entre éste y el agua.

D. INFLUENCIA DE LA PASTA EN EL CONCRETO

Sin desconocer el papel fundamental que tiene el agregado en las características finales del concreto, el comportamiento de éste como material de construcción está directamente influenciado por las características de la pasta y propiedades finales de ella.

Para un cemento dado, las características y porosidad de la pasta dependen fundamentalmente de la relación agua-material cementante de una mezcla trabajable y cuando mayor sea el grado de hidratación del cemento.

Dependiendo el grado de hidratación del cemento de la reacción química entre éste y el agua, todas aquellas condiciones que favorezcan la hidratación tienen importancia en la influencia de la pasta en el concreto.

2.2.4.2 EL GEL

A. CONCEPTO

Se define como gel a la parte sólida de la pasta, la cual es el resultado de la reacción química del cemento con el agua durante el proceso de hidratación.

En la actualidad se piensa que cuando el cemento se combina con el agua se produce muy rápidamente una solución sobresaturada de hidróxido de calcio, con concentración de silicato cálcico hidratado en condición metastable.

De acuerdo a Le Chatelier ese hidrato se precipita rápidamente, correspondiendo el endurecimiento posterior a la pérdida de agua del material hidratado. Presentándose el silicato de calcio hidratado en forma de cristales interconectados extremadamente pequeños, los cuales de acuerdo a sus dimensiones pueden ser definidos como gel, la aparente divergencia Le Chatelier-Michaelis se reduciría finalmente a terminología en la medida que el producto final es un gel consistente de cristales.

B. COMPOSICIÓN

En su estructura el gel es una aglomeración porosa de partículas sólidamente entrelazadas, en su mayoría escamosa o fibrosa, el conjunto de las cuales forma una red eslabonada que contiene material más o menos amorfo.

En su composición el gel comprende:

- a. La masa cohesiva de cemento hidratado en su estado de pasta más densa.
- b. Hidróxido de calcio cristalino
- c. Poros gel

C. COMPORTAMIENTO

El gel desempeña el papel más importante en el comportamiento del concreto, especialmente en su resistencia y comportamiento elástico. Las razones de su resistencia aún están claramente comprendidas, pero se acepta que intervienen dos clases de adherencias cohesivas: atracción física y adherencia química. La atracción física viene a ser la adherencia que es debida a la gran energía disponible en la superficie de las partículas de gel; la adherencia química es igualmente una causa importante de cohesión. Dado que el gel tiene capacidad de esponjamiento limitada, debido a que sus partículas no pueden dispersarse por adición de agua.

2.2.4.3 EL AGREGADO

Se definen los agregados como los elementos inertes del concreto que son aglomerados por la pasta de cemento para formar la estructura resistente.

Ocupan alrededor de las $\frac{3}{4}$ partes del volumen total. El tema de agregados es bastante extenso e importante en la elaboración del concreto, es por eso que daremos una mayor referencia más adelante.

2.2.5 PROPIEDADES DEL CONCRETO

Para cada caso particular de empleo se requieren en el concreto determinadas propiedades. Es por ello que el conocimiento de todas y cada una de las propiedades del concreto, así como la interrelación entre ellas, es de importancia para el ingeniero el cual debe decidir, para cada caso particular de empleo del concreto, la mayor o menor importancia de cada una de ellas.

Las propiedades más importantes del concreto no endurecido incluyen la trabajabilidad, consistencia, segregación, exudación, calor de hidratación, y peso unitario, etc.

Las propiedades más importantes del concreto al estado endurecido incluyen las resistencias mecánicas, durabilidad, propiedades elásticas, cambios de volumen, impermeabilidad, etc.

2.2.5.1 CONCRETO NO ENDURECIDO (ESTADO PLASTICO)

- a. Trabajabilidad: La trabajabilidad en el concreto, podríamos decir que es una propiedad relativa, ya que es imposible de medir cuantitativamente.

La trabajabilidad representa, la facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco. Como se comprende de esta definición, la trabajabilidad, dependerá de cómo se vaciará el concreto, vale decir tipo de encofrados y método de consolidación.

- b. **Consistencia:** La consistencia es una propiedad que define la humedad de la mezcla por el grado de fluidez de la misma; entendiéndose por ello que cuanto más húmeda es la mezcla mayor será la facilidad con la que el concreto fluirá durante su colocación.
- c. **Segregación:** segregación, es separación básicamente del agregado grueso del resto de la mezcla, la existencia de segregación puede deberse a la mezcla misma (exceso de agua, defecto de finos, etc.) o al tratamiento de ella., (traslados largos, caminos accidentados, vaciados desde altura, etc.).
- d. **Exudación:** Es la separación del agua de la mezcla (normalmente en muy pequeña cantidad) que sube a la superficie, arrastrando parte del cemento. La exudación excesiva es peligrosa, ya que produce capas débiles en la unión de dos vaciados, y adicionalmente si es masiva, produce canales internos que influyen en la resistencia del concreto.
- e. **Calor de hidratación:** Se produce al unirse el cemento con el agua, reacción exotérmica. No es peligroso en estructuras normales, sólo debe considerarse en casos de vaciados masivos, en cuyo caso deberán utilizarse cementos especiales.
- f. **Tiempo de fraguado:** El tiempo de fragua es el que transcurre hasta una relativa toma de rigidez (6 horas) de la mezcla, no debe confundirse con el endurecimiento que es la toma de resistencia (24 horas).
- g. **Peso unitario:** Es como su nombre lo indica, peso por unidad de volumen del concreto, y representa un ensayo de control de rendimiento.

- h. Contenido de aire: Constituye la cantidad de aire en porcentaje que existe en la mezcla de concreto, se mide sólo en el caso de concretos con aire incorporado. El ensayo mide el aire total, es decir la suma de aire incorporado más aire atrapado.

2.2.5.2 CONCRETO ENDURECIDO

- a. Resistencia mecánica: La resistencia que tipifica al concreto, es la resistencia a la compresión a 28 días, medida en probetas estándar y denominada $f'c$ a las demás resistencias están relacionadas con $f'c$ y podemos considerar que la resistencia en tracción se considera entre el 8% y el 12% de la resistencia en compresión y la de corte alrededor del 20%.

Los principales factores que afectan la resistencia del concreto son la relación agua-cemento y la porosidad, que además se relaciona entre sí.

El cemento para su total hidratación sólo necesita entre el 22% y el 25% de su peso en agua, sin embargo la relación agua-cemento que se usa normalmente está entre 0.5 y 0.8, por tanto al evaporarse el agua deja dentro de la pasta los poros capilares. Otros factores que influyen en la resistencia, son el curado y las características del agregado, tales como gradación, forma, limpieza y calidad.

- b. Módulo de elasticidad: Denotado por la letra E, es la relación del esfuerzo normal a su correspondiente deformación unitaria, generalmente en compresión.

Varía generalmente entre 140,000 kg/cm² y 420,000 kg/cm², para concretos normales, el reglamento para concreto, usa un valor conservador de $E = 15,000 F'c$.

- c. Permeabilidad: El concreto es un material permeable, los principales factores que inciden en la permeabilidad del concreto, es la permeabilidad de la pasta, la permeabilidad y gradación del agregado y la proporción relativa de pasta y agregado. Al decrecer la permeabilidad del concreto aumenta en resistencia a los ataques químicos, sobre todo las aguas sulfatadas, cloruros y heladas.

- d. Cambios volumétricos en el concreto: En el concreto se producen varios tipos de cambios volumétricos, por cambios de temperatura, cambios de humedad o esfuerzos.

Si el concreto no tuviera restricciones, los cambios volumétricos no tendrían mayores consecuencias, pero al existir éstas, tales como el caso de cimentaciones, el acero de refuerzo o elementos de conexión, las deformaciones adquieren importancia sobre todo en el caso de los refuerzos de tracción.

- e. Cambios de temperatura: Como todo material, el concreto se expande con el aumento de temperatura (ligeramente) y viceversa. El aumento de temperatura puede ser externo o provenir de la hidratación del cemento que ocurre internamente.

- f. Contracción o retracción: El concreto al ser un material permeable, se expande ligeramente al ganar humedad y se contrae al perderla.

La contracción por secado en algunos casos produce fisuraciones en el concreto, dependiendo de una serie de factores y básicamente de la resistencia a tracción de éste.

El concreto armado sufre menores contracciones por secado que el simple, debido a la acción restrictiva del acero de refuerzo.

- g. Deformaciones elásticas e inelásticas: Si bien en general se considera que podemos notar que con relaciones agua/cemento de 0.5 o menos, se nota que la deformación es aproximadamente proporcional al esfuerzo, es decir en el primer tramo, el concreto es casi elástico.

La deformación inelástica en el concreto se denomina fluencia o "creep". Cuando el concreto es cargado, las deformaciones producidas por la carga pueden dividirse en dos tipos, la que ocurre inmediatamente, y otra que depende del tiempo, esta última que se incrementa en el tiempo, sin incremento de carga, es la que llamamos "creep".

2.2.6 IMPORTANCIA DE LA SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

En la selección del cemento debe considerarse, para los portland normales, la composición química y el tipo de cemento empleado, así como la fluencia que estas características pueden tener sobre las propiedades del concreto. Si se trata de cementos combinados, debe tenerse en consideración las características de las puzolanas, ceniza, escoria de altos hornos, o micro sílice empleada.

Igualmente la fineza y tiempo de fraguado del cemento y la fluencia de todos éstos factores sobre las propiedades del concreto.

De acuerdo a las propiedades que se desea alcanzar, se deberá tener en consideración para el agregado su perfil, textura superficial, granulometría, tamaño máximo, módulo de fineza, superficie específica, dureza, resistencia, composición mineralógica, limpieza, y presencia de materia orgánica o materias extrañas.

El agua debe ser potable. En caso de no serlo se deberá tener en consideración la influencia de sus componentes sobre las propiedades del concreto.

El empleo de aditivos modifica significativamente las propiedades del concreto. Su uso deberá ser cuidadosamente estudiado a fin de alcanzar las propiedades deseadas en el concreto sin modificar otras.

2.2.7 IMPORTANCIA DE LA DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS

En la selección de las proporciones o dosificaciones de la mezcla de concreto deberá tenerse cuidado que haya la cantidad de pasta necesaria no sólo para recubrir el agregado y facilitar su movilidad, sino también para recubrir los vacíos existentes entre las partículas. Igualmente, la trabajabilidad y consistencia del concreto deberán ser las adecuadas para que la mezcla ocupe totalmente los encofrados y recubra el acero de refuerzo y elementos embebidos.

En el concreto endurecido, las proporciones seleccionadas deberán permitir obtener las propiedades deseadas al menor costo.

Para el caso del agua que se coloca en la mezcla es, por razones de trabajabilidad, siempre mayor que aquella que se requiere por hidratación del cemento; siendo ésta última conocida como agua de consistencia normal y estando su valor en el orden del 28% en peso del cemento.

Por la razón expuesta, las pastas que tienen alta relación agua-cemento contienen más agua que no intervienen en el proceso de hidratación, o agua libre, que aquellas que tiene baja relación agua-cemento. Desde que el agua libre ocupa espacios que después se transforman en poros capilares, las pasta de las mezclas de alta relación agua-cemento es más porosa que la de las mezclas ricas o de las mezclas con baja relación agua-cemento.

2.2.8 IMPORTANCIA DE LA PREPARACIÓN Y CONTROL

La preparación del concreto es, fundamentalmente, un proceso de fabricación de un nuevo producto. Es por ello que los productos derivados de la obtención de materiales adecuados; de selección de las proporciones más convenientes de los mismos; de fabricación y puesta en obra de la mezcla; de control de su calidad; y de economía de producción son, en cierta forma, similares a aquellos que pueden presentarse en cualquier otro problema de fabricación. Adicionalmente debe tenerse en consideración que, debido a que el proceso de fabricar y obtener un concreto de calidad determinada no termina hasta que la estructura esté puesta en servicio, cada obra representa problemas particulares, especialmente aquellos referidos a la selección de materiales y proporciones, proceso de colocación y curado del concreto.

Durante el proceso constructivo el profesional de la obra deberá siempre recordar que, independientemente de la calidad de la mezcla, del nivel de los cálculos de oficina e inclusive de las mezclas de prueba en el laboratorio, las cualidades asumidas para la estructura no podrán ser obtenidas a menos que ellas sean alcanzadas en cada unidad cúbica en la obra.

La preparación de un buen concreto exige un adecuado control. Ello implica:

- a. Una cuidadosa supervisión en la selección de los materiales y de las proporciones de la unidad cúbica de concreto.
- b. Una cuidadosa supervisión de los procesos de puesta en obra y acabado del concreto.
- c. Realización de ensayos en todas las etapas del proceso de selección de los materiales, dosificación de las mezclas, y colocación del concreto, a fin de garantizar la calidad de los materiales y del producto final.

2.2.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL CONCRETO

Las principales ventajas del concreto como material de construcción son:

- a. Su versatilidad, la cual permite obtener las formas que el proyectista desee.
- b. La posibilidad de fabricarlo en obra, como unidades vaciadas en sitio; o fuera de ella como unidades prefabricadas.
- c. El empleo de materiales locales, especialmente agregados y agua.
- d. Su bajo costo por unidad cúbica si se lo compara con el de los materiales.

Entre las principales desventajas del concreto se encuentran:

- a. Su baja resistencia a los esfuerzos de tensión, lo que lo obliga al empleo de acero de refuerzo.
- b. Su permeabilidad, debida a la presencia de poros capilares en la pasta.
- c. Sus cambios de volumen y longitud debidos a que el concreto se expande con el calor y tiende a contraerse al enfriarse, con la consiguiente posibilidad de agrietamiento.

2.3.0 CEMENTOS

2.3.1 DEFINICION

El cemento es un aglomerante hidráulico, el de mayor uso en la construcción sobre todo bajo la denominación de "portland" y proviene de la calcinación hasta la fusión incipiente de materiales calcáreos y arcillosos y posterior molienda muy fina del "clinker" que es el material resultante de la calcinación, con una pequeña adición de yeso.

2.3.2 HISTORIA

Podríamos considerar como el antecesor más antiguo del cemento a la mezcla de cal con puzolana usada por los romanos, quienes la usaron sin saber por qué, esta mezcla resultó mucho mejor que la cal pura para fabricar los morteros.

Durante la reconstrucción del faro de Edystone en 1756, el constructor John Smeaton, observó que el mejor mortero provenía de calizas con mayor porcentaje de arcilla y era resistente al agua, así Smeaton fue el primero en adquirir la noción de los aglomerantes hidráulicos (endurecen bajo el agua).

El siguiente en estudiar estos morteros fue el ingeniero francés J. L. Vincat, quien investigó el tema ampliamente.

En 1824, Joseph Aspolin, un albañil inglés, registró una patente para la fabricación de un cemento mejorado. Lo llamó "portland" por la semejanza de su color con las piedras de las islas de portland, su hijo William comenzó la fabricación del cemento.

Alrededor de 1850 en Europa y 1870 en los Estados Unidos, comienza la fabricación del cemento en forma industrial.

Inicialmente, el cemento fue usado como mortero de albañilería para ladrillos de edificaciones y piedras en cimentaciones y otros elementos, los ingenieros comenzaron a usar una mezcla de cemento, arena y piedra que en Francia llamaron "beton" y los americanos "concrete".

La producción del cemento fue 20 veces mayor entre 1900 y 1909, que durante la década precedente, este explosivo crecimiento se debió al descubrimiento del concreto reforzado.

2.3.3 FABRICACIÓN

Las materias primas para la fabricación del cemento están compuestas por óxidos en diferentes proporciones, los más importantes son el óxido de calcio y el óxido de sílice, en menor cantidad pero, también importantes el óxido de fierro, además, como impurezas, a veces nocivas el óxido de magnesio y los álcalis.

Al ser calcinadas las materias primas se combinan para formar los "compuestos", los que determinan el comportamiento futuro de las mezclas. Estos mismos compuestos se mantienen al ser molido el Clinker y con una adición de aproximada del 5% de yeso para controlar la fragua de los constituyentes del cemento.

Sin embargo, cuando se realiza un análisis químico del cemento, lo que éste nos proporciona, no son los compuestos sino los óxidos básicos ya mencionados; además de tres sustancias adicionales el anhídrido sulfurito, procedente del yeso agregado en la molienda, la pérdida por calcinación, que constituye el porcentaje de humedad del cemento y el residuo insoluble índice del grado de combinación de los óxidos en compuestos, valor que en un caso ideal debería ser cero.

El cemento al ser mezclado con agua se hidrata y los compuestos se transforman en compuestos hidratados, silicatos y aluminatos de calcio hidratados, formándose además hidróxido de calcio, al que se denomina portlandita.

Las cantidades de óxidos están dentro de los siguientes límites.

CaO 60% al 67%

SiO₂ 17% al 25%

Al₂O₃ 0.3% al 8%

F₂O₃ 0.5% al 6%

2.3.4 TIPOS DE CEMENTOS

La totalidad de los cementos empleados en el Perú son cementos portland tal como los especifica la Norma ASTM C 150; o cementos combinados, de acuerdo a lo indicado en la Norma ASTM C 595

De acuerdo a lo recomendado por la Norma ASTM C 150, los cinco tipos de cementos portland normal que pueden ser clasificados como estándar y cuya fabricación esta normada por requisitos específicos son:

- TIPO I : De uso general, donde no se requiere propiedades especiales.
- TIPO II : De moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación. Especialmente adecuados para ser empleados en estructuras en ambientes agresivos y/o vaciados masivos.
- TIPO III : De desarrollo rápido de resistencia con elevado calor de hidratación. Especiales para uso en los casos en que se necesita adelantar la puesta en servicios de las estructuras, o para uso en climas fríos.
- TIPO IV : De bajo calor de hidratación, recomendables para concretos masivos.
- TIPO V : Recomendables para ambientes muy agresivos por su alta resistencia a los sulfatos.

De estos cinco tipos en el Perú sólo se fabrican los Tipos I, II y V.

Si a los cementos se les ha añadido el sufijo A significa que son cementos a los que se ha añadido incorporadores de aire en su composición, manteniendo las propiedades originales. En el Perú no se fabrica este tipo de cementos.

Los denominados "cementos adicionados" son mezclas de cemento y un material de características puzolánicas molidos en forma conjunta. En el Perú se fabrican los Tipos IP, IPM, IS y ISM.

La justificación de la fabricación de los "cementos adicionados" es la necesidad, por una parte, de diluir la presencia de clínker en el conglomerante, cuyos productos hidrolizados pueden ser atacados según las circunstancias por agentes agresivos diversos, y producir la destrucción del concreto.

Por otra parte, la conveniencia de reducir, con esta dilución, el calor desarrollado en la hidrólisis, que actúa desfavorablemente en la puesta en obra de grandes masas de concreto (entre 0,002 y 0,004 cal/cm/°C) En el enfriamiento se producen contracciones importantes que pueden dar lugar a la formación de fisuras.

El cemento Tipo IP, es un cemento portland producido mediante la molienda conjunta de clínker de cemento portland y puzolana, en la cual la puzolana estará entre el 15% y el 40% del peso total.

El cemento Tipo IPM, es un cemento portland producido mediante la molienda conjunta de clínker de cemento portland que se le ha añadido puzolana en un porcentaje menor del 15% del peso total.

El cemento Tipo IS, es un cemento portland al que se le ha añadido entre el 25% y 70% de escoria de altos hornos referido al peso total.

El cemento Tipo ISM, es un cemento portland al que se le ha añadido menos del 25% de escoria de altos hornos referida al peso total.

Adicionalmente, en los Estados Unidos, para su empleo en casos especiales se fabrican los:

- a. **Cementos Expansivos y los Cementos compensantes de la expansión**, son diseñados para expandir un pequeño volumen durante los primeros días de hidratación y compensar los efectos de la contracción por secado. Su propósito es reducir el agrietamiento resultante de la contracción por secado. Su comportamiento radica en la formación de una cantidad de etringita mayor que la usual durante el proceso de hidratación, originándose una expansión. Este tipo de cemento está cubierto por la Norma ASTM C845.
- b. **Cementos de Escorias**, los que de acuerdo a la Norma ASTM C 358 son materiales finamente divididos que consisten esencialmente de escoria de altos hornos granulada, enfriada en agua, y cal hidratada. El porcentaje mínimo de escoria es de 60% en peso.
- c. **Cementos Reguladores de Fraguado**, los cuales son similares en su composición a los cementos portland, excepto que el clinker del cual son preparados contiene pequeñas cantidades de flúor. Se utiliza para tener un tiempo de fraguado inusualmente corto seguido por el desarrollo de una moderada resistencia inicial.
- d. **Cementos Naturales**, a los cuales la Norma ASTM C 10 define como al producto obtenido de la a calcinación de calizas arcillosas finamente pulverizadas. La temperatura de calcinación no deberá ser mayor que la necesaria para eliminar el dióxido carbónico.
- e. **Cementos Sobre sulfatados**, los cuales son productos que se obtienen de la mezcla y molienda íntima de escoria de altos hornos granulada, enfriada rápidamente, incluida en proporción de un 80% a 85%, y sulfato de calcio deshidratado, u otros tipos de sulfato de calcio hidratado o de anhidrita natural o artificial, incluido en proporción de un 10% a 15%, junto con 1% a 2% de cemento portland.
- f. **Cementos Aluminosos**, o de alto contenido de alúmina, se caracterizan por su color oscuro, su alta resistencia inicial, su alto calor de hidratación, y su resistencia a los ataques químicos. Se emplean principalmente en la industria de refractarios. Los cementos de baja pureza se utilizan igualmente para concretos que han de estar expuestos a medios ácidos y determinadas industrias de desechos, y para parchado y reparación cuando se necesitan muy altas resistencias iniciales.

-
- g. **Los cementos de Albañilería**, son compuestos de clinker de cemento portland, caliza, yeso y un agente incorporador de aire. Una mezcla de estos ingredientes es molida a una fineza mayor que la del cemento portland de alta resistencia inicial. Son utilizados en morteros de albañilería y están regulados por la Norma ASTM C 91 y su empleo está cubierto por la Norma ASTM C 270.
 - h. **Cementos para Inyecciones**, son cementos portland complementados con arena fina, bentonitas, bentonita y retardantes, en forma de partículas finamente molidas, se emplean para inyectar fisuras muy delgadas a alta presión.
 - i. **Cementos Metalúrgicos**, los cuales son mezclas finamente molidas de clinker portland con escoria de altos hornos y yeso para regular el tiempo de fraguado.
 - j. **Cementos Coloreados**, los cuales son fabricados bajo condiciones cuidadosamente controlados dan colores especiales, tales como el blanco o el amarillo ligero, los cuales son principalmente empleados en concretos arquitectónicos.
 - k. **Los Cementos Plásticos**, están dosificados para ser empleados en morteros para estucos. Son cementos portland modificados por pequeños porcentajes de aditivos que le dan al mortero fluidez y facilitan la aplicación del estuco.
 - l. **Los Cementos Impermeabilizantes**, o repelentes de agua, o cementos hidrófugos, son cementos portland molidos conjuntamente con ácido esteárico, u otro repelente de agua, con el objeto de impartir rechazo hacia el agua al concreto.
 - m. **Los Cementos Magnesio-Fosfato**, son cementos no portland que se emplean en el parchado de carreteras. Ellos pueden consistir en un polvo seco y un ácido fosfórico líquido con el cual se mezcla el polvo; o pueden consistir de un solo componente al cual se adiciona agua.

2.3.5 PROCESOS DE HIDRATACIÓN DEL CEMENTO

Es bastante complejo, y se ha estudiado exhaustivamente, existiendo varias teorías al respecto. En la actualidad se ha encontrado que lo que se produce es una combinación de las antiguas teorías y el producto final después de las reacciones previas resulta en un gel formado por cristales.

El gel del cemento se define como la pasta que se forma durante el proceso de hidratación del cemento.

COMPUESTOS DEL CEMENTO:

El comportamiento de las mezclas depende en gran medida de los compuestos del cemento:

- Silicato Tricalcico: denominado "alita", su símbolo es C_3S y es el que produce las resistencias iniciales, tiene un alto calor de hidratación.
- Silicato Bicalcico: o "belita", C_2S es el que provee las resistencias a plazos más largos.
- Aluminato Tricalcico: C_3A , no tiene influencia en la resistencia, pero si controla el tiempo de fraguado, es muy inestable al ataque químico.
- Ferro Aluminato Tetracalcico o Celita: C_4AF de muy poca influencia en el comportamiento del concreto.
- Óxido de Magnesio (MgO): Pese a ser un componente menor, tiene importancia pues para contenidos mayores del 5% trae problemas de expansión en la pasta hidratada y endurecida.
- Óxidos de Potasio y Sodio ($K_2O_2Na_2O \rightarrow$ Álcalis): Tienen importancia para casos especiales de reacciones químicas con ciertos agregados, y los solubles en agua contribuyen a producir eflorescencias con agregados calcáreos.
- Óxidos de Manganeso y Titanio ($Mn_2O_3TiO_2$): El primero no tiene significación especial en las propiedades del cemento, salvo en su coloración, que tiende a ser marrón si se tienen contenidos mayores del 3%. Se ha observado, que en casos donde los contenidos superan el 5% se obtiene disminución de resistencia, reduciéndola para contenidos superiores a 5%. Para contenidos menores, no tiene mayor trascendencia.

Fórmulas de Bogue:

$$Si = Al_2O_3 - Fe_2O_3 \geq 0.64$$

$$C_3S = 4,071 CaO - 7.6 SiO_2 - 6.718 Al_2O_3 - 1.43 F_2O_3 - 2.852 SO_3$$

$$C_2S = 2,867 SiO_2 - 0.7544 C_3S$$

$$C_3A = 2.65 Al_2O_3 - 1.692 Fe_2O_3$$

$$C_4AF = 3.04 Fe_2O_3$$

Si $Al_2O_3 / Fe_2O_3 < 0.64$ se forma $(C_4AF + C_2AF)$ y se calcula:

$$(C_4AF + C_2AF) = 2.1 Al_2O_3 + 1.702 Fe_2O_3$$

y en cuyo caso el silicato Tricalcico se calcula como:

$$C_3S = 4,071 CaO - 7.6 SiO_2 - 4.479 Al_2O_3 - 2.859 F_2O_3 - 2.852 SO_3$$

En estos cementos no hay C_3A por lo que la resistencia a los sulfatos es alta; el C_2S se calcula igual.

Cantidad de compuestos:

$$C_3S \longrightarrow 30\% \text{ al } 60\%$$

$$C_2S \longrightarrow 15\% \text{ al } 37\%$$

$$C_3A \longrightarrow 7\% \text{ al } 15\%$$

$$C_3AF \longrightarrow 8\% \text{ al } 10\%$$

2.3.6 NORMATIVIDAD

El cemento en el Perú es uno de los productos con mayor número de normas, que datan del inicio del proceso de normalización en el país.

Se cuenta con 7 normas sobre especificaciones, una de muestreo e inspección sobre adiciones y 30 sobre métodos de ensayo, según la relación que figura más adelante.

En la actualidad, la responsabilidad de la normalización se encuentra en el Instituto Nacional de Defensa para la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual-INDECOPI, creado por Ley N°2586 promulgada el 18/11/92.

La dación de normas se encuentra dentro de las atribuciones de una de las secretarías de INDECOPI, denominada Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales. INDECOPI como los organismos que lo antecedieron y la práctica internacional, efectúan la normalización por intermedios de comités técnicos tripartitos que congregan a especialistas de la producción, el consumo y la tecnología.

La normalización del cemento se lleva a cabo por el Comité Técnico Permanente de Normalización de Cementos y Cales, cuya gestión tiene a su cargo la Asociación de Productores de Cemento-ASOCEM quienes ejercen la secretaría técnica.

Inicialmente las normas adoptadas por la industria fueron las del American Society for Testing and Materials (ASTM), consignando en el rotulado del envase la designación correspondiente.

La primera entidad de normalización fue el Instituto Nacional Técnicas Industriales y Certificación-INANTIC creada por la ley de promoción industrial, Numero 13270 del 31/11/59. Entidad que aprobó una serie de normas sobre cemento.

Posteriormente, este organismo fue reemplazado por el Instituto de Investigación Tecnológica Industrial y de Normas Técnicas-ITINTEC, comprendido en la Ley General de Industrial, Decreto 18350 promulgada el 27/08/70, organismo que actualizó las normas existentes y formuló otras nuevas.

Normas peruanas de cemento:

Tabla2.1. Especificaciones de los Cementos

NTP 334.009 :1997	Cementos. Cemento Portland. Requisitos
NTP 334.044 :1997	Cementos. Cemento Portland Puzolánico IP y I (PM). Requisitos
NTP 334.050 :1984	Cementos. Cemento Portland Blanco tipo I. Requisitos
NTP 334.069 :1998	Cementos. Cemento de Albañilería. Requisitos
NTP 334.082 :1998	Cementos. Cemento Portland Adicionados. Especificación de la Performance
NTP 334.083 :1997	Cementos. Cemento Portland Adicionados tipos P y S
NTP 334.049 :1985	Cementos. Cemento Portland de Escoria tipo IS y tipo ISM. Requisitos
NTP 334.073 :1987	Cementos. Cemento Portland Compuesto tipo ICo. Requisitos

Tabla 2.2. Muestreo e Inspección de Cementos

NTP 334.007 :1997	Cementos. Muestreo e inspección
-------------------	---------------------------------

Tabla2.3. Puzolanas en el Cemento

NTP 334.066 : 1999	Cementos. Método de ensayo para determinar el índice de actividad puzolánico utilizando cemento portland.
NTP 334.055 : 1999	Cementos. Método de ensayo para determinar el índice de actividad puzolánico utilizando por el método de la cal.

Tabla 2.4. Productos en base a Cemento

NTP 339.005 : 1984	Elementos de Hormigón (Concreto). Ladrillos y Bloques usados en albañilería. Requisitos
NTP 339.008 : 1982	Bloques Huecos de Concreto para techos aligerados. Definiciones y requisitos.

2.3.7 REQUISITOS FÍSICOS Y QUÍMICOS

➤ REQUISITOS FÍSICOS

- a. Contenido de aire: Esta propiedad se determina con el objeto de detectar si en el cemento existe algún elemento que produzca, mayor cantidad de aire que el deseado, se mide en porcentaje de aire en mortero normalizado.
- b. Finura: El cemento debe tener finura necesaria para su completa hidratación, es por eso que existe un límite inferior en la norma, en términos de "Superficie Específica", expresada en m^2/kg
Teóricamente, esto significa la suma de la superficie externa de todos los granos de cemento (en m^2) que existe en 1kg de cemento.
- c. Resistencia a la compresión: Quizá la más importante de las propiedades, se realiza en cubos de mortero estándar de 5 cm de lado (arena normalizada) y según el tipo de cemento los requerimientos son 3,7 y 28 días.
- d. Expansión de autoclave: También un requisito muy importante para el cemento lo constituye la expansión al autoclave, en que la pasta de cemento en forma de barras (1" x 1" x 10") somete a la acción de autoclave (presión y temperatura). El no cumplimiento del requisito mínimo de norma indicaría la presencia de algún elemento expansivo. La importancia de este ensayo crece con el uso de la norma de performance en que no se consideran los requisitos químicos.
- e. Resistencia de sulfatos: Requisito también opcional, sólo considerado para el tipo V. Sin embargo en la norma de performance, es requisito obligatorio para los cementos MH y HS.
- f. Tiempo de fraguado: Están considerados como requisitos de norma los tiempos de fraguado inicial y final de la pasta de cemento ya que en las mezclas, éste no debe ser ni inmediato ni muy dilatado. Es importante no confundir fraguado con endurecimiento, ya que el primero es la forma de rigidez de la mezcla y el segundo es el desarrollo de la resistencia.
- g. Calor de hidratación: Este es un requisito opcional de la norma, para aquellos casos en que se realicen vaciados masivos y en que esta propiedad puede ser peligrosa.

➤ REQUISITOS QUÍMICOS

- a. Oxido de magnesio: Está limitado porque puede dar lugar a expansiones, sobre todo si se encuentra en forma de periclasa.
- b. Álcalis: Los álcalis son los óxidos de sodio y de potasio, los cuales pueden resultar peligrosos, en presencia de sílice amorfa (agregados) y humedad. Reacción álcali-agregado.
- c. Anhídrido sulfúrico: El SO_3 que aparece en el análisis químico del cemento, proviene del sulfato de calcio (yeso), agregado en la molienda del clínker, la limitación a este elemento se debe a problemas de futuras expansiones y alteración en el tiempo de fraguado.
- d. Perdida por calcinación: Mide el grado de humedecimiento del cemento, está también limitado por la norma, desde que al superar cierto valor, ya el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
- e. Residuo insoluble: Es un índice de la transformación de los óxidos en compuestos y no debe sobrepasar el límite establecido.
- f. Aluminato tricálcico: El más inestable de los compuestos está limitado por norma sobre todo en los cementos tipo II y tipo V, de moderada y alta resistencia a los sulfatos respectivamente, ya que el problema grave que se produce al ser atacado el concreto por sulfatos es la formación del sulfoaluminato de calcio hidratado "etringita", con fuertes expansiones.
- g. Reacción álcali – agregado: En nuestra norma, este requisito es opcional, ya que nunca se ha presentado en el Perú y solo recientemente se ha tenido noticias de agregados que podrían ser reactivos.

2.4.0 AGREGADOS

2.4.1 INTRODUCCIÓN

Sabemos que el concreto está conformado por una pasta de cemento y agua en la cual se encuentran embebidas partículas de un material conocido como agregado, el cual ocupa aproximadamente del 65% al 80% del volumen de la unidad cúbica de concreto.

La aceptación de un agregado para ser empleado en la preparación del concreto para una obra de características determinadas, deberá basarse en la información obtenida a partir de ensayos de laboratorio, de su registro de servicios bajo condiciones de obras similares, o de ambas fuentes de información.

En relación al tamaño de los tamices y al del agregado determinado mediante el empleo de tamices de ensayo, los valores pulgada-libra se muestran por conveniencia del usuario; sin embargo, la designación de tamices es el valor estándar tal como lo establece la Especificación ASTM E11.

2.4.2. PROPIEDADES DEL AGREGADO

- **Dureza:** Se define como dureza de un agregado a su resistencia a la erosión, abrasión o, en general, el desgaste. La dureza de las partículas depende de sus constituyentes.

La determinación de la dureza de un agregado se hace sometiéndolo a un proceso de desgaste por abrasión. El ensayo más empleado es el conocido como el Método de los Ángeles, realizado de acuerdo con lo especificado en la Norma ASTM C 131. Este método combina procesos de desgaste por abrasión.

- **Densidad:** La densidad de los agregados depende tanto de la gravedad específica de sus constituyentes sólidos como de la porosidad del material mismo.

- La densidad de los agregados es de especial importancia en todos aquellos casos en que, por resistencia o durabilidad, se requieren concretos con un peso por encima o debajo de aquel que corresponde a concretos usuales.

Las bajas densidades generalmente indican material poroso, poco resistente y de alta absorción. Tales características, cuando ello fuere necesario, deberán ser confirmadas por ensayos de laboratorio.

- Porosidad: La palabra "poro" define no ocupado por materia sólida en la partícula de agregado. Se considera a la porosidad como a una de las más importantes propiedades de éste y el papel que desempeña durante los procesos de congelación.

2.4.3 CLASIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS

2.4.3.1 POR SU ORIGEN

Por su origen los agregados se clasifican en:

- Agregados Naturales: Se considera como agregados naturales a las partículas que son el resultado de un proceso de obtención o transformación natural. Los agregados obtenidos por trituración mecánica y tamizado de rocas se consideran dentro de la clasificación de agregados naturales. Entre los principales grupos de agregados naturales se encuentran la arena y canto rodado de río o cantera; las arenas naturales muy finas; la piedra pómez natural y la lava volcánica porosa.
- Agregados Artificiales: se define como agregados artificiales a las partículas obtenidas con el resultado de un proceso de transformación industrial de un elemento natural, como el caso de las arcillas y esquistos expansionados; o como subproducto de un proceso industrial, como sería el caso de las arcillas de alto horno.

2.4.3.2 POR SU COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

Por su composición mineralógica los agregados pueden ser primordialmente:

- Silíceos
- Calcáreos

La forma en el cual los minerales principales se presentan, así como la presencia o ausencia de minerales secundarios, pueden ser más importantes que la composición promedio.

2.4.3.3 POR SU TAMAÑO

De acuerdo a su tamaño los agregados se clasifican en:

- Agregado Fino
- Agregado Grueso

Se define como agregado fino a aquel que pasa íntegramente el tamiz de 3/8" y como mínimo en un 95% el tamiz N° 4, quedando retenido en el tamiz N° 200. Se define como agregado grueso a aquel que queda retenido, como mínimo, en un 95% en el tamiz N° 4.

2.4.3.4 POR SUS PROPIEDADES FÍSICAS

Por la distribución de sus propiedades físicas a la calidad del concreto, el agregado puede clasificarse en cuatro categorías:

- Agregado Bueno: Se considera como agregado bueno aquel que por la superior calidad de sus constituyentes contribuye a una resistencia alta, tiene buena durabilidad bajo cualquier condición externa o interna, y es resistente a los procesos de erosión y abrasión.
- Agregado Satisfactorio: Se considera como agregado satisfactorio aquel cuyos elementos contribuyen a una moderada resistencia del concreto; e igualmente dan a éste resistencia a los procesos de erosión y abrasión, así como buena durabilidad bajo cualquier condición.
- Agregado Regular: Se considera como agregado regular aquellos cuyos constituyentes a obtener una moderada resistencia a la compresión y abrasión del concreto, pero bajo condiciones de clima pueden contribuir a su destrucción.
- Agregado Pobre: Se considera como un agregado pobre aquel cuyos constituyentes son de baja calidad y contribuyen a obtener bajas resistencias mecánicas y de abrasión del concreto; e igualmente causan destrucción del concreto bajo condiciones climáticas pobres.

2.4.3.5 POR SUS PROPIEDADES QUÍMICAS

La reactividad química de los constituyentes del agregado, especialmente con los álcalis del cemento, permite clasificarlos en: Inocuos; y Deletéreos.

Se denomina agregados inocuos a aquellos cuyos elementos constituyentes no participan en reacciones químicas dañinas al concreto.

Se denomina agregados deletéreos a aquellos que contienen materiales los cuales producen efectos adversos sobre el concreto debido a la reacción química que tiene lugar con posterioridad al endurecimiento de la pasta.

Las sustancias que se consideran deletéreas, en razón de su susceptibilidad al ataque por álcalis presentes en el cemento, no son peligrosas si se emplean con cementos que contienen menos del 0.6% de álcalis totales.

2.4.3.6 POR SU PESO

De acuerdo a su peso unitario, dado por su densidad, los agregados se clasifican en:

- Agregados Pesados: Los Agregados pesados naturales incluyen el espato pesado; la hematita, la magnetita, la limonita, la baritina, etc. Los artificiales incluyen trozos de hierro, bolas de metal, virutas de acero, limaduras de hierro, etc.
- Agregados de Peso Normal: Los de peso normal naturales, incluyen las arenas y cantos rodados de río o cantera, la piedra partida, etc. Entre los artificiales las escorias de alto horno, el clínker triturado, el ladrillo partido, etc.
- Agregados Livianos: Entre los agregados livianos naturales se encuentran la escoria volcánica y la piedra pómez. Entre los artificiales el clínker de altos hornos; las arcillas, pizarras y esquistos expandidos; la perlita, la vermiculita.

2.4.3.7 POR SU PERFIL

De acuerdo a su perfil las partículas de agregado comprenden siete grupos:

- Redondeado: El perfil redondeado comprende aquellas partículas totalmente trabajadas por el agua o completamente perfiladas por desgaste o frotamiento, tales como la grava de río o de mar.
- Irregular: El perfil angular comprende las gravas naturalmente irregulares o parcialmente perfiladas por desgaste y que tienen caras redondeadas, tales como las gravas de aluvión.

- Laminado: El perfil laminado comprende aquellas partículas en las cuales el espesor es pequeño con relación a las otras dos dimensiones.
- Angular: El perfil angular comprende aquellas partículas cuyos ángulos son bien definidos y están formados por la intersección de caras rugosas.
- Semiangular o Semiredondeado: Este comprende aquellas partículas algunos de cuyos ángulos están formados por la intersección de caras rugosas y otras que son redondeadas o tienden a serlo.
- Elongado: Comprende aquellas partículas, generalmente angulares, en las cuales la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones.
- Laminado y Elongado: Comprende aquellas partículas que tienen la longitud considerablemente mayor que el ancho, y éste considerablemente mayor que el espesor.

2.4.3.8 POR SU TEXTURA SUPERFICIAL

De acuerdo a su textura superficial, las partículas de agregado se clasifican en seis grupos:

- Textura Vítreo: Esta corresponde a aquellas partículas de agregado en las cuales se presenta fractura conchoidal, tales como el pedernal negro o la escoria vítrea.
- Textura Suave: La textura suave corresponde aquellas partículas de agregado en las cuales la textura ha sido suavizada por la acción del agua, tales como la grava o el mármol.
- Textura Granular: Corresponde a aquellas partículas de agregado que muestran en la zona de fractura granos redondeados más o menos uniformes, tales como las areniscas.
- Textura Rugosa: Corresponde agregados provenientes de rocas fracturadas de grano fino y medio, las cuales contienen elementos cristalinos no fácilmente visibles tales como el basalto, la felsita y la caliza.
- Textura Cristalina: Corresponde a aquellas partículas de agregado que presenta constituyentes cristalinos fácilmente visibles, tales como el granito, el gabro, el gneiss.

- Textura Alveolar: Corresponde a aquellas partículas de agregado que presentan poros y cavidades visibles, tales como el ladrillo, la piedra pómez y el clinker.

2.4.3.9 CLASIFICACION PETROGRÁFICA

La clasificación petrográfica de los agregados, de acuerdo a sus rocas originales, comprende diez grupos:

- a. Grupo Basalto: El cual incluye las andesitas, basalto, diabasa, porfidita básica, dolerita, epidiorita, hornablenda-esquisto, lamprófiro, cuarzo dolerita, espilita.
- b. Grupo Granito: El cual incluye el granito, granodiorita, cuarzo, diorita, gneiss, granulita, pegmatita, sienita.
- c. Grupo Hornfelsa: El cual incluye rocas de toda clase alteradas por contacto, con excepción del mármol.
- d. Grupo Pórfido: El cual incluye la aplita, dacita, felsita, riolita, granófiro, queratófiro, microgranito, pórfido, cuarzo porfidita, riolita, traquita.
- e. Grupo Pedernal: El cual incluye el pedernal y el horsteno.
- f. Grupo Gabro: El cual incluye la diorita básica, gabro, serpentina, peridotita, gneiss básico, hornablenda.
- g. Grupo Arenisca: El cual incluye el conglomerado, las areniscas, arcosa, brecha, cascajo, tufa.
- h. Grupo Caliza: El cual incluye la dolomita, la caliza, el mármol.
- i. Grupo Cuarzita: El cual incluye la arenisca cuarzítica, la cuarzita recristalina, el ganister.
- j. Grupo Esquisto: El cual incluye el esquisto, la pizarra, la filita y, en general, todas las rocas severamente cizalladas.

2.4.4 AGREGADO FINO

2.4.4.1 DEFINICIÓN

Se define como agregado fino a aquel proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, el cual pasa el tamiz NTP 9.4 mm (3/8") y cumple con los límites establecidos en las Normas NTP 400.037 o ASTM C 33.

2.4.4.2 REQUISITOS

El agregado podrá consistir de arena natural o manufacturada, o una combinación de ambas. Sus partículas serán limpias; de perfil preferentemente angular; duras; compactas y resistentes; libres de polvo, terrones, partículas escamosas o blandas, esquistos, pizarras, álcalis, materia orgánica, sales u otras sustancias dañinas para el concreto.

2.4.4.3 GRANULOMETRÍA

El agregado estará graduado dentro de los límites en las Normas NTP 400.037 ó ASTM C33. La granulometría seleccionada será preferentemente uniforme y continua, con valores retenidos en las mallas N° 4 a N° 100 de la serie Tyler. Se recomienda para el agregado los siguientes límites, mostrados en la tabla 2.5:

Tabla 2.5 Granulometría de los agregados

TAMIZ	PORCENTAJE QUE PASA
3/8" (9.50 mm)	100
N° 4 (4.75 mm)	95 a 100
N° 8 (2.36 mm)	80 a 100
N° 16 (1.18 mm)	50 a 85
N° 30 (600 micrones)	25 a 60
N° 50 (300 micrones)	10 a 30
N° 100 (150 micrones)	2 a 10

El porcentaje retenido en dos mallas sucesivas no excederá del 45%. Si el agregado es empleado en concretos con aire incorporado y un contenido de cemento mayor de 255 kg/cm³; o si el concreto es sin aire incorporado y un contenido de cemento mayor de 300 kg/cm³; o si una adición mineral aprobada es empleada para suplir las deficiencias en el porcentaje que pasa las mallas N° 50 y N° 100 podrá ser reducido a 5% y 0% respectivamente.

2.4.5 AGREGADO GRUESO

2.4.5.1 DEFINICIÓN

Se define como agregado grueso al material retenido en el tamiz NTP 4.75 mm (N° 4) y que cumple con los límites establecidos en las Normas ITINTEC 400.037 ó ASTM C 33.

2.4.5.2 CARACTERÍSTICAS

El agregado grueso puede consistir de piedra, grava natural o triturada, agregados metálicos naturales o artificiales, concreto triturado, o una combinación de ellos. Estará conformado por partículas cuyo perfil sea preferentemente angular o semi-angular, limpias, duras, compactas, resistentes, de textura preferentemente rugosa, y libres de material escamoso o partículas blandas.

Las partículas deberán ser químicamente estables y estarán libres de escamas, tierra, polvo, limo, sales, humus, incrustaciones superficiales, materia orgánica, u otras sustancias dañinas.

2.4.5.3 GRANULOMETRÍA

El agregado grueso estará graduado dentro de los límites especificados en las Normas NTP 400.037 o ASTM C 33.

La granulometría seleccionada deberá ser preferentemente continua y deberá permitir obtener la máxima densidad del concreto con una adecuada trabajabilidad en función de las condiciones de colocación de la mezcla. La granulometría seleccionada no deberá tener más del 5% del agregado retenido en la malla de 1½" y no más del 6% del agregado que pasa la malla de ¼".

2.4.5.4 TAMAÑO MÁXIMO

De acuerdo a la Norma NTP 400.037 el tamaño máximo del agregado grueso es el que corresponde al menor tamiz por el que pasa la muestra de agregado grueso.

Granulometrías muy disímiles pueden dar el mismo valor del tamaño máximo del agregado grueso. Ello debe tenerse presente en la selección del agregado, de su granulometría y las proporciones de la mezcla.

De acuerdo a la Norma NTP 400.037 se entiende por tamaño máximo nominal del agregado al que corresponde al menor tamiz de la serie utilizada que produce el primer retenido. El tamaño máximo nominal del agregado no deberá ser mayor de:

- a. Un quinto de la menor dimensión entre caras de encofrados; o
- b. Un tercio del peralte de las losas; o
- c. Tres cuartos del espacio libre mínimo entre barras o alambres individuales de refuerzo, paquetes de barras, tendones, o ductos de pre esfuerzo.

En elementos de espesor reducido, o ante la presencia de gran cantidad de armadura, se podrá disminuir el tamaño del agregado grueso siempre que se mantenga una adecuada trabajabilidad, se cumpla con el asentamiento requerido y se obtenga la resistencia especificada.

2.4.6 HORMIGÓN

El hormigón, conocido también en el Perú como agregado integral, es una mezcla natural, en proporciones arbitrarias, de grava y arena procedentes de río o cantera. Su granulometría deberá estar comprendida entre el material retenido en la malla N° 200 como mínimo y el que pase la malla de 2" como máximo.

En lo que sea aplicable se seguirán para el hormigón las recomendaciones correspondientes a los agregados fino y grueso. Siempre deberá efectuarse un análisis granulométrico a fin de determinar la proporción de agregados fino y grueso presente en el agregado integral. Las características físicas se determinan teniendo en consideración el porcentaje de cada uno de los agregados componentes.

El hormigón deberá estar libre de cantidades perjudiciales de polvo, terrones, partículas blandas o escamosas, sales, álcalis, materia orgánica, u otras sustancias dañinas para el concreto.

2.4.7 CONSIDERACIONES GENERALES

En relación con los agregados empleados en la preparación del concreto:

- a. Los agregados de peso normal cumplirán con los requisitos de la Norma NTP 400.037 ó ASTM C 33 en su caso, o los de las especificaciones del proyecto.
- b. El empleo de agregados livianos o pesados deberá estar referido a las Normas ASTM correspondientes.
- c. Los agregados seleccionados deberán ser aprobados por la supervisión.
- d. Las especificaciones técnicas del proyecto podrán indicar requisitos especiales.
- e. El contratista deberá emplear en obra agregados de calidad igual o superior a la indicada en las especificaciones del Proyecto.

2.5.0 EL AGUA PARA EL CONCRETO

2.5.1 CONCEPTOS GENERALES

El agua presente en la mezcla de concreto reacciona químicamente con el material cementante para lograr:

- a. La formación de gel
- b. Permitir que el conjunto de la masa adquiera las propiedades que en estado no endurecido faciliten una adecuada manipulación y colocación de la misma; y en estado endurecido la conviertan en un producto de las propiedades y características deseadas.

Como requisito de carácter general y sin que ello implique la realización de ensayos que permitan verificar su calidad, se podrá emplear como aguas de mezclado aquellas que se consideren potables, o las que por experiencia se conozca que pueden ser utilizadas en la preparación del concreto.

Nos hemos referido anteriormente respecto al agua como elemento indispensable para la hidratación del cemento y el desarrollo de sus propiedades, por lo tanto este componente debe cumplir ciertos requisitos para llevar a cabo su función en la combinación química, sin ocasionar problemas colaterales si tiene ciertas sustancias que pueden dañar al concreto.

Complementariamente, al evaluar el mecanismo de hidratación del cemento, se puede analizar adicionalmente el agua adicional para el curado pues produce una hidratación adicional al cemento, luego esta agua debe cumplir también algunas condiciones para poderse emplearse en el concreto.

Nos referiremos más adelante de estos dos aspectos, sin tocar campos especiales como son los efectos de variaciones en la presión de poros, así como las situaciones de temperatura extremas en el concreto que ocasionan comportamientos singulares del agua.

2.5.2 EL AGUA DE LA MEZCLA

El agua de mezcla en el concreto tiene tres funciones principales:

- a. Reaccionar con el cemento para hidratarlo,
- b. Actuar como lubricante para contribuir a la trabajabilidad del conjunto
- c. Procurar la estructura de vacíos necesaria en la pasta para que los productos de hidratación tengan espacio para desarrollarse.

Por lo tanto, la calidad de agua que interviene en la mezcla de concreto es normalmente por razones de trabajabilidad, mayor de la necesaria para la hidratación del cemento. El problema principal del agua de mezcla reside en las impurezas y la cantidad de éstas, que ocasionan reacciones químicas que alteran el comportamiento normal de la pasta de cemento.

Una regla empírica que sirve para estimar si determinada agua sirve o no para emplearse en la producción de concreto, consiste en establecer su habilidad para el consumo humano, ya que lo que no daña al hombre no daña al concreto.

En este sentido, es interesante distinguir el agua potable en términos de los requerimientos nominales establecidos por los organismos que regulan su producción y uso, y el agua apta para el consumo humano, ya que los requerimientos aludidos normalmente son más exigentes de lo necesario.

En el Perú existen muy pocas "aguas potables" que cumplen con las limitaciones nominales indicadas, sobre todo en lo que se refiere al contenido de sulfatos y carbonatos, sin embargo sirven para el consumo humano y consecuentemente para el concreto, por lo que no debe cometerse el error de establecer especificaciones para agua que luego no se puede satisfacer en la práctica. No existe un patrón definitivo en cuanto a las limitaciones en composición química que debe tener el agua de mezcla, ya que incluso aguas no aptas para el consumo humano sirven para preparar el concreto por otro lado depende mucho del tipo de cemento y las impurezas de los demás ingredientes.

Los efectos más perniciosos que pueden esperarse de aguas de mezcla con impurezas son: retardo en el endurecimiento, reducción de la resistencia, manchas en el concreto endurecido, eflorescencias, contribución a la corrosión del acero, cambios volumétricos, etc.

Las Normas internacionales del ACI y ASTM no establecen requisitos para el agua de mezcla para el concreto, sin embargo, la Norma peruana NTP339.088 si establece requisitos para agua de mezcla y curado y se detallan en la tabla. 2.6

TABLA 2.6.- Límites permisibles para agua de mezcla y de curado según la NTP 339.088

DESCRIPCIÓN	LÍMITE PERMISIBLE (máx.)
Sólidos en suspensión	5000 p.p.m(5gr/l)
Materia orgánica	3 p.p.m (3mg/l)
Alcalinidad (carbonatos y bicarbonatos alcalinos) (NaHCO ₃)	1000 p.p.m(1gr/l)
Sulfato (Ión SO ₄)	600 p.p.m (0.6gr/l)
Cloruros(ión Cl)	1000 p.p.m(1gr/l)
Ph	5 a 8

En la tabla 2.7 veremos algunos análisis de agua empleada en la preparación de concreto en proyectos ejecutados en diferentes regiones de nuestro país, donde se pueden apreciar las variaciones factibles de esperarse en cuanto a la composición.

TABLA 2.7.- Análisis químicos de agua de varias fuentes en el Perú

Descripción	San Juan de Miraflores	Planta "La Atarjea" Lima	Sub-suelo zona Aeropuerto de Juliaca Puno	Agua de riego "Proyecto Majes" Arequipa	Requisito NTP339.088
Sólidos en suspensión	260 p.p.m.	500 p.p.m.		28 p.p.m.	5000 p.p.m.(5gr/l)

Materia orgánica				27 p.p.m.	3 p.p.m.(3mg/l)
Alcalinidad (carbonatos y bicarbonatos alcalinos) (NaHCO ₃)	20 p.p.m.	25 p.p.m.	12 p.p.m.	186 p.p.m.	1000 p.p.m.(1gr/l)
Sulfato (ión SO ₄)	156 p.p.m.	133 p.p.m.	34 p.p.m.	150 p.p.m.	600 p.p.m.(0.6gr/l)
Cloruros (ión Cl ⁻)	197 p.p.m.	45 p.p.m.	33 p.p.m.	141 p.p.m.	1000 p.p.m.(1gr/l)
Ph	7.8	7.9	7.9	7.5	5 a 8

Existe evidencia experimental que el empleo de aguas con contenidos individuales de cloruros, sulfatos y carbonatos sobre los 5000 p.p.m. ocasiona reducción de resistencias hasta el orden del 30% con relación a concretos con agua pura.

Los carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio pueden acelerar o retardar el fraguado cuando la suma de sales disueltas tiene concentraciones sobre 1000 p.p.m., por lo que es recomendable en estos casos hacer pruebas de tiempo de fraguado. Hay evidencias que en estas condiciones pueden incrementarse las reacciones álcali-sílice en los agregados.

Los carbonatos de calcio y magnesio no son muy solubles en el agua y en concentraciones hasta de 400 p.p.m. no tienen efectos perceptibles en el concreto.

El sulfato de magnesio y el cloruro de magnesio en contenidos hasta de 25 p.p.m no han ocasionado efectos negativos en investigaciones llevadas a cabo en USA, pero sales de zinc, cobre, y plomo como las que pueden tener aguas contaminadas con relaves mineros, en cantidades superiores a 500 p.p.m tienen efectos muy negativos tanto en el fraguado como en las resistencias.

La materia orgánica por encima de las 1000p.p.m. reduce resistencia e incorpora aire.

2.5.3 EL AGUA PARA CURADO

En general, los mismos requisitos que se exigen para el agua de mezcla deben ser cumplidos por las aguas para curado, y por otro lado en las obras es usual emplear la misma fuente de suministro de agua tanto para la preparación como para el curado del concreto.

No obstante lo mencionado, si revisamos lo ya evaluado con respecto al mecanismo de hidratación del cemento y la estructura de la pasta, podemos concluir, que el agua adicional que puede contribuir a hidratar al concreto proveniente del curado, representa una fracción solamente del agua total (alrededor de la quinta parte en volumen absoluto), por lo que las limitaciones para el caso del agua de la mezcla, pudiendo aceptarse reducirlas a la mitad en la mayoría de los casos.

Otro factor que incide en esta consideración es que el agua de curado permanece relativamente poco tiempo en contacto con el concreto, pues en la mayoría de especificaciones el tiempo máximo exigido para el curado con agua no supera los 14 días.

2.6 ADITIVOS

2.6.0 DEFINICIÓN

Un aditivo es definido, tanto por el Comité 116R del American Concrete Institute como por la Norma ASTM C 125, como "un material que no siendo agua, agregado, cemento hidráulico, o fibra de refuerzo, es empleado como un ingrediente del mortero o concreto, y es añadido a la tanda inmediatamente antes o durante su mezclado".

Los aditivos son materiales utilizados como componentes del concreto o el mortero, los cuales se añaden a éstos durante el mezclado a fin de:

- a. Modificar una o algunas de sus propiedades, a fin de permitir que sean más adecuados al trabajo que se está efectuando;
- b. Facilitar su colocación
- c. Reducir los costos de operación

En la decisión sobre el empleo de aditivos debe considerarse en qué casos:

- a. Su utilización puede ser única alternativa para lograr los resultados deseados.
- b. Los objetivos deseados pueden lograrse, con mayor economía y mejores resultados, por cambios en la composición o proporciones de la mezcla.

2.6.1 CONDICIONES Y RAZONES DE EMPLEO

Los aditivos utilizados deberán cumplir con los requisitos de las Normas ASTM o INDECOPI correspondientes. Su empleo deberá estar indicado en las especificaciones del proyecto, o de ser aprobado por la supervisión.

El empleo de aditivos incorporadores de aire es obligatorio en concretos que, en cualquier etapa de su vida, pueden estar expuestos a temperaturas ambiente menores de 0 °C. En otros casos, el empleo de estos aditivos sólo es obligatorio cuando puede ser la única alternativa para lograr los resultados deseados. El empleo de aditivos no autoriza a disminuir el contenido de cemento seleccionado para la unidad cúbica de concreto.

Entre las principales razones de empleo de aditivos, para modificar las propiedades del concreto no endurecido, se puede mencionar:

- a. Reducción en el contenido de agua de la mezcla;
- b. Incremento en la trabajabilidad sin modificación del contenido de agua; o disminución del contenido de agua sin modificación de la trabajabilidad;
- c. Reducción, incremento o control del asentamiento;
- d. Aceleración o retardo del tiempo de fraguado inicial;

- e. Modificación de la velocidad y/o magnitud de la exudación;
- f. Reducción o prevención de la segregación; o desarrollo de una ligera expansión;
- g. Mejora en la facilidad de colocación y/o bombeo de las mezclas.

Entre las principales razones de empleo de los aditivos para modificar las propiedades de los concretos, morteros o lechada endurecidos se puede mencionar:

- a. Retardo en el desarrollo del calor de hidratación o reducción en la magnitud de éste durante el endurecimiento inicial;
- b. Aceleración en la velocidad de desarrollo de la resistencia inicial y/o final del concreto y en el incremento de la misma;
- c. Incremento en la durabilidad, incluyendo su resistencia a condiciones severas de exposición;
- d. Disminución de la impermeabilidad del concreto;
- e. Control de expansión debida a la reacción álcali-agregados;
- f. Incremento en las adherencias acero-concreto; y concreto antiguo-concreto fresco;
- g. Incremento en las resistencias al impacto y/o abrasión;
- h. Control de corrosión de los elementos metálicos embebidos en el concreto;
- i. Producción de concretos o morteros celulares;
- j. Producción de concretos o morteros coloreados;

2.6.2 CLASIFICACIÓN

Una clasificación de aditivos en función de sus defectos no es fácil debido a que ellos pueden ser clasificados genéricamente o con relación a los efectos característicos derivados de su empleo; pueden modificar más de una propiedad del concreto, así como a que los diversos productos existentes en el mercado no cumplen las mismas especificaciones.

En las clasificaciones que a continuación se presentan, aquellos aditivos que poseen propiedades identificables con más de un grupo son considerados en aquel que identifica a sus efectos más importantes.

De acuerdo a la Norma ASTM C 494, los aditivos se clasifican en:

TIPO A	Reductores de agua.
TIPO B	Retardadores de fragua.
TIPO C	Acelerantes.
TIPO D	Reductores de agua-retardadores de fragua.
TIPO E	Reductores de agua-acelerantes.
TIPO F	Súper Reductores de agua.
TIPO G	Súper Reductores de agua-Acelerantes.

Existen otros tipos de clasificaciones de aditivos de acuerdo a los efectos de su empleo o a los tipos de materiales constituyentes. La recomendación ACI 212 clasifica a los aditivos en los siguientes grupos:

- a. ACELERANTES, los cuales tienen por finalidad incrementar significativamente al desarrollo inicial de resistencia en compresión y/o acortar el tiempo de fraguado. Deberá cumplir con los requisitos de las Normas ASTM C 494 o C 1017, o de la Norma NTP 339.086 o 339.087.
- b. INCORPORADORES DE AIRE, los cuales tienen por objetivo mejorar el comportamiento del concreto frente a los procesos de congelación y deshielo que se producen en sus poros capilares cuando está saturado y sometido a temperaturas bajo 0 °C. Estos aditivos deberán cumplir con los requisitos de la Norma NTP 339.086 o de la Norma ASTM C 260
- c. REDUCTORES DE AGUA Y REGULADORES DE FRAGUA, los cuales tienen por finalidad reducir los requisitos de agua de la mezcla o modificar las condiciones de fraguado de la misma, o ambas. Deberán cumplir con los requisitos de las Normas NTP 339.086 o 339.087, o de las Normas ASTM C 494 o C 1017
- d. ADITIVOS MINERALES, ya sean cementantes o puzolánicos, los cuales tienen por finalidad mejorar el comportamiento en estado fresco de mezclas deficientes en las partículas muy finas y, en algunos casos, incrementar la resistencia final del concreto.

Las puzolanas y las cenizas deberán cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 618. Las escorias de alto horno finamente molidas y los micros sílices deberán cumplir con los requisitos de la Norma ASTM C 989. A los aditivos de este grupo en la actualidad se les considera como adiciones.

- e. GENERADORES DE GAS, los cuales tienen por finalidad controlar los procesos de exudación y asentamiento mediante la liberación de burbujas de gas en la mezcla fresca.
- f. ADITIVOS PARA INYECCIONES, los cuales tienen por finalidad retardar el tiempo de fraguado en cimentaciones especiales en las que las distancias de bombeo son muy grandes.
- g. PRODUCTORES DE EXPANSION, los cuales tienen por finalidad minimizar los efectos adversos de la contracción por secado del concreto.
- h. LIGANTES, los cuales tienen por única finalidad incrementar las propiedades ligantes de mezclas mediante la emulsión de un polímero orgánico.
- i. AYUDAS PARA BOMBEO, las cuales tienen por finalidad mejorar la facilidad de bombeo del concreto por incremento de la viscosidad del agua de la mezcla.
- j. COLORANTES, los cuales tienen por finalidad producir en el concreto el color deseado sin afectar las propiedades de la mezcla.
- k. FLOCULANTES, los cuales tienen por finalidad incrementar la velocidad de exudación y disminuir el volumen de ésta, al mismo tiempo que reducen el flujo e incrementan la cohesividad y rigidización inicial de la mezcla.
- l. FUNJICIDAS; INSECTICIDAS Y GERMICIDAS, los cuales tienen por finalidad inhibir o controlar el crecimiento de bacterias y hongos en pisos y paredes
- m. IMPERMEABILIZANTES, los cuales tiene por finalidad contribuir a controlar las filtraciones a través de las grietas, reduciendo la penetración del agua, en un concreto no saturado, desde el lado húmedo al lado seco.
- n. REDUCTORES DE PERMEABILIDAD, los cuales tienen por finalidad reducir la velocidad con la cual el agua puede circular a través de un elemento de concreto saturado, bajo una gradiente hidráulica mantenida externamente.
- o. CONTROLADORES DE LA REACCION ÁLCALI-AGREGADO, los cuales tienen por finalidad reducir, evitar o controlar la reacción entre los álcalis del cemento y elementos que puedan estar presentes en los agregados reactivos.

- p. INHIBIDORES DE LA CORROSION, los cuales tiene por finalidad inhibir, retardar o reducir la corrosión del acero de refuerzo y elementos metálicos embebidos en el concreto.
- q. SUPERPLASTIFICANTES, también conocidos como aditivos reductores de agua de alto rango, los cuales tiene por finalidad reducir en forma importante el contenido de agua del concreto manteniendo una consistencia dada y sin producir efectos indeseables sobre el fraguado. Igualmente se emplean para incrementar el asentamiento sin necesidad de aumentar el contenido de agua de la mezcla.

2.6.3 PRECAUCIONES EN EL EMPLEO DE ADITIVOS

- El empleo de aditivos está sujeto a lo indicado en las especificaciones del proyecto o a la aprobación previa de la Supervisión. Su empleo no autoriza a disminuir el contenido de cementante de la mezcla. Los aditivos empleados deberán cumplir con los requisitos de la Norma NTP 339.086 o de las Normas ASTM indicadas.
- Los aditivos empleados en obra deberán ser del mismo tipo, marca, composición, concentración y comportamiento que los utilizados para la selección de las proporciones de la mezcla.
- Los aditivos deberán emplearse únicamente después de evaluar sus efectos, bajo condiciones similares a las de obra
- Los aditivos empleados en forma de solución no estable o suspensión deberán ser incorporados a la mezcla empleando equipo dispersante a fin de garantizar una adecuada distribución.

Siempre que se emplee aditivos, el Proyectista y el Contratista deberán recordar que:

- a. En determinados casos puede ser más conveniente variar el tipo o marca de cemento, la cantidad del mismo, la granulometría del agregado, o las proporciones de la mezcla;
- b. Algunos aditivos tienen efecto sobre más de una propiedad del concreto, pudiendo actuar adversamente sobre una deseable.
- c. El efecto de un aditivo puede ser modificado por los contenidos de cemento y agua en la mezcla; el tipo y la granulometría del agregado; y la forma y los aditivos que modifican las propiedades del concreto fresco pueden originar problemas si producen rigidización demasiado rápida o prolongación excesiva del tiempo de fraguado. Siempre deben verificarse estos aspectos mediante ensayos previos.

Los cloruros de calcio o de sodio, o los aditivos que contengan cloruros que sean impurezas de los componentes del aditivo, no deberán emplearse en:

- a. Concreto pre-esforzado o pos-tensado.
- b. Concreto con elementos embebidos de aluminio o fierro galvanizado.
- c. Concretos colocados en encofrados de metal galvanizado.
- d. Concretos masivos; y
- e. Concretos colocados en zonas de clima cálido.

CAPÍTULO III

DURABILIDAD DEL CONCRETO

3.1.0 CONGELACIÓN Y DESHIELO

3.1.1 ACCION DE LA HELADA

El clima frío afecta la durabilidad del concreto de no adoptarse precauciones particulares. La tecnología apropiada se estudia bajo diferentes denominaciones como "concreto en invierno", "efecto de ciclos de hielo y deshielo", y ocasionalmente en nuestro medio como "concreto en altura".

El efecto de los problemas generados por las bajas temperaturas tiene importancia económica, puede hacer de la construcción una actividad estacional, obliga a elevar el costo de las obras y en caso de emplearse productos de deshielo, disminuya la durabilidad del concreto.

Cuando las bajas temperaturas no llegan a producir heladas, entre 10 y 0°C el comportamiento del concreto fresco se diferencia del que se presenta entre 20 y 30°C. En un clima frío la trabajabilidad se incrementa, el fraguado final se retarda y la generación de resistencia de compresión difiere considerablemente.

En el caso de producirse heladas durante la puesta en obra, de congelarse el concreto antes de fraguar se incrementa el volumen total y se retrasa el endurecimiento. Es también posible que no llegue a obtener resistencia.

Si la congelación ocurre a edad temprana, la expansión causa la fractura del concreto. Si el concreto alcanza resistencia previa, puede superar la acción de las heladas, dependiendo del número de ciclos de congelación, de la permeabilidad y del régimen de lluvias.

La experiencia informa que los concretos bien dosificados y contruidos, que han adquirido suficiente resistencia antes del proceso de hielo/deshielo, presentan adecuada durabilidad. Este comportamiento es más favorable en estructuras verticales que en las horizontales. La resistencia a las heladas depende entre otros que el concreto adquiera previamente una resistencia de 75 kg/cm², que el concreto no esté en estado de saturación de agua y de la estructura interna del concreto.

Los comités dedicados al estudio del concreto refieren criterios de comportamiento frente a exposiciones moderadas y severas a heladas y deshielos:

EL Comité 306 del ACI, define el clima frío como aquel que durante tres días consecutivos tiene un promedio de temperatura de aire a 5°C y la temperatura no es mayor a 10°C por más de hora y media por un periodo de 24 horas.

EL Comité 211 del ACI, clasifica los siguientes climas, sujeto a heladas

Exposición Moderada: Servicio en un clima donde se espera congelamiento pero donde el concreto no estará expuesto continuamente a humedad o al agua por largos periodos de tiempo antes del congelamiento y no estará expuesto a los agentes de deshielo u otros agentes abrasivos.

Los ejemplos incluyen: vigas exteriores, columnas, paredes, vigas maestras o losas que no están en contacto con el suelo húmedo o están ubicadas de tal modo que no reciben las aplicaciones directas de las sales del deshielo.

Exposición Severa: El concreto expuesto a los agentes químicos de deshielo u otros agentes abrasivos o donde el concreto puede saturarse debido al contacto continuo de la humedad o el agua antes descongelamiento. Los ejemplos incluyen: pavimentos, losas de puentes, rebordes, cunetas, veredas, canales o tanques externos de agua o letrinas.

3.1.2 EL CASO PERUANO

En el mapa de la Figura 3.1 se observa los climas fríos y frígidos, ubicados a lo largo de la cordillera de los andes en el Perú. Las temperaturas inferiores a 10 °C son propias de ciudades como Abancay, Arequipa, Ayacucho, Cajamarca, Huancavelica, Huancayo y Huaraz.

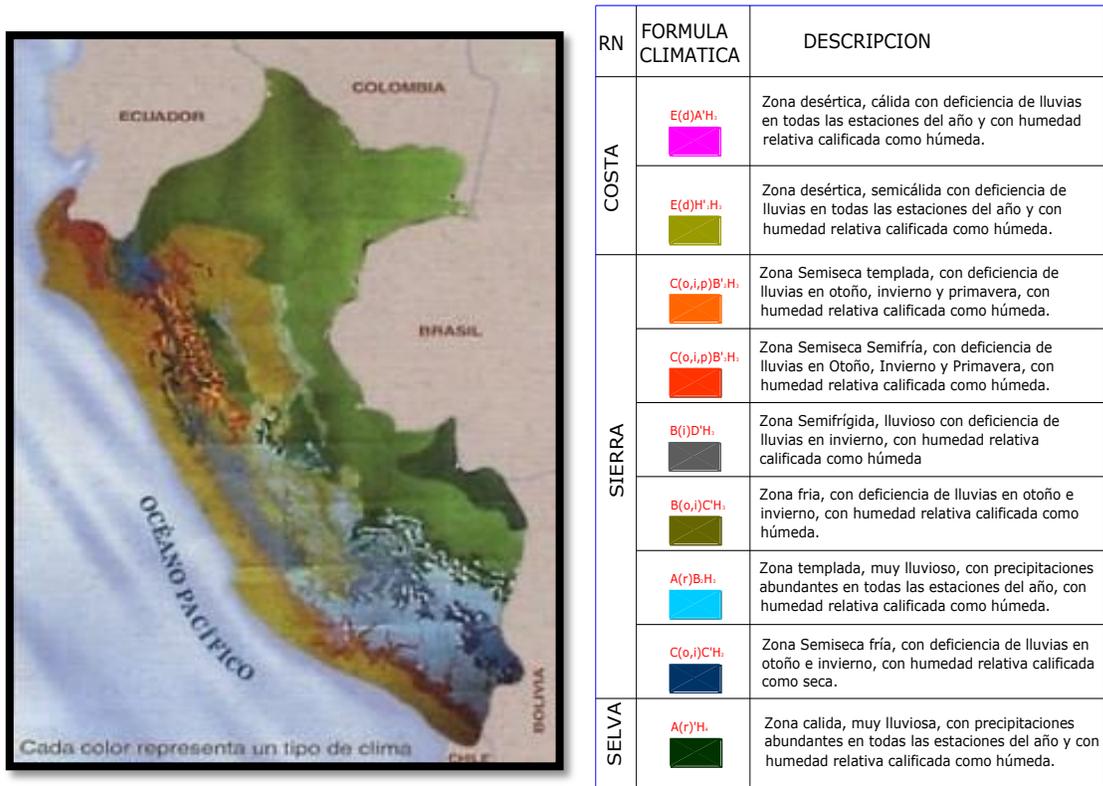


Figura 3.1 Mapa climatológico, con las fórmulas climáticas de acuerdo a las regiones naturales

Las ciudades donde la temperatura descienden a 0°C son Cerro de Pasco, Cusco y Puno.

En alturas comprendidas entre los 1500 y 3500 m.s.n.m. las temperaturas son bajas y excepcionalmente se producen heladas, generalmente entre noviembre y marzo.

Los inviernos son secos y sin lluvias.

Por encima de los 3500 m.s.n.m. las heladas se producen durante los meses de mayo, junio, julio, agosto y setiembre.

En estas zonas llueve con gran intensidad en los meses de verano. En zonas elevadas el clima es frío con ciclos de heladas y seco con precipitaciones de lluvia, granizo y nieve. En las partes más altas, a 4800 m.s.n.m. el clima es glacial permanentemente inferior a los 0°C llegando en los casos extremos de 25°C bajo cero.

De acuerdo a esta descripción los climas fríos corresponden a las zonas de menor desarrollo relativo, donde el concreto se emplea eventualmente en contadas obras de infraestructura hidráulica y en muy pequeña proporción en obras de edificación.

En la tabla 3.2 se pre producen las tablas de temperaturas mensuales y de precipitaciones en las ciudades de Pasco, Cusco, Puno.

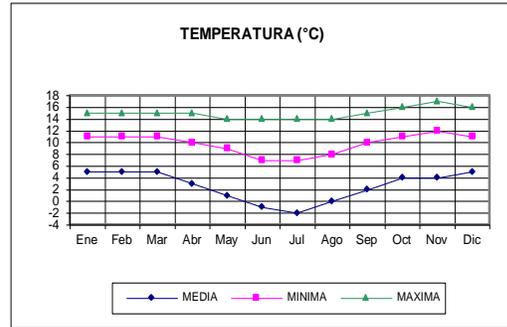
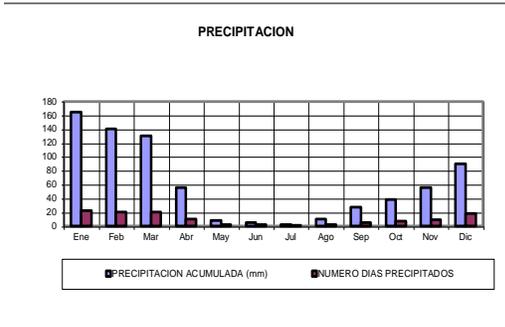
En la tabla 3.1 se observa para estos últimos departamentos el consumo per cápita de cemento, en todos ellos inferior al promedio del Perú de 148 k/hab., el porcentaje de consumo de cemento sobre el total nacional y el porcentaje de vivienda de concreto sobre el total en el departamento.

TABLA 3.1 Consumo per cápita de cemento

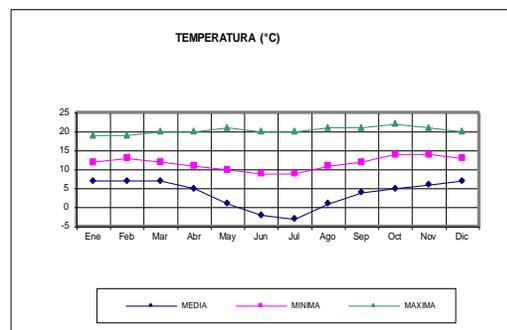
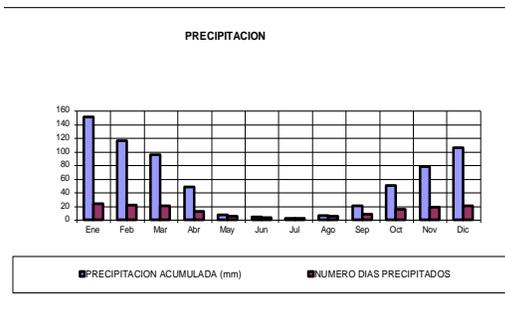
Departamentos	Consumo de cemento		% Viviendas de Concreto (Dpto.)
	Per capita kg/h	% del nacional	
Del Perú			
Pasco	26	1.76	3.88
Cuzco	6	1.99	1.8
Puno	13	4.4	7.23

Tabla 3.2 Temperaturas mensuales y de precipitaciones en las ciudades de Pasco, Cusco, Puno

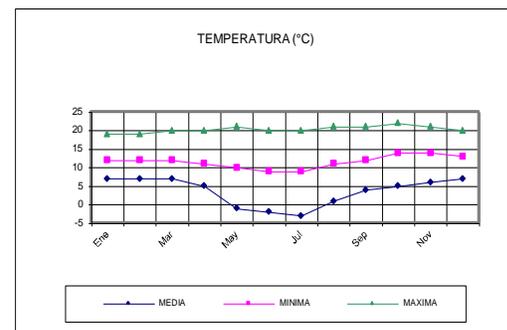
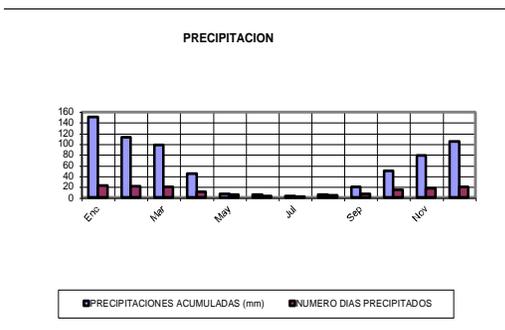
PUNO



CUSCO



CERRO DE PASCO

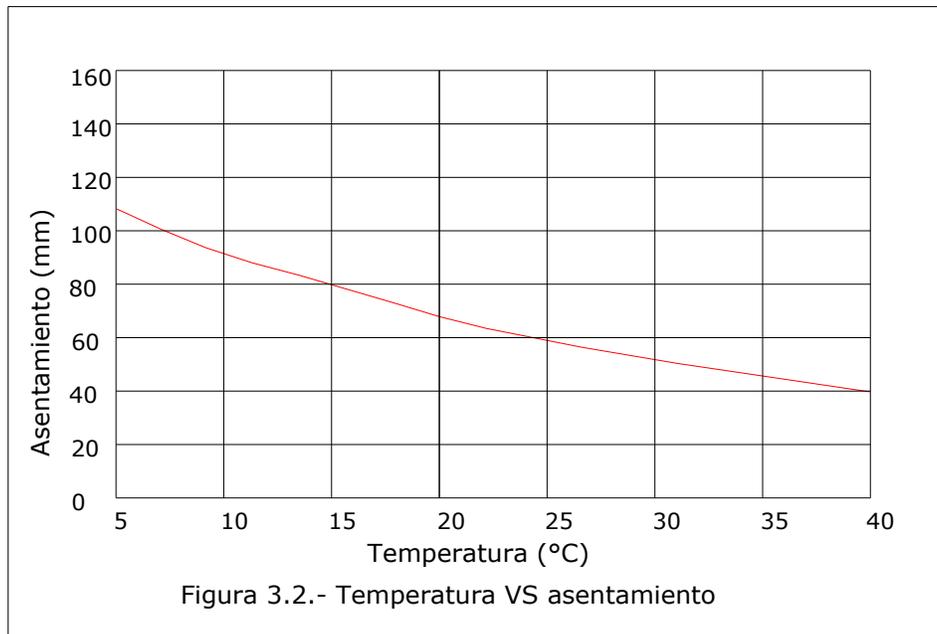


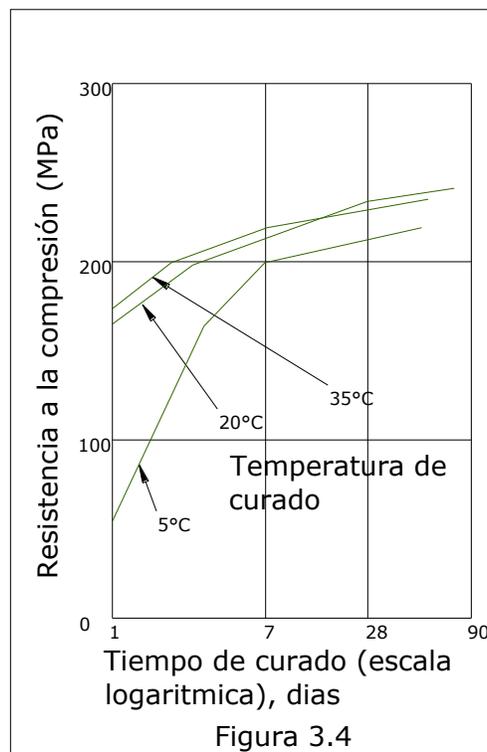
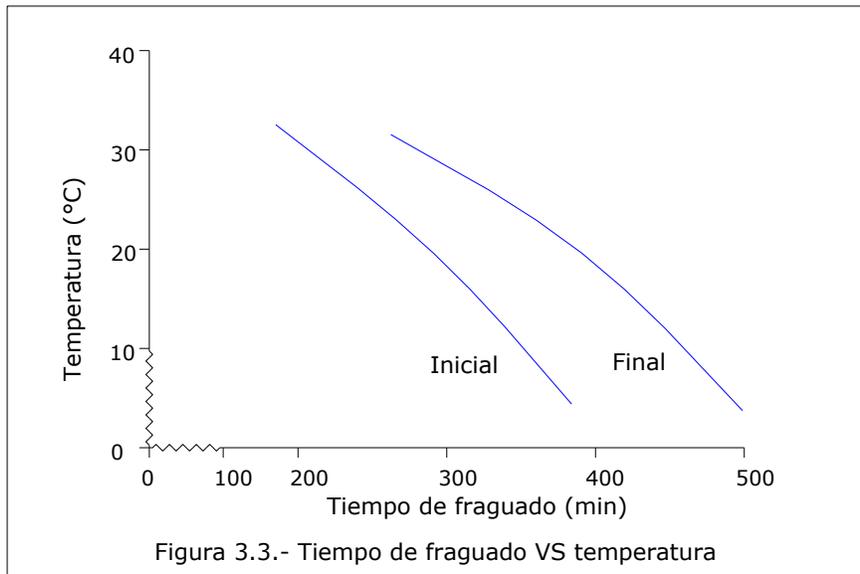
- DE LAS REGIONES FRIAS

En las zonas con temperaturas entre 10 y 0°C, existe un comportamiento particular del concreto fresco, para lograr un mismo asentamiento del pastón se requiere de menor cantidad de agua que la usual para un mismo concreto entre los 20 y 30°C (Fig. 3.2).

También el fraguado inicial se retarda y el fraguado final se posterga de manera significativa (Fig. 3.3).

En cuanto a las resistencias mecánicas se obtienen resultados diminutos en las primeras edades, si bien la recuperación es notable a los 90 días, alcanzando la que corresponde a un curado normalizado (Fig.3.4).





3.1.3 MECANISMO DE CONGELACIÓN

Alrededor del 25% del tiempo se dan condiciones ambientales en la altura correspondientes a clima frío con temperaturas por debajo de 0°C, lo que puede producir el congelamiento del agua contenida en los poros capilares del concreto, haciendo que se expanda hasta un 9% e induciendo esfuerzos internos de tracción que puedan provocar su fisuración inmediata o por fatiga al repetirse varias veces el ciclo congelamiento-deshielo.

En términos muy simples, al congelarse el agua internamente y expandirse, va desplazando el agua aún en estado líquido que al no tener espacio adicional soporta las presiones de la expansión y las transmite al concreto, hasta que superan la capacidad resistente de éste y lo fisuran, o lo dejan tensionado hasta que se liberan con el deshielo. Si la fisuración no ocurre en el primer ciclo, la fatiga por repetición de los ciclos acaba haciéndolo. Powers y sus investigadores asociados llevaron a cabo extensas investigaciones sobre la acción del frío en el concreto desde 1933 hasta 1961. En este periodo pudieron desarrollar algunas hipótesis razonables para explicar los complejos mecanismos que intervienen en el proceso.

3.1.3.1 EL CONGELAMIENTO DE LA PASTA DE CEMENTO

Powers en sus primeros trabajos atribuían el daño causado por el congelamiento a la pasta de cemento a los esfuerzos ocasionados por presiones hidráulicas en los poros. Y enseñaba que la presión se debía a la resistencia al movimiento del agua para alejarse de las zonas en que se da el congelamiento; se creía que la magnitud de la presión dependía de la velocidad de congelación, grado de saturación y coeficiente de permeabilidad de la pasta, así como de la longitud del conducto de flujo del agua hasta el lugar más cercano de escape. Los beneficios proporcionados por un concreto con aire incluido, se explicaban en términos del acortamiento de dichos conductos de flujo. Algunos expertos aceptan aún esta hipótesis.

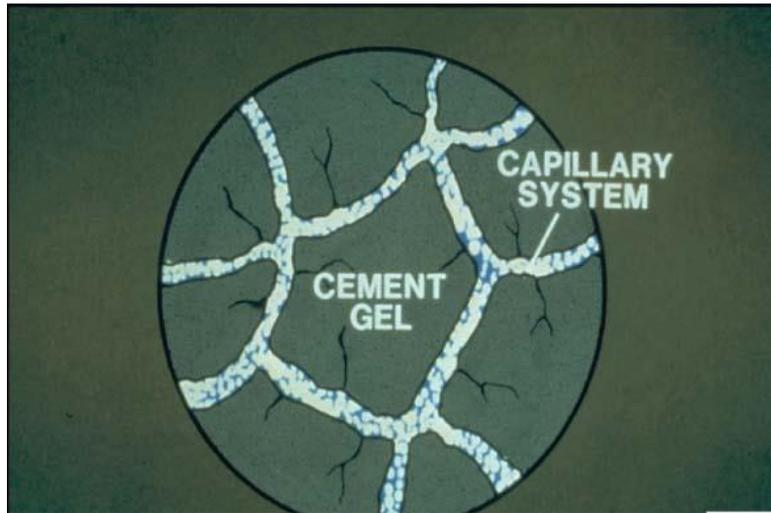


Fig.3.5 Muestra los sistemas de capilares cuando empiezan a congelarse y generar esfuerzos de tracción.

Sin embargo, estudios posteriores de Powers y Helmuth aportaron pruebas de que las hipótesis de la presión hidráulica no están de acuerdo con los resultados experimentales. Encontraron que durante el proceso de congelación de la pasta de cemento, la mayoría de los movimientos del agua se realizan hacia las regiones de congelación y no alejándose de estas, como se creía anteriormente.

Se encontró también, que las dilataciones (expansiones) que se presentan durante el congelamiento generalmente disminuyen conforme se aumenta la velocidad de enfriamiento.

Powers y Helmuth hacen notar que el agua en una pasta de cemento está en forma de una solución alcalina ligera. Cuando la temperatura del concreto cae por debajo del punto de congelación se producirá de inmediato un periodo de súper-enfriamiento en el que se forman cristales de hielo en los capilares de mayor tamaño. Por consecuencia el contenido de álcalis aumenta en la porción de la solución aún no congelada que se encuentra en los capilares mencionados, creando un potencial osmótico que obliga a las moléculas de agua, que se hallan en los poros cercanos, a difundirlas en la solución de las cavidades congeladas.

Como resultado, la solución que está en contacto con el hielo se diluye, permitiendo que el corpúsculo de hielo crezca aún más (crecimiento del hielo). En el momento en que la cavidad se encuentra llena de hielo y solución, cualquier crecimiento produce una presión de dilatación provocando que la pasta falle. Cuando el agua sin congelar contenida en los capilares se extrae, la pasta tiende a contraerse. (Se ha verificado experimentalmente que la contracción de la pasta o del concreto, tiene lugar durante una parte del ciclo de congelación).

En los últimos años Litvan ha estudiado aún más la acción de congelación sobre la pasta de cemento, y considera que el agua absorbida en la superficie o contenida en los poros que no puede congelarse es importante en el proceso. Debido a la diferencia de la presión de vapor de este líquido, súper-enfriado y la masa de hielo en los alrededores del sistema de la pasta, se producirá una migración de agua a lugares en donde se pueda congelar; los cuales pueden ser los otros más grandes o la superficie exterior.

El proceso lleva a la desecación parcial de la pasta y a la acumulación del hielo en grietas y hendiduras. La pasta falla cuando la redistribución necesaria del agua no puede lograrse de manera ordenada, ya sea porque la cantidad es excesiva (alta relación agua / cemento para el mismo grado de saturación), porque el tiempo disponible no es suficiente (enfriamiento rápido), o porque el camino que tiene que recorrer es muy largo (falta de burbujas de aire incluido). Litvan cree que en estos casos, la congelación forma un sólido semi-amorfo (no cristales de hielo) que produce grandes esfuerzos internos.

Existe un consenso acerca de que la pasta de cemento puede hacerse completamente inmune a los daños causados por temperaturas de congelamiento por medio de aire incluido, excepto cuando la pasta se expone a condiciones especiales que hacen que los vacíos de aire se llenen. Sin embargo, el aire incluido por si solo no elimina, la posibilidad de que el concreto sea dañado por la congelación, los fenómenos de congelamiento en las partículas de los agregados también deben tomarse en cuenta.

3.1.3.2 CONGELAMIENTO DE LOS AGREGADOS

La mayoría de las rocas tienen poros más grandes que las pastas de cemento, y Powers encontró que expelen agua durante la congelación. Este comité piensa que la teoría de la presión hidrostática (descrita con relación a la pasta de cemento) se puede aplicar en casi todos los casos. Dunn y Hudec propusieron la teoría del "agua ordenada", donde se afirma que la principal causa del deterioro de las rocas no es el congelamiento, sino la expansión del agua absorbida (que no es congelable); algunos casos específicos en que se hallaron ciertos agregados de caliza arcillosa sin que se hubieran congelado, parecerían apoyar esta conclusión.

Sin embargo, Helmuth muestra en los resultados de sus investigaciones que el agua absorbida no se expande durante el enfriamiento, sino que se contrae. Pero si está de acuerdo, en que la absorción de grandes cantidades de agua por agregados que tienen una estructura porosa muy fina, puede romper el concreto (como resultado de la formación de hielo).

Se ha demostrado que el tamaño del agregado grueso es un factor importante para la resistencia al congelamiento. Verbeck y Landgren, demostraron que para cualquier roca natural dada, siempre que no esté confinada por pasta de cemento, existe un tamaño crítico por abajo del cual puede ser congelada sin sufrir daños.

Estos investigadores demostraron que el tamaño crítico de rocas de buena calidad, varía hacia arriba a partir de quizá 6 mm (1/4"). A pesar de eso, algunos agregados (como por ejemplo, granito, basalto, diabasa, cuarcita, mármol) tienen capacidad tan baja para recibir agua congelable que no producen esfuerzos cuando se congelan, esto sin que importe el tamaño de la partícula. El papel del aire incluido para reducir el efecto del congelamiento en las partículas de roca es mínimo.

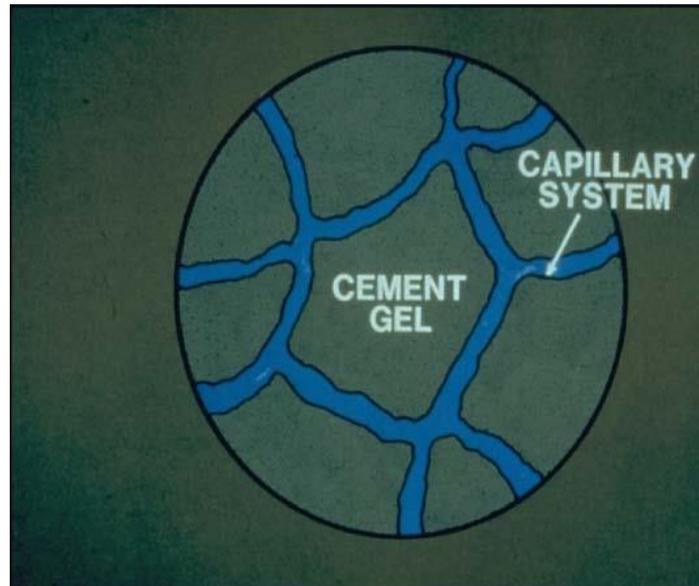


Fig.3.6 Congelación completa de los sistemas de capilares.

3.1.4 ACCIÓN DE LOS AGENTES DE DESHIELO

Hace algunos años, cuando se hizo común remover el hielo de la superficie de pavimentos de concreto por medio de del uso de sales (cloruro de sodio o cloruro de calcio) se descubrió que estas materias causaban o aceleraban la desintegración de las superficies ya sea causando picaduras o descascamiento. (Estas sustancias químicas aceleran la corrosión del refuerzo, lo que hace que el concreto también se descascare).

Son bastantes los conocimientos acerca de la manera en que los agentes de deshielo dañan al concreto. Se está generalmente de acuerdo en que la acción es más física que química. Se explica este fenómeno porque los agentes de deshielo presentan una textura diferente a la del concreto y en la interface el concreto se satura, enriqueciéndose en sales y generando choques térmicos destructivos. En nuestro medio no se emplea este tipo de sales por no existir estructuras que lo exijan.

3.1.5 CONTROL DE LA DURABILIDAD FRENTE AL CONGELAMIENTO Y DESHIELO

3.1.5.1 CONCRETO CON AIRE INCORPORADO

Desde hace más de 50 años la protección del concreto a la acción de las heladas o congelamiento consiste en la incorporación intencional del aire, mediante la inclusión de aditivos en la mezcla. El aire incorporado está constituido por pequeñas burbujas de 10 a 300 micrones (0.01 mm a 0.30 mm) uniformemente distribuidos. Los aditivos incorporadores de aire tienen efectos secundarios en los concretos frescos, mejoran la trabajabilidad y homogeneidad pero disminuyen la resistencia del concreto endurecido.

Los vacíos no interconectados creados por la incorporación de aire cortan la estructura de canalículos dentro de la pasta, generando el volumen disponible para expansión del agua presionada por el hielo formado en el concreto o para la dilatación del agua al pasar al estado sólido, reduciendo la presión hidráulica y permitiendo una mejor repartición de los esfuerzos además de eliminar las tensiones generadas en el concreto durante el proceso de congelación.

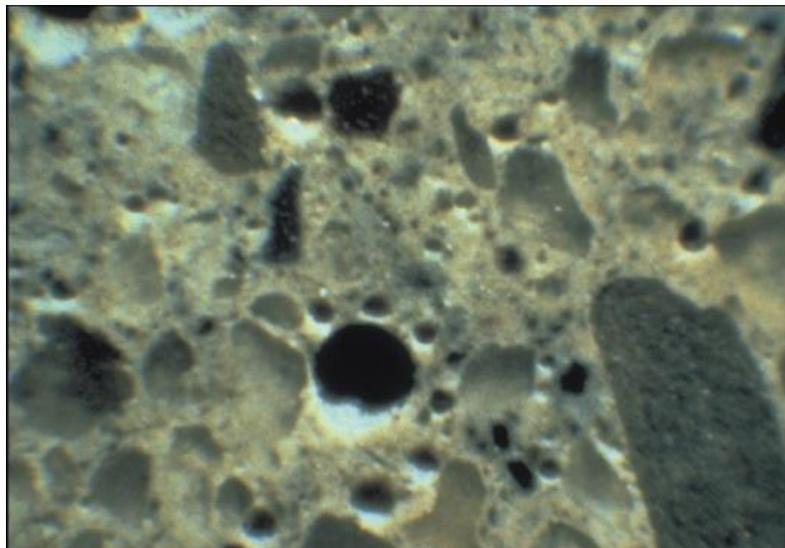


FOTO 3.1. Concreto con aire incorporado



FOTO 3.2 Comparación con un alfiler para poder determinar la proporción del aire incorporado

Se ha establecido el denominado "factor de espaciamiento" ($e > 0.2$ mm o 200 micrones) que representa la distancia máxima que debe existir entre las partículas de la pasta y los vacíos introducidos por el incorporador de aire para que sea realmente efectivo en cuanto a controlar el efecto del congelamiento y deshielo.

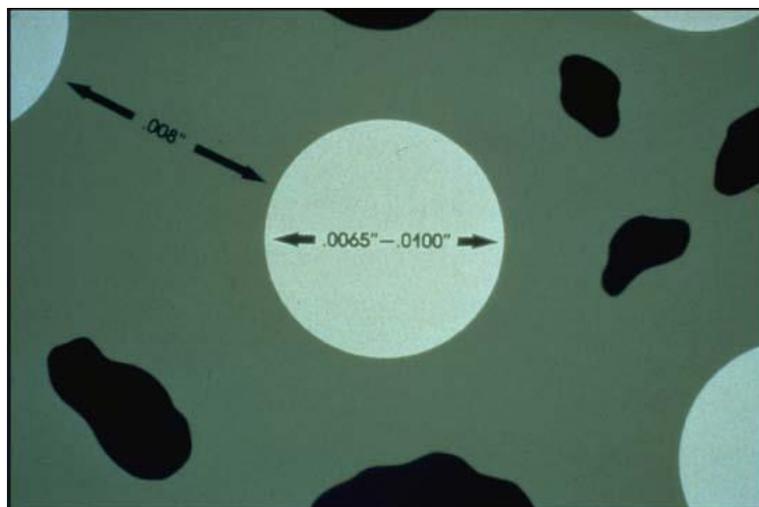


Fig. 3.7 Distancia de los vacíos por el incorporador de aire.

La cantidad de aire incorporado varía muchas veces, dependiendo de la severidad del clima y el tamaño de los agregados (ver tabla 3.3). El volumen de aire se modifica en el diseño por el tipo de cemento. La relación agua/cemento y la granulometría. Además factores de construcción son: el mezclado, transporte, consolidación y otros, por lo que es aconsejable determinar el porcentaje de aire a pie de obra.

Tabla 3.3 Cantidad de aire incorporado según la severidad del clima y el tamaño de los agregados

Tamaño máximo nominal agregado (pulgadas)	Exposición severa con humedad constante (%)	Exposición moderada con humedad ocasional (%)
3/8	7.5	6.0
1/2	7.0	5.5
3/4	6.0	5.0
1 1/2	5.5	4.5
3	4.5	3.5

3.1.5.2 CURADO

No se puede pensar que sólo con los incorporadores de aire se soluciona el problema, pues si no le damos al concreto la posibilidad de desarrollar resistencia, de nada servirá la precaución anterior ante la fatiga que va produciendo la alternancia de esfuerzos en los ciclos de hielo y deshielo.

Para un desarrollo normal de resistencia en el tiempo, el concreto debe curarse como referencia a una temperatura de por lo menos 13°C para un elemento de 30 cm. de espesor y 5°C para espesores del orden de 1.80 m. por lo que debe procurarse mantener la temperatura adecuada mediante elementos aislantes que impidan que pierda el calor y/o se evapore el agua, o se congele hasta que haya desarrollado al menos 35 Kg/cm².

Hay que recordar siempre el principio básico que se desprende de comprender el mecanismo de hidratación del cemento y que consiste en que la reacción química necesita agua, espacio para desarrollar los productos de hidratación, cierta temperatura y tiempo. Mientras controlemos estos factores mediante el curado, aseguraremos el desarrollo completo de las propiedades del concreto y favoreceremos la durabilidad.

En el Perú se desarrolló una técnica para el curado en el altiplano empleando una manta de totora que se implementó durante la construcción del Aeropuerto de Juliaca.

En esta zona de la Sierra Peruana se dan alternativas de temperaturas muy amplias que para la época en que se desarrolló la construcción entre Enero y Julio de 1984, significaban tener en el día hasta 35°C y en la noche la temperatura descendía hasta 2°C bajo cero ocasionando que se diera un periodo muy corto las condiciones ambientales de clima cálido y clima frío a la vez, obligando a adoptar precauciones en los diseños de mezcla y en los métodos de curado para contrarrestar estos efectos.

El principio de curado que se implementó consistió en aplicar inmediatamente después del vaciado un curador de membrana transparente del tipo resina, que controlará la fisuración por contracción plástica pero sin reflejar los rayos solares para concentrar más calor en el concreto. Cuando el concreto se endurece lo suficiente, se coloca una lámina plástica de color negro y posteriormente dos mantas de totora aprox. de 2 pulg de espesor.

3.1.5.3 DISEÑO DE MEZCLA

Los diseños de mezcla deben ejecutarse buscando concretos con la menor permeabilidad posible, lo cual se logra reduciendo la relación agua/cemento al mínimo con la trabajabilidad para lo cual el ACI recomienda relaciones entre 0.45 y 0.50.

Hay que indicar que los incorporadores de aire tienen un efecto mínimo en combatir el congelamiento de los agregados, por lo que es importante seleccionar los más adecuados, para lo cual es útil el ensayo ASTM C88 que da una idea del comportamiento ante el intemperismo.

En muchos casos de construcciones de concreto en la altura, aplican los mismos criterios que en construcciones de la costa, pues veremos relaciones de agua/cemento altas con asentamientos de al menos 4", tendencia hacia los agregados gruesos y consecuentemente problemas de cangrejas, acabados porosos con poca impermeabilidad y ninguna precaución especial en cuanto al curado.

Finalmente, es muy importante recalcar que ninguna de las precauciones mencionadas tendrán sentido si no se implementan eficientemente en obra y se establecen un programa de control de calidad adecuado en la etapa de producción y colocación.

3.1.6 RECOMENDACIONES BÁSICAS PARA CONTROLAR EL COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO DEL CONCRETO EN LA ALTURA

- a. Recopilar la mayor información posible en el sitio de obra, el ciclo térmico para un periodo de al menos 24 horas, así como planificar de que modo abordaremos el proceso constructivo en cuanto al horario de trabajo, volúmenes a vaciar, secuencias, rendimientos estimados de vaciado o colocación del concreto, contenidos de cemento y temperaturas promedio de los materiales para las condiciones locales. En base a esta información y su análisis decidiremos el sistema de protección que más se acerque al régimen adiabático.
- b. Debemos calcular o evaluar de manera práctica la temperatura promedio de colocación del concreto fresco al inicio de la jornada de trabajo, requiriéndose que esté en el rango mínimo de 10°C a 13°C, para una temperatura ambiente no menor de 7°C, ya que de otro modo corremos el riesgo de que la temperatura de la mezcla fresca baje demasiado por el equilibrio termodinámico y el proceso se retrase o se detenga.
- c. Si la temperatura de la mezcla fresca es muy baja la podemos elevar calentando el agua, aunque la forma más efectiva es a través de los agregados, ya que estos representan el 75% de la mezcla y su influencia termodinámica es mayor.

- d. Una práctica adecuada es exponer los agregados al sol extendiendo las rumas para que aumente su temperatura en el día, y protegerlos al inicio de la tarde para que no pierdan calor en la noche. También es útil usar el cemento más fresco posible ya que en esta condición puede tener hasta 60°C de temperatura, colaborando al objetivo final.
- e. Debemos decidir qué sistema de protección usaremos para establecer en la obra, la condición más cercana al régimen adiabático, para lo cual podemos usar en teoría cualquier tipo de material y el espesor de la cobertura. En nuestro medio se puede usar paja, ichu, totora, tierra, tecnopor, yute, lana de fibra de vidrio, etc., o cualquier otro material aislante, pero no se puede estimar con mucha precisión el espesor requerido sólo en base a un cálculo teórico sin verificarlo de manera práctica con una prueba a escala natural que nos permita corroborar la hipótesis numérica. Solo como referencia indicamos en la tabla 3.4, algunos espesores recomendados en función del tipo del material para que la protección se aproxime a un régimen adiabático con muy poca pérdida de calor.

TABLA 3.4 Materiales de protección para un sistema adiabático

MATERIAL AISLANTE	ESPESOR EN CM
Paja	35.0
Ichu	35.0
Tierra	20.0
Totora	15.0
Madera	15.0
Tecnopor	10.0
Lana de fibra de vidrio	7.5

Si utilizamos espesores menores, nos alejaremos del régimen adiabático y el concreto perderá calor. Hay que analizar cada caso en particular, pues en la medida que la temperatura pico teórica sea mayor de 30°C el concreto admitirá algo de pérdida de temperatura, con la condición que no baje de 13°C que es la mínima recomendable para hidratación normal.

- f. Para la prueba práctica del sistema de protección hay que registrar en un periodo de 48 horas como mínimo, la temperatura ambiente versus la temperatura del concreto, con objeto de verificar si se cumplen las hipótesis estimadas.

3.2.0 ATAQUES AL CONCRETO

3.2.1 ATAQUES POR ÁCIDOS

3.2.1.1 CONCEPTO GENERAL

Los términos ÁCIDO y BÁSICO se aplican a dos tipos de compuestos con una serie de características opuestas. Según Arrhenius (1884) define:

- Ácido: Sustancia que en solución acuosa se disocia desprendiendo iones de hidrógeno (H^+), que vienen a ser protones y reciben el nombre de PROTIOS.
- Básico: Sustancia que en disolución acuosa se disocia presentando iones oxhidrilo (OH^-).

Si podemos analizar al agua en sus componentes según la fórmula:



De acuerdo la magnitud de la disociación que presenta los protios (protones) H^+ , los ácidos pueden ser fuertes o débiles. Análogamente de acuerdo al grado de disociación que experimentan las bases pueden ser fuertes o débiles.

La suma de la concentración de los iones H y OH es constante para una solución determinada:



En una solución neutra las concentraciones de iones H^+ e iones $(OH)^-$ son iguales:

$$[H^+] = [(OH)^-] = 1 \times 10^{-7} \text{ iones-gr/litro} \dots \dots \dots (3.3)$$

Una solución será ácida cuando la cantidad de iones H^+ productores de la acidez es mayor que:

$$10^{-7} \text{ iones-gr/litro} \dots \dots \dots (3.4)$$

Es decir:

$$[H^+] > [(OH)^-] \dots \dots \dots (3.5)$$

Inversamente una solución será básica cuando:

$$[H^+] < [(OH)^-] \dots \dots \dots (3.6)$$

Que es cuando los iones $(OH)^-$, productores de la basicidad o alcalinidad están en una solución en concentración mayor de:

$$10^{-7} \text{ iones-gr/litro} \dots \dots \dots (3.7)$$

La acidez de una solución acuosa está definida por la potencia negativa de base 10, en valor absoluto, de la concentración de los iones hidrógeno. A este valor se le denomina pH del latín "Pondus Hydrogenil", porque se indica ponderadamente la cantidad de iones H^+ presentes en la solución.

De la definición expresada por la ecuación 3.3 podemos ver que si $pH=7$, la solución será neutra y de las definiciones 3.5 y 3.6 si $pH < 7$, la solución es ácida.

En la naturaleza el origen de los ácidos pueden hallarse en la combustión de un gran número de carburantes, cuyos componentes contienen gases sulfurosos que se combinan con la humedad del medio ambiente formando ácido sulfúrico.

Otra fuente de ácido son las aguas residuales o de desagüe al discurrir por las tuberías que las colectan, pues en el proceso de descomposición de la materia orgánica que eventualmente pueden; liberar sobretodo ácido sulfúrico.

El agua en algunas minas y algunas aguas industriales pueden contener o formar ácidos.

Los suelos en cuya composición haya turbas, pueden contener sulfuro de hierro, pirita, que al oxidarse produce ácido sulfúrico.

Las corrientes de agua provenientes de las alturas, como es el caso de la región andina, son a veces ligeramente ácidas, por contener dióxido de carbono disuelto.

Por lo general esta agua solo ataca al concreto de manera ligera, sobre todo si este es de buena calidad.

En las zonas del terreno de formación del humus orgánico el valor de pH el agua subterránea puede llegar a ser fuertemente ácida, es de 3.6 a 4, por la acción del ácido carbónico y del ácido húmico.

Si podemos referirnos al pH de las aguas que conforman la napa freática, o de las aguas que discurren en corrientes subterráneas, está comprendido entre 4 y 11.

Si el pH de un agua subterránea excede estos parámetros se puede presumir que contendrá algún tipo de contaminación, sea de origen industrial o de minas.

En la tabla 3.5 se puede apreciar el efecto de varias sustancias químicas comunes sobre el concreto simple, comprobándose pues que son muy pocas las que realmente le acusan un daño importante.

TABLA 3.5 Sustancias químicas comunes en el concreto simple

VELOCIDAD DE ATAQUE TEMPERATURA AMBIENTE	ACIDOS INORGANICOS	ACIDOS ORGANICOS	SOLUCIONES ALCALINAS	SOLUCIONES SALINAS	VIARIOS
RAPIDA	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	-----	Cloruro de Aluminio	-----
MODERADA	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de Sodio >20%	Nitrato Amonio Sulfato Amonio Sulfato de Sodio Sulfato Magnesio Sulfato de Calcio	Bromo (gas) Sulfito liquido
LENTA	Carbónico	-----	Hidróxido de Sodio 10% - 20% Hipoclorito de Sodio	Cloruro Amonio Cloruro de Magnesio Cianuro Sodio	Cloro (gas) Agua de mar Agua dulce

DESPRECIABLE	-----	Oxálico Tartárico	Hidróxido de Sodio <10% Hipoclorito de Sodio Hidróxido de Amonio	Cloruro de Calcio Cloruro de Sodio Nitrato de Zin Cromato de Sodio	Amoniac liquido
--------------	-------	----------------------	--	---	-----------------

3.2.1.2 MECANISMO DE ATAQUE

En las mediciones de campo se observa que al ataque se presenta para soluciones con valores de pH entre 3 y 6, la velocidad del ataque progresa proporcionalmente a la raíz cuadrada del tiempo.

El proceso degradante se inicia con la destrucción de la capa de carbonatos existentes en la superficie del concreto, que se formó durante la fragua por la acción del CO₂ del aire o del agua sobre la cal.

El deterioro del concreto por ácidos es el principal resultado de una reacción entre estas sustancias y el hidróxido de calcio del cemento portland hidratado, y si se usan agregados calizos y dolomíticos los mismos podrían afectarse por los ácidos. En la mayoría de los casos los productos de la reacción química son compuestos de calcio solubles en agua. Estos compuestos son, a su vez, arrastrados por las soluciones acuosas. Los ácidos oxálico y fosfórico son excepcionales en este respecto ya que las sales de calcio resultantes de estas reacciones son insolubles en agua y no son fácilmente removibles de la superficie del concreto.

En el caso de ataque por ácido sulfúrico, el deterioro resultante es más rápido o mayor, debido a que el sulfato de calcio es formado como consecuencia de la reacción que ataca al concreto.

Si las soluciones ácidas pueden alcanzar el acero de refuerzo pasando por poros o fisuras del concreto, pueden presentarse corrosión del acero que a la vez causa fisuración y deterioro del concreto.

Generalmente lo que se detecta al ataque de ácidos inclusive a simple vista es la apariencia porosa de la superficie del concreto expuesta al flujo del agua con el ácido. Esta apariencia se debe a que ya han empezado a ser arrastrados algunos de los componentes hidratados formados por el endurecimiento, los que al desaparecer dejan vacíos en la masa de concreto que incrementan su porosidad y afectan sus propiedades mecánicas y cohesivas.

En algunos casos se observa un cambio en la coloración externa del elemento, esto dependiendo del tipo de ácido que lo ataque y de la sal producto de esta reacción.

Por ejemplo si el ácido agresor es el carbónico, H_2CO_3 , se pueden producir carbonatos y bicarbonatos de calcio que pueden dar a la superficie con la que está en contacto en el proceso de lavado (lixiviación) una coloración ligeramente blanca. El ácido clorhídrico que forma cloruro de calcio también transmite al concreto un color ligeramente blanco.

En cambio ácidos como el nítrico, HNO_3 o el sulfhídrico, H_2S , que forman Nitrato de calcio, $Ca(NO_3)_2$, e hidrógeno, sulfato de calcio, $Ca(HS)_2$, respectivamente, no transmiten ninguna coloración a la superficie que afectan.

Una forma segura de detección es un análisis químico del líquido en contacto con el elemento o del terreno que puede haber sido humedecido por la napa freática, para saber si su pH escapa a los parámetros normales.

Desde luego que las superficies de concreto que están en contacto directo con sustancias ácidas, por ejemplo con líquidos industriales, o depósitos de materiales agresivos se verán seriamente afectados.

3.2.1.3 RECOMENDACIONES

El ataque de ácidos es imposible de detener pero, un concreto denso con una relación agua/cemento baja, puede proporcionar un grado de protección aceptable contra ataques moderados de ácidos. Es una medida preventiva, la de tener una buena dosificación y de preferencia con cemento tipo II (moderado calor de hidratación y resistencia a los sulfatos), además de un vaciado adecuado y vibrado respectivo y que cumpla con los tiempos de curado, claro verificando el tipo de ambiente expuesto que va estar sometido el concreto, humedad relativa, temperatura ambiente, etc.

El hecho de darle una proporción baja en agua, será de gran resistencia a los ácidos puesto que su ingreso será en proporción de la cantidad de agua que le demos a la mezcla de concreto.

3.2.2 ATAQUES POR AGUA

3.2.2.1 AGUA PURA

Las aguas puras, conocidas como aguas blandas, atacan al concreto por disolución de la pasta al actuar sobre el hidróxido de calcio libre. Adicionalmente, los silicatos, aluminatos y ferritos de calcio son descompuestos por disolución del hidróxido de calcio.

Para una mejor comprensión de aguas blandas y duras, podremos definir las de la siguiente manera:

- a. Agua blanda: Un agua se considera blanda si en su composición carece o tiene poca cantidad de sustancias que posean cationes de Ca^{+2} o Mg^{+2} . Conforme aumenta la cantidad de estos cationes se dice que el agua se hace más dura. En este sentido, un agua químicamente impura puede seguir siendo blanda pues las sustancias que contiene poseen bajas cantidades de cationes Mg o Ca. A su vez, un agua aparentemente pura, limpia o potable puede tener un elevado grado de dureza si tiene estos cationes.

Un proceso degradante no sólo puede ser causado por agua que contenga sustancias agresivas para el concreto, sino también por aguas libres de sales y materias minerales que las hagan blandas.

- b. Aguas Duras: La presencia de ciertos compuestos como bicarbonatos, sulfatos y cloruros en asociación con cationes de Ca^{+2} o Mg^{+2} es lo que produce la dureza del agua, la cual puede ser:
- Dureza de carbonatos, dada por los bicarbonatos de calcio y magnesio, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, también llamada dureza temporal.
 - Dureza sin carbonatos, también llamada dureza permanente por permanecer después de la ebullición, dada por otras sales de calcio y magnesio como los sulfatos y cloruros, CaSO_4 y CaCl_2 , respectivamente.
 - Dureza total, que viene a ser la suma de las durezas de carbonatos y sin carbonatos.

Según las normas en uso en el país, el agua que contiene iones de calcio y magnesio en un total mayor de 200 mg/lit., debe ser considerada como agua dura. Otras normas, por ejemplo las alemanas, clasifican el agua de acuerdo a su dureza como se indican en la tabla 3.6.

TABLA 3.6. Clasificación del agua por su dureza según las Normas Alemanas.

CLASIFICACIÓN	DUREZA TOTAL (Grados Alemanes)
Muy blandas	0 — 4
Blandas	4 — 8
Semiduras	8 — 12
Bastante Duras	12 — 18
Duras	18 — 25
Muy Duras	25 — 50
Extremadamente Duras	+ de 50

1 grado de dureza alemana = 10mg de compuesto calcio o magnesio / Lt. de agua

En esta tabla vemos que se considera un agua dura a la que tiene un grado de dureza entre 18 y 25 que corresponde de 180 a 250 mg/lit de compuestos cálcicos o magnésicos, valores que también las Normas Peruanas consideran como agua dura.

El agua pura puede disolver una pasta de cemento endurecida, atacándola en grado considerable. Para comprender el proceso debe recordarse que el cemento portland consiste en 2/3 partes de cal. Aunque mucha de ella, en la pasta, está combinada con sílice, alúmina y óxido férrico, parte del hidróxido de calcio libre, está embebido en el gel en forma de cristales. Desde que éste es medianamente soluble en agua, cerca de 1.7 gr/lit, él puede ser lavado por el agua pura.

Debe hacerse hincapié en que los efectos indicados se refieren a acción de agua pura, dado que el agua que contiene algo de cal en disolución, tal como las aguas duras, tiene muy poca capacidad para disolver el hidróxido de calcio.

La acción del agua no se limita a la disolución del hidróxido de calcio. Por acción continua del agua pura, los silicatos de calcio, aluminatos y ferritos, son descompuestos por la disolución del hidróxido de calcio.

En general, todos los compuestos de la hidratación del cemento son estables solamente en soluciones acuosas que contengan una concentración mínima de hidróxido de calcio. Si la concentración de cal cae por debajo de ese mínimo debido a la disolución con agua pura, una correspondiente cantidad de cal combinada entra en disolución.

Este proceso continúa hasta que se establece un nuevo equilibrio entre la solución y el producto hidratado, el cual ahora será más pobre en cal. Este proceso de descomposición, conocido como hidrólisis, puede, a lo menos en teoría, continuar hasta que toda la cal haya sido sacada del producto de hidratación, lavando además los hidratos coloidales de sílice, alúmina y óxido férrico, ricos en agua y sin resistencia.

Por la razón expresada, todas las aguas blandas atacan al concreto en algún grado.

Así por ejemplo, el agua que se considera sobre los muros de unas estructuras de concreto puede originar algún daño superficial si se le deja actuar durante un cierto número de años. Daños más serios pueden producirse si el concreto no es lo suficientemente denso y el agua penetra bajo presión, lavando una mayor cantidad de cal en un plazo menor.

¿Cómo se detecta la degradación o ataque por aguas blandas (agua pura)?

Cuando se da este proceso degradante para un volumen determinado de concreto es difícil saber en qué fase del deterioro se encuentra, pues la observación visual del elemento solo nos da señales de ocurrencia del proceso cuando este ya se encuentra muy avanzado.

En estas circunstancias se observa la aparición de eflorescencias blancas, a manera de costras, en la superficie del concreto pudiendo, cuando el deterioro es ya evidente, indicar vías de flujo de humedad.

Para determinar si en el concreto se está produciendo un proceso lixivante o de lavado sería necesario extraer probetas de las mismas masas del elemento y someterlas a costosos análisis químicos para determinar sus contenidos de óxido de calcio, CaO.

Tomando como referencia que cuando el contenido de CaO del cemento se reduce en más de un 20% como resultado de la lixiviación se considera que el proceso degradante ha llegado a un estado avanzado, podemos establecer si la muestra sufre o no un proceso lixivante de aguas blandas y, en caso positivo, en qué estado de degradación se podría encontrar el elemento de concreto.

Si el análisis del agua que está en contacto con el concreto indica que se trata de agua muy blanda, y si este contacto se ha venido dando presumir que este concreto está sufriendo un proceso degradante por lixiviación.

Una forma inmediata y práctica de reconocer si un agua es blanda o dura es comprobando la facilidad con que se disuelven en ella los detergentes y los jabones. Si la disolución se da con mucha facilidad el agua será dura y el riesgo deterioro será mínimo, antes bien, al contener las aguas duras elevadas cantidades de iones de calcio (Ca^{+2}), y magnesio (Mg^{+2}),

se dará la reacción de intercambio con el hidróxido de calcio y el hidróxido magnesio, $Mg(OH)_2$ resultante, que se precipitará en los poros del concreto disminuyendo su permeabilidad y aumentando su resistencia mecánica.

En la fase final del proceso lixivante, al haber sido arrastrado el calcio de los compuestos hidratados del concreto, este pierde sus propiedades aglomerantes y en consecuencia disminuyen sus resistencias mecánicas.

Ante los requerimientos de servicio que pueden ser cargas en compresión, flexiones, etc., el concreto comienza a desintegrarse, inclusive en ausencia de cargas de servicio, como es el caso de concreto colocado solo como relleno, se observa que pierde la capa superficial de recubrimiento y empieza a mostrar los agregados al aire libre, continuando el proceso con la pasta existente entre los agregados.

¿Cómo podemos prevenir la acción lixivante del agua blanda?

Una medida preventiva contra este tipo de ataque es la preparación de un concreto con baja relación agua/cemento, bien compactado o vibrado y brindarle un adecuado curado. Esto garantizará, en primer lugar, la impermeabilidad del material al tener pocos poros en su masa para que penetre el agua blanda portadora de las sales alcalinas. En segundo lugar se tendrá que los compuestos que intervienen en la reacción química de hidratación, en donde se conforman los silicatos, aluminatos y gel, podrán establecer enlaces más fuertes entre las moléculas lo que retardará los intercambios iónicos y la subsiguiente lixiviación.

Sobre todo en concretos que van a estar expuestos a presión originada por carga hidráulica es necesaria la elaboración cuidadosa de la mezcla para evitar filtraciones a través del elemento que arrastren al hidróxido de calcio, y en general a todos los compuestos cálcicos, hacia el exterior.

3.2.2.2 AGUA CASI PURA

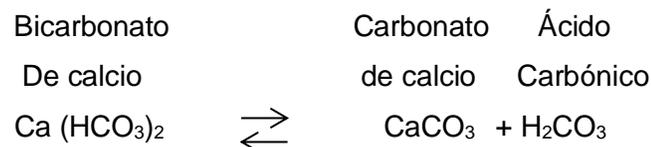
3.2.2.2.1 INTRODUCCIÓN

Las aguas provenientes de las montañas están, por lo general, prácticamente libres de sales disueltas, pero podrían volverse ácidas debido a su contenido de ácido carbónico derivado del bióxido de carbono presente en la atmósfera. Estas aguas casi puras pueden ser corrosivas al concreto, particularmente en el caso de concretos pobres y por lo tanto permeables.

Sin embargo, para tales aguas el valor del pH no es un buen índice de su agresividad hacia el concreto, ya que ésta también depende de la cantidad de bicarbonato de calcio y otras sustancias presentes en la solución. Así, aguas con ácido carbónico con un pH de 7 contengan muy pequeñas cantidades de bicarbonato de calcio disuelto, podrían ser seriamente destructivas al concreto debido a que tales aguas pueden disolver rápidamente carbonato de calcio, la solución saturada de cal, en el aire, tiene un pH de 8.3. En cambio, si la concentración del bicarbonato de calcio es mayor, con una acidez correspondiente a un pH del orden de 6 ó mayor, el agua podría no ser seriamente agresiva.

3.2.2.2.2 MECANISMO DE ATAQUE

El contenido total de bióxido de carbono en las aguas que contienen pequeñas cantidades de ion calcio en parte deberá combinarse en bicarbonato de calcio, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, y parte necesariamente deberá estar presente como ácido carbónico en solución, (H_2CO_3) para mantener el equilibrio químico con el $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ de acuerdo con la siguiente ecuación:



El bióxido de carbono remanente es denominado "exceso" de bióxido de carbono. Si la solución está saturada con carbonato.

Si la solución está saturada con carbonato de calcio (CaCO_3), el exceso de bióxido de carbono es incapaz de disolver más carbonato de calcio, y la solución es considerada como no agresiva. Esta puede reaccionar sin embargo con el hidróxido de calcio en el concreto endurecido, pero en este caso se precipitará como otros equivalentes químicos del carbonato de calcio los cuales contribuyen a densificar el concreto.

Si la solución no se halla inicialmente saturada con carbonato de calcio, parte del exceso del bióxido de carbono puede reaccionar con el carbonato de calcio sólido presente, llegando al punto de saturación de la solución con carbonato de calcio. En este punto deberá permanecer remanente en la solución una cantidad de bióxido de carbono, de acuerdo con la ecuación de equilibrio mostrada anteriormente, pero este bióxido de carbono es incapaz de disolver el carbonato de calcio. Por ello es necesario distinguir entre el "exceso" de carbono y "bióxido de carbono agresivo", dado que el último es parte del primero.

Cuando están presentes sustancias disueltas, diferentes al calcio y al bióxido de carbono, la situación puede ser más compleja. La cantidad de bióxido de carbono en solución requerida para estabilizar un porcentaje dado de bicarbonato de calcio se incrementa cuando se hallan presentes otras sales de calcio, tales como el sulfato de calcio, y decrece en presencia de sales de otras bases, tales como el cloruro de sodio. Así, para una determinada cantidad de bióxido de carbono y bicarbonato de calcio, el agresivo bióxido de carbono es más alto en soluciones de cloruro de sodio y más bajo en soluciones de sulfato de calcio con relación a las soluciones que contienen únicamente bicarbonato.

3.2.2.2.3 EXPERIENCIA DE OBRA

Los resultados de laboratorio y obra efectuados en Suecia han mostrado que tuberías experimentales de concreto que transportan agua con una dureza temporal muy baja (bicarbonato), un contenido de CO_2 agresivo de 20 a 70 ppm, y un pH de 4.5 a 6.5, si eran tuberías centrífugas o tuberías de concreto prensadas a máquina habían sido deterioradas muy ligeramente. En cambio donde las tuberías eran más porosas y permeables presentaban un deterioro extenso.

Nielsen y Skovgaard han hallado que si las tuberías de concreto son lo suficientemente gruesas y bien fabricadas, no se apreciará deterioro debido a la circulación de aguas naturales blandas que contengan ácido carbónico, excepto en el corto plazo inmediatamente después que las tuberías han sido puestas en servicio.

Halstead ha determinado las pérdidas de resistencia en cubos de concreto hechos con una amplia variedad de cementos y proporciones de mezclas, sumergidos en aguas blandas ligeramente ácidas con pH de 3.5 a 5. La pérdida de resistencia en un año para todos los tipos de concreto fue de $20 \pm 7\%$. Igualmente se halló que el concreto se deteriora hasta una profundidad cercana a 0.6 cm. Estos resultados apoyan la idea de que el ataque de tales aguas está limitado a una capa superficial de poco espesor.

Tremper ha estudiado de aguas casi puras pero ligeramente ácidas (pH 6.1 a 7.0) sobre especímenes de concreto hechos con diferentes cementos portland y proporciones de mezcla. Halló que los concretos de mejor calidad (esto es un alto contenido de cemento y una relación agua-cemento baja) fueron menos afectados que los concretos de menor calidad, y que los pequeños especímenes fueron más afectados que los grandes. Concluyó que grandes elementos estructurales, tales como pilares de puentes, si son preparados con buen concreto, presentarán un deterioro despreciable al ser expuestos a aguas ácidas naturales.

Miller y Manson han estudiado el comportamiento del concreto en tuberías de drenaje colocadas en suelos de turba y suelos minerales. El pH de la turba varió dentro de un rango de 8.2 a 4.1 y, en general, la magnitud de la corrosión se incrementó con la acidez. Las tuberías de pobre calidad no proporcionan un satisfactorio rendimiento en pasto ligeramente ácido o turba con un pH de 6. Las mezclas ricas de una alta resistencia y baja permeabilidad mostraron la mejor resistencia a los ácidos del suelo. Ninguno de los cementos portland utilizados difirió significativamente en resistencia. En algunos casos el contenido de bióxido de carbono de las aguas naturales podría ser inusualmente alto. La actividad geoquímica y bioquímica puede generar bióxido de carbono el cual podría aparecer en las aguas cercanas. Terzaghi ha reportado el deterioro de concreto debido en parte a un alto contenido de bióxido de carbono en agua marina o aguas salobres.

Las aguas naturales provenientes de zonas minerales igualmente pueden tener un alto contenido de ácido carbónico agresivo al concreto.

3.2.2.3 AGUAS DE DESAGÜE

3.2.2.3.1 DEFINICIÓN

Los desagües domésticos usualmente no tienen efectos de deterioro sobre un concreto, y ello ha sido mostrado por el satisfactorio comportamiento de tuberías de concreto utilizadas en alcantarillado. Sin embargo, bajo una combinación de condiciones especiales de alta concentración de aguas de desagüe, baja velocidad de flujo, o alta temperatura, se podría generar gas hidrógeno sulfurado (H_2S) como resultado de la acción oxidante de las bacterias anaeróbicas sobre los compuestos de azufre inorgánico u orgánico presentes en el desagüe. El hidrógeno sulfurado en sí mismo no tiene acción sobre el concreto, pero liberado en el espacio de aire por encima del líquido y subsecuentemente condensado sobre las superficies húmedas por encima de la línea de agua, es oxidado por las bacterias aeróbicas a ácido sulfúrico, el cual puede atacar la superficie del concreto.

Si el desagüe contiene más de 150 ppm de sales solubles de sulfato neutras (como SO_4), podría ocurrir ataque por sulfatos. Los desagües domésticos rara vez contienen esta cantidad de sales neutras, pero la descarga de desagües industriales en el alcantarillado podría contenerla o sobrepasarla. En tales casos, el uso de cementos que no tengan más de un 8% de C_3A es aconsejable. Los desagües industriales podrían agregar otras sustancias químicas destructivas al desagüe.

3.2.2.3.2 BACTERIOLOGÍA DE LA CORROSIÓN

La producción de sulfuros en los desagües es una consecuencia indirecta de la actividad de grupos bacterianos.

En efecto cuando determinadas bacterias están presentes, los líquidos cloacales sufren en tiempos relativamente cortos cambios fundamentales, y los compuestos tienden a transformarse degradándose su energía. Las bacterias funcionan como catalizadores y actúan por intermedio de las enzimas que elaboran.

Los desagües pueden estar en estado aeróbico o anaeróbico según que estén presentes en ellos las bacterias anaeróbicas, o las anaeróbicas; definiéndose el aerobio como un organismo que requiere oxígeno libre para su metabolismo, en tanto que un anaerobio es dañado por el oxígeno libre el cual forma un potencial de oxidación y reducción que es inaparente para el crecimiento de la mayoría de los anaerobios.

La característica esencial de la oxidación biológica consiste en la pérdida del hidrógeno más que en la aceptación del oxígeno, ya que cuando éste está presente funciona como un fijador del hidrógeno, pero cuando no lo hay, funciona como tales los sulfatos y nitrato por lo que la oxidación biológica puede continuar en la completa ausencia del oxígeno libre excepto el presente en los compuestos.

En los líquidos cloacales existen mezclas de muchas sustancias oxidantes y reductoras, jugando la concentración de electrones un rol preponderante en la determinación del carácter aeróbico o anaeróbico de la flora bacteriana, pudiéndose concluir que la tendencia reductora del medio más que la presencia o ausencia del oxígeno libre debe asociarse a la presencia o ausencia de anaeróbicos.

Los líquidos cloacales tienen una composición bacteriana promedio: por cm^3 más de un millón de bacterias proteolíticas capaces de producir amonio e hidrógeno sulfurado a 0 partir de las proteínas; medio millón de nutrificadores capaces de reducir los nitritos y nitratos a nitrógeno y amoniaco; y menos de medio millón de nutrificadores, capaces de oxidar el amonio y los nitritos a nitratos. En la capa superficial del medio ambiente abundan las bacterias capaces de derivar productos reducidos, en el fondo pululan las bacterias oxidantes.

Barr y Bacjaman han atribuido la corrosión del concreto en los desagües a la posterior oxidación del hidrógeno sulfurado a ácido sulfúrico y han demostrado que esta acción sólo tiene lugar en presencia de una elevada concentración de sulfatos en los líquidos cloacales. Ambos investigadores han atribuido la reducción de los sulfatos a los organismos denominados spirillum desulfuricans, microspira, y el vitrio thermodesulfuricans, concluyendo que la superficie húmeda de los tubos de desagüe sobre la línea de líquido ofrece un ambiente ideal para el crecimiento de bacterias capaces de oxidar el azufre.

La acción deletérea causada por la rápida producción de hidrógeno sulfurado, está íntimamente vinculada con el aumento de la población bacteriana y de los factores siguientes:

- a. Concentración de los líquidos cloacales
- b. Temperatura
- c. Potencial de oxidación y reducción

Así, la producción de cantidades excesivas de hidrógeno sulfurado sería debida principalmente a la reducción de los sulfatos, e, incidentalmente, a un proceso de des-hidrogenación de los constituyentes orgánicos de desagüe.

3.2.2.3.2 FÍSICA Y QUÍMICA DE LA CORROSIÓN

No existen en el interior de los sistemas de desagüe de concreto condiciones favorables para que se establezcan reacciones químicas de fortalecimiento de éste y, por el contrario existen condiciones favorables para su destrucción. Así, los gases sólo son agresivos cuando el ambiente que los rodea es húmedo, lo que justamente pasa en el interior de los desagües con los gases reducidos y los gases halogenados. Debido a la acción bacteriana, y como consecuencia las temperaturas relativamente altas de los líquidos cloacales, se presentan condiciones apropiadas para una relativamente elevada producción de hidrógeno sulfurado el cual por acción de la humedad pasa a ácido sulfúrico, iniciándose la desintegración del concreto.

Los concretos de cemento portland que han sufrido este tipo de ataque, presentan un revestimiento escamoso de color blanco amarillento sobre la superficie, la misma que es atacada por un descascaramiento intermitente siendo a menudo ablandada y esmerilada, pudiendo presentarse con un desprendimiento inicial del agregado fino y finalmente del agregado grueso. Este deterioro es más evidente en o cerca de la línea de aguas cloacales. El concreto enteramente sumergido o completamente expuesto al aire generalmente está libre de este tipo de ataque.

3.2.2.3.3 CONTROL DE ATAQUE

Para prevenir la corrosión de concreto por acción de aguas cloacales la mejor precaución parece ser el evitar la formación de desagües sépticos. Si las bacterias reductoras de sulfatos están presentes, su actividad podrá ser reducida al mínimo si se asegura una adecuada ventilación y, si es necesario, por tratamiento químico del desagüe.

La inyección de aire, así como la cloración del agua, contribuyen a paralizar la actividad aeróbica o, por lo menos a oxidar al H_2S (hidrógeno sulfurado) sin pérdida de líquido. También puede añadirse casi a fin de que el pH suba a más de 10. La inyección de aires seca la superficie del concreto e impide la disolución del H_2S y la proliferación de bacterias oxidantes.

Para la mayoría de los desagües, desde que el flujo en si mismo no es agresivo, el problema de la corrosión ácida en la coronación puede ser adecuadamente resuelto por el diseño o por modificación de las operaciones, de tal manera que las tuberías trabajen a tubo pleno o con ventilación en altas velocidades, evitando los lugares de turbulencia.

Las tuberías de concreto, u otros conductos que llevan las aguas de desagüe, deberán ser de baja permeabilidad para minimizar la penetración por líquidos.

En la práctica esto significa que el concreto deberá tener un contenido de cemento razonablemente alto, y que la relación agua/cemento debe ser baja, y que la fabricación deberá efectuarse mediante un proceso que produzca una estructura densa y homogénea.

Si es posible un ataque ácido, la vida de servicio del concreto podría incrementarse mediante el uso de un agregado calcáreo de buena calidad (caliza o dolomita), el cual, por supuesto, al ser atacado por el ácido previene un ataque ácido sobre la pasta de cemento endurecida. El uso de tal agregado ha sido aceptado como una forma de prolongar la vida del alcantarillado frente a un ataque por ácido sulfúrico. Esto no es considerado como una solución al problema, pero sí como un medio para retrasar la velocidad del ataque.

Una solución completa del problema podría ser la lograda únicamente mediante métodos que eviten la formación de ácido sulfúrico en concentraciones peligrosas. Esto incluye el diseño del sistema de drenaje para suministrar una velocidad de flujo suficiente, ventilación para renovar el hidrógeno sulfurado, el uso de aditivos químicos para evitar que los compuestos de azufre se conviertan en hidrógeno sulfurado, o el uso de materiales tóxicos para decrecer o eliminar la actividad de la bacteria aeróbica.

3.2.3 ATAQUE POR GASES

3.2.3.1 BIÓXIDO DE CARBONO (ANHÍDRIDO CARBONICO)

Es conocido como el bióxido de carbono (CO_2), reacciona con los elementos integrantes del cemento portland. Dependiendo de las circunstancias, la reacción podría tener resultados favorables o desfavorables. Si el bióxido de carbono, en suficiente concentración, toma contacto con un concreto fresco o recién colocado, la superficie expuesta podría ser seriamente afectada variando la magnitud y profundidad del ataque con la concentración del gas, temperatura ambiente, humedad relativa.

La superficie afectada podría tornarse blanda y pulvurulenta, y ningún subsecuente curado u otro tratamiento podrán reparar el daño. Una concentración de bióxido de carbono para producir tales efectos puede ser fácilmente producida mediante el uso de calentadores de combustión mal ventilados, utilizados para mantener una temperatura de curado adecuada en construcciones de concreto en climas fríos. Si el calentamiento del ambiente es necesario, deberá efectuarse de tal manera que se evite que los gases de combustión sean liberados y se concentren dentro de la cámara de calentamiento cerrada.

La lenta pero persistente contracción de los productos de concreto, tales como bloques de construcción, en un largo periodo, aún después de haber alcanzado el equilibrio de humedad con el medio ambiente, es atribuida a la reacción con el bióxido de carbono presente en la atmósfera (casi 0.03% de CO₂). Esta contracción a largo plazo puede ser significativamente disminuida mediante un pre-tratamiento adecuadamente controlado con bióxido de carbono después de un periodo de curado requerido.

La reacción entre el bióxido de carbono de la atmósfera y el concreto denso y endurecido es muy lenta, y aún después de un considerable número de años podría afectar únicamente una delgada capa superficial. El principal producto de esta reacción es el carbonato de calcio, la presencia de la cual podría mejorar la resistencia inicial del concreto al ataque de algunos agentes químicos en solución, tales como los sulfatos. En la práctica cualquier efecto benéfico parece ser de pequeña importancia.

3.2.3.2 ANHÍDRIDO SULFUROSO

El gas anhídrido sulfuroso es uno de los productos de la combustión del petróleo, carbón, y otros combustibles. Cuando está seco tiene un pequeño o ningún efecto sobre el concreto fresco.

El anhídrido sulfuroso en combinación con el agua forma el ácido sulfuroso (H_2SO_3), y este ácido gradualmente reacciona con el oxígeno del aire para producir el ácido sulfúrico (H_2SO_4). Ambos el ácido sulfuroso y el ácido sulfúrico corroen el concreto.

Los revestimientos de concreto de los túneles usados por las locomotoras de combustión por petróleo y los puentes de concreto sobre líneas ferroviarias, están expuestos al anhídrido sulfuroso presente en el gas expedido por la locomotora, pero el deterioro del concreto en estos casos usualmente despreciable si el concreto está bien fabricado y la superficie expuesta se halla seca.

Las chimeneas de concreto armado poseen un problema especial debido a la condensación de ácidos por la humedad presente cerca de la boca de salida. Por esta razón a menudo se utilizan revestimientos resistentes al ácido en estas estructuras.

La combustión del carbón o combustibles derivados del petróleo en las ciudades o por plantas industriales puede elevar apreciablemente el contenido de anhídrido sulfuroso en la atmósfera. En climas húmedos o lluviosos, la reacción entre el anhídrido sulfuroso y el agua puede llevar a una condición ácida la cual en un periodo de años puede causar daños de la superficie expuesta del concreto.

3.2.3.3 OTROS GASES

Anteriormente hicimos mención de los gases más comunes o de mayor interés que atacan al concreto. La evolución del hidrógeno sulfurado en los desagües, y su eventual oxidación al ácido sulfúrico ha sido discutida previamente.

Varios gases industriales incluyendo el cloro, cloruro de hidrógeno, bromuro de hidrógeno y yoduro de hidrógeno disueltos en agua forman ácidos. El cloro y el cloruro de hidrógeno forman ácido clorhídrico; el fluoruro de hidrógeno forma el ácido fluorhídrico; el bromuro forma el bromhídrico; y el yoduro de hidrógeno forma el ácido yodhídrico.

Todos estos ácidos atacan al concreto, y si la concentración es lo suficientemente alta, la corrosión podría ser grave. La concentración en el aire de algunos de estos gases que se requiere para formar ácidos apreciablemente corrosivos con una humedad atmosférica normal o en contacto con el concreto húmedo no es conocida, pero es probable que esté por encima de los valores que se considera fisiológicamente seguros.

El gas amoníaco es usado para varios propósitos. Se disuelve rápidamente en agua para formar el hidróxido de amonio comúnmente llamada agua amoniacal. Es inofensivo al concreto.

3.2.4 ATAQUE POR BASES

En el tema 3.2.1 definimos cuando una sustancia es básica o ácida, y la cantidad de iones hidroxilos (OH^-) necesarios para que sean básicos o en el caso de los ácidos la cantidad de iones de hidrógeno (H^+) para ser ácidos. Ambos casos dañinos en soluciones disueltas en agua.

Las bases pueden ser definidas como compuestos químicos que desprenden iones oxidrilos (OH^-) en solución en agua; estos iones neutralizan los ácidos formando sales y tienen valores $\text{pH} > 7$. Ejemplos comunes de estos compuestos son el hidróxido de sodio (NaOH ; soda cáustica) y el hidróxido de amonio (NH_4OH ; amoníaco).

El concreto de cemento portland hecho con agregados no reactivos con los álcalis es altamente resistente a las más fuertes soluciones de la mayoría de las bases, no siendo afectado por exposición continua a soluciones al 10% de hidróxido de sodio o potasio.

Sin embargo, si las circunstancias son tales que el hidróxido de sodio puede penetrar en el concreto y concentrarse en una zona con evaporación, podría resultar un daño físico resultante de la cristalización del $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ o del $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ formados por la reacción entre el NaOH y el dióxido de carbono proveniente del aire.

Ciclos alterados de humedecimiento y secado del concreto utilizando una solución de NaOH podrían proporcionar el mismo efecto. Los hidróxidos de calcio, amonio, bario y estroncio son menos peligrosos.

La penetración de soluciones de NaCO_3 (Carbonato de Sodio), con subsecuentes concentraciones por evaporación en la zona, o ciclos alternados de humedecimiento y secado, podría resultar en la cristalización del carbonato de sodio sin involucrar el CO_2 del aire. Estos efectos son minimizados mediante el uso de concreto de baja permeabilidad, en la medida que las soluciones de carbonato de sodio no tienen un efecto dañino sobre el concreto de buena calidad y bien curado (excepto en lo mencionado antes) pero la superficie del concreto fresco podría deteriorarse.

Biczok ha reportado que en soluciones básicas muy concentradas (mayores al 20%) podría observarse corrosión debido a la disolución de los silicatos y aluminatos formados por la hidratación del cemento portland; además propuso que los cementos puzolánicos no sean utilizados para concretos que se exponen a soluciones fuertemente básicas. De los diversos tipos de cementos portland, aquellos con un 12% o más de aluminato tricálcico son menos resistentes a las bases fuertes, y aquellos más resistentes son los cementos portland con bajo contenido de aluminato tricálcico. Este requisito puede ser innecesario, en el caso de soluciones básicas con menos del 10% de concentración, siempre que el concreto sea de alta calidad.

3.2.5 ATAQUE DE SULFATOS

3.2.5.1 GENERALIDADES

Los sulfatos en estado sólido no afectan al concreto, pero en solución producen un fuerte ataque que se manifiesta en deformaciones y fisuras. Los sulfatos se encuentran en la naturaleza en forma sólida (yeso, anhidrita, etringita) o disueltos en aguas superficiales y subterráneas, así como en los suelos o en el agua de mar.

Sus concentraciones difieren considerablemente. Los suelos y las aguas que contienen aquellos sulfatos son denominados "alcalinos", todos son potencialmente peligrosos al concreto.

El ion sulfato aparece en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas. En ellas, el contenido de ion sulfato es elevado en el caso de terrenos arcillosos, constituyendo uno de los más importantes alimentos de los vegetales. En zonas áridas, los sulfatos se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario.

Los sulfatos de calcio, sodio, potasio y magnesio son responsables de algunos de los más destructivos ataques al concreto. Estos sulfatos podrán encontrarse en los suelos como el caso del sulfato de calcio (yeso y aguas selenitosas); los sulfatos de magnesio, (exomita) de sodio y calcio, (glauberita) y de sodio (tenardita), que tienen diferentes solubilidades. El ataque se presenta en forma de expansión debida a la formación de productos sólidos cuyo volumen es mayor que el de las sales que entran en la reacción.

En el Perú, debemos entender que por su condición de país litoral, con una longitud de 1800 kilómetros, la presencia de formaciones de yeso de origen marino asociados con las calizas, en los departamentos de Tumbes, Piura, Lambayeque, La Libertad y Ancash. Así mismo, se encuentra yeso en las llanuras pre-andinas formadas en el cuaternario y levantadas junto con la costa. La franja interandina también tiene suelos ricos en yeso, en los departamentos de Ancash, Ayacucho, Arequipa y principalmente en Junín.

3.2.5.2 MECANISMO DE ATAQUE

Los sulfatos de calcio, sodio, potasio y magnesio son responsables de algunos de los más destructivos ataques al concreto. El ataque se presenta en forma de expansión debida a la formación de productos sólidos cuyo volumen es mayor que el de las sales que entran en la reacción.

El mecanismo de la reacción química de ion sulfato como sustancia agresiva consiste en la formación de una sal fuertemente expansiva, que produce la fisuración y agrietamiento del concreto.

La acción del sulfato de calcio sobre los compuestos del cemento es relativamente simple: ataca al aluminato tricálcico y en menor cantidad al ferro aluminato tetracálcico, produciendo sulfo aluminato de calcio (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).

El sulfato de sodio reacciona doblemente, primero reacciona con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento, formando el sulfato de calcio e hidróxido de sodio; a su vez, el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita con aumento de volumen.

El sulfato de magnesio, produce un mayor daño, actúa sobre todas las fases de la pasta de cemento, incluso los silicatos cálcicos, mediante acciones complejas que modifican el pH de las pastas de cemento; además de atacar al aluminato hidratado con la formación de etringita e hidróxido de magnesio, ataca a los silicatos hidratados por formando yeso, hidróxido de magnesio casi insoluble y gel sílice.

Siendo la etringita inestable en presencia del sulfato de magnesio, la reacción al continuar forma yeso. Así, el ataque de este sulfato es potencialmente más extenso que los ataques de sulfato de sodio o potasio.

Los sulfatos de calcio, magnesio o sodio pueden reaccionar con el aluminato tricálcico y la cal libre del cemento para formar el sulfo-aluminato, con gran aumento del volumen, expansión y agrietamiento del concreto.

El sulfo-aluminato de calcio que se forma en el ataque es una sal doble de baja solubilidad, la cual tiene un alto contenido de agua de cristalización lo que lo permite experimentar un gran aumento de volumen el cual origina presión, agrietamiento y destrucción del concreto.



FOTO 3.3 Sobrecimiento afectado por el ataque de sulfatos (Playa de Chorrillos-Lima)

Adicionalmente puede presentarse, además de las mencionadas, una acción puramente física por la cristalización de los sulfatos en los poros del concreto, la misma que puede causar daño considerable y ataques destructivos del concreto.

Esta acción destructiva se incrementa con la concentración de sulfatos en el agua, por renovación del medio agresivo, por alternancia de los procesos de saturación y secado, por absorción y elevación capilar, y por la acción del clima que puede favorecer la formación de cristales de sulfatos y sulfo-aluminatos.

En la tabla 3.7 podemos apreciar las reacciones químicas que le suceden al concreto al estar expuesto al ion sulfato en solución.

TABLA 3.7 Ataques por sulfatos

ESQUEMA DE ATAQUE POR SULFATOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Sulfato en solución proveniente del medio exterior. • Aluminato tricálcico (C₃A), uno de los primeros compuestos formado durante la hidratación del clínker contenido en todos los tipos de cemento. • El ion de calcio liberado por los procesos de hidratación del clínker portland. • La sal hidratada que se crea en dichas condiciones, con acción expansiva 	SO ₄ + agua + C ₃ A hidratado + Ca + sulfoaluminato de calcio hidratado

El comportamiento y el grado desarrollo de los elementos de concreto están sujetos a los 4 parámetros principales siguientes:

- | | | |
|----------|---|--|
| Externos | { | A. Condiciones de exposición |
| | | B. Cantidad de agua disponible |
| Internos | { | C. Capacidad de penetración del concreto |
| | | D. Susceptibilidad de la matriz |

A. **Las condiciones de exposición de los elementos del concreto**, influyen en la severidad del ataque ocasionado para una misma concentración del sulfato.

- Cuando los elementos de concreto están expuestos a presión hidráulica unilateral, la acción del ataque será mayor.

- Las dimensiones de los elementos de concreto influyen también en el grado de ataque, por ejemplo, es mayor en paredes delgadas que en paredes gruesas.
- Cuando se presentan oscilaciones de la capa freática el grado de ataque es mayor. En efecto, el concreto se satura cuando el nivel es alto y cuando desciende se seca parcialmente, al subir nuevamente el agua, se llenan los poros, pero la concentración de sales se incrementan con relación a la solución original. Al repetirse los ciclos las soluciones muy concentradas causan un fuerte deterioro.
- En las estructuras marítimas la sección del concreto entre el alta y baja marea, sujeto a ciclos de humedecimiento y secado, el ataque es mayor que el que se produce en el concreto permanentemente expuesto. Por otra parte, el fuerte porcentaje del ion cloro del agua no detiene la expansión.
- Las estructuras de concreto, cimentadas en suelos con presencia de soluciones de sulfatos, de tener una relación superficie/volumen importante, sufren un ataque más rápido e intenso, por razón de la evaporación del agua que origina la concentración de los sulfatos. En casos expuestos llevan a pensar que los resultados de los ensayos de laboratorio no son Aplicables directamente a construcciones específicas y que las recomendaciones para el diseño del concreto, basadas en la concentración de la solución, si bien son un indicador muy importante, no deben ser el único a considerar en las especificaciones de una estructura.

B. **La velocidad del flujo del agua freática**, puede incrementar el daño a los elementos de concreto, si contribuye a reponer los sulfatos removidos al entrar en combinación con los componentes del cemento.

C. **La penetración de las soluciones de sulfatos** en los elementos de concreto, y por consiguiente la magnitud del ataque, está en razón de la permeabilidad del material.

La permeabilidad en líneas generales está determinada por:

- Vacíos debidos a una deficiente consolidación o por la exudación;
- La permeabilidad de la pasta de endurecida, principalmente, los poros capilares que están con la relación agua/cemento. También, se ha determinado que la permeabilidad se reduce conforme se incrementa el tiempo de hidratación del cemento (edad en el concreto) y aumenta el contenido de cemento. Además, la intensidad del curado incrementa la hidratación del cemento, reduciendo la permeabilidad de la pasta.

D. Los desarreglos ocasionados en el concreto por la acción agresiva de los sulfatos, se deben a la expansión de la matriz de cemento hidratada por la reacción de las soluciones de sulfato con los productos de hidratación del aluminato. En consecuencia es necesario seleccionar cementos portland de calidad adecuada, como los del tipo II, los adicionados con puzolanas y escoria para el caso de moderada resistencia a los sulfatos y el tipo V de alta resistencia a los sulfatos.

Estos cementos se caracterizan por su contenido máximo de aluminato tricálcico, 8% en el tipo II y 5% en el tipo V.

El tipo V, tiene como condición adicional que la suma de los contenidos de aluminato tricálcico y ferro aluminato tetra cálcico debe ser menor que el 25%.

Para moderada concentraciones de sulfato, los cementos puzolánicos, fijan el hidróxido de calcio libre y desactivan en parte la acción sobre el aluminato. En estos casos se requiere que la agresión del sulfato se produzca con posterioridad a la acción de la puzolana.

Adicionalmente, se ha encontrado que puede presentarse, además de las reacciones químicas ya mencionadas una reacción puramente física, por cristalización de los sulfatos en los poros del concreto, la cual puede causar daño considerable y destructivos ataques al concreto. En relación con este ataque se ha podido establecer que:

- La magnitud y velocidad del ataque por ataque por sulfatos varía con la concentración de los mismos.

- La acción destructiva se incrementa conforme aumenta la concentración de sulfatos en las aguas subterráneas y tiende a disminuir con aumentos en el volumen de exposición seca.
- Un concreto seco que esté en suelos sulfatados secos no será atacado o lo será muy ligeramente.
- Si el ataque es continuo por renovación del medio agresivo, caso de aguas freáticas portadoras de fuertes concentraciones de sulfatos, el ataque podrá ser más rápido y severo
- Cuando los procesos de saturación y secado se alternan con frecuencia, el ataque puede adquirir un grado de severidad muy alto.
- Por absorción capilar las soluciones de sulfatos pueden tender a elevarse dando origen a procesos de descascaramiento de la superficie del concreto por encima del nivel del suelo. En climas cálidos, en los que la evaporación puede ser muy fuerte, se favorece la formación de cristales de sulfatos y sulfo-aluminatos que pueden expandirse con fuerza suficiente para destruir la superficie del concreto.

3.2.5.3 DETECCIÓN DEL ATAQUE POR SULFATOS

Los ensayos de permeabilidad demuestran que el agua con sulfatos penetra rápida y profundamente en el interior de la masa de concreto debido a su capacidad humectante o de infiltración.

En el ataque por sulfatos de la pasta endurecida del cemento, a consecuencia del aumento de volumen de la Etringita formada por la reacción entre el sulfato y el aluminato tricálcico, sufre un aumento de volumen, se hincha y expansiona, se forman fisuras y el concreto se desintegra y se desmorona (Foto 3.4).



FOTO 3.4. Ataque por sulfatos en el concreto bajo un ambiente marino

Las redes de desagüe que tienen varios años están expuestas al ataque de sulfatos, donde se presentan fisuras, y es probable que estas fisuras sean debidas a los gases sulfurosos generados por los procesos de descomposición de las materias orgánicas, explicadas en el tema 3.2.2.5. Al descubrir la tubería se observa una hinchazón típica del concreto, lo que ha debilitado a todo el elemento.

El efecto de las soluciones de sulfato sobre morteros o mezclas de concreto pueden seguirse observando el cambio de resistencia a la compresión o también midiendo la expansión gradual. Esta última puede medirse en testigos de mortero sumergidos en soluciones sulfatadas con concentraciones similares a las que va a estar en contacto con los elementos de concreto durante su vida servicio.

Existen afecciones en cimentaciones por la acción agresiva de sulfatos del terreno, donde pueden existir aguas sulfurosas, lo que producirían asentamientos de las estructuras o cimentaciones, podemos observar que el concreto se encuentra hinchado, poroso y lleno de fisuras, lo que obviamente afecta sus propiedades mecánicas.

3.2.5.4 RECOMENDACIONES Y CONSIDERACIONES GENERALES

El R.N.C., el Código ACI-201 y el código europeo ENV206, establecen 4 niveles agresivos para los concretos expuestos a la reacción de sulfatos, que pueden encontrarse como sulfatos solubles en el suelo o en el agua, según se expresa en la tabla 3.8 correspondiente.

En el caso del agua de mar, se le considera como moderada agresividad pese a su contenido de sulfatos porque en el concreto dentro del agua no existe oxígeno lo que limita la condición de oxidación y además los sulfatos se encuentran combinados con los cloruros.

El R.N.C. establece dos requerimientos al concreto para cada uno de los ambientes agresivos: el tipo de cemento y la relación a/c máxima. El código del ACI agrega la resistencia mínima.

En la situación de moderada exposición a los sulfatos, el R.N.C. prescribe el cemento denominado como de moderada resistencia a los sulfatos. El ACI considera además como aptos en esta circunstancia, a los cementos portland puzolánicos y los cementos portland de escoria. En efecto, un clinker del tipo I con la incorporación de adiciones minerales contiene un porcentaje en masa de C_3A compatible con los mínimos requeridos.

En el caso de la exposición "severa" a los sulfatos, tanto el RNC como el código del ACI consideran el uso de los elementos portland denominados como resistentes a los sulfatos. Cuando se trate de exposición "muy severa" a los sulfatos, se prescribe el empleo de este cemento adicionado con puzolanas adecuadas.

Los cementos resistentes a los sulfatos fueron introducidos en la norma ASTM en 1940, teniendo en consideración la información obtenida de estudios de larga duración realizados en la década de 1930, en especial los de Miller y Manson considerando 106 cementos comerciales. Sus resultados permitían inferir el buen comportamiento de los concretos bajo la acción de los sulfatos, con cementos de contenido de aluminato tricálcico inferior al 5.5%.

En la norma prescriptiva ASTM C150 el cemento portland tipo II, de moderada resistencia tiene como requerimiento adicional un porcentaje máximo de 8% de C_3A en su composición química.

En el cemento tipo V o "resistente" se especifica cómo el 5% de C_3A como máximo y además un máximo del 25% para la relación $C_4AF + 2(C_3A)$.

La experiencia recogida en las últimas décadas sobre el comportamiento de los cementos resistentes a los sulfatos y la evaluación mediante la aplicación del procedimiento de ensayo definido por la norma ASTM C 1012 ha permitido que la moderada norma de performance de cementos que ha emitido la entidad, y que funciona alternativamente con las anteriores normas prescriptivas, los cementos de moderada y alta resistencia puedan ser definidos según la norma de ensayo precitado.

En la norma de performance de los cementos, la resistencia a los sulfatos se aprecia mediante la norma NTP 334.065, equivalente a la norma ASTM citada.

Estas especificaciones se refieren a la expansión de especímenes de mortero mantenidos en una solución de sulfato de sodio por un lapso que llega hasta los seis meses con expansiones máximas permisibles del 0.1 y 0.05 para los dos tipos y al año de alta resistencia con expansión límite del 0.1%.

Los comentarios a las especificaciones del ACI, que forman parte del código, mencionan que en algunos casos los cementos portland del tipo I con contenido C_3A menor al 8% ó 5% pueden usarse en exposición moderada o severa a los sulfatos.

Asimismo, en construcciones en agua de mar es posible usar cualquier tipo de cemento portland, que no exceda el 10% de contenido de C_3A , siempre que la relación agua/cemento sea menor que 0.4%

TABLA 3.8 Recomendaciones para el concreto de peso normal expuesto a ataques de sulfato

TIPO DE EXPOSICIÓN A LOS SULFATOS	SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (SO ₄) PRESENTES EN SUELOS (% en peso)	SULFATO (SO ₄) EN AGUA (p.p.m)	TIPO DE CEMENTO RECOMENDADO	RELACION AGUA/CEMENTO RECOMENDADA (Máx.) (Concreto Normal	f'c MINIMO (kg/cm ²)
DESPRECIABLE	0 a 0.10	0 a 150	-----	-----	-----
MODERADA	0.10 a 0.20	150 a 1500	II, IP(MS)** IS(MS), P(MS) IPM(MS) I(SM)(MS)	0.50	280
SEVERA	0.20 a 2.00	1500 a 10000	V	0.45	310
MUY SEVERA	>2.00	>10000	V + Puzolana	0.45	310

MS** de moderada resistencia a los sulfatos: según la norma NTP 334.082:2001

Para mayor referencia de los tipos de cementos que tienen cierta resistencia a los sulfatos, podemos verlos en el tema 2.3.4

Puede obtenerse protección contra el ataque por sulfatos si se emplea un concreto denso y de alta calidad, con una relación agua/cemento baja, así como un cemento que tenga la necesaria resistencia a los sulfatos. La incorporación de aire puede ser favorable en la medida que contribuye a reducir la relación agua/cemento. La adición de cloruro de calcio (incorporadores de aire) al concreto reduce su resistencia al ataque por sulfatos y su uso debe ser prohibido, especialmente en los casos de exposición severa y muy severa.

¿Cuáles serían las recomendaciones adicionales para el cemento?

- (1) En relación con el contenido de aluminato tricálcico deberá tenerse presente lo siguiente:
 - a) Los cementos con menos del 6% de C_3A presentan buena resistencia al ataque sulfatos.
 - b) Si el contenido de C_3A es mayor del 12% el concreto sufrirá ataque independientemente de la densidad del mismo.
 - c) Contenidos de C_3A por encima del 9% pueden dar origen a desintegración del elemento estructural en plazos no mayores de 5 años.
 - d) Los concretos pobres preparados con un cemento de bajo contenido de aluminato tricálcico tienen mejor resistencia al ataque por sulfatos que los concretos ricos preparados con un cemento de alto contenido de C_3A .
 - (2) Puede mejorarse la resistencia de un cemento al ataque por sulfatos aumentando la relación C_3S/C_2S .
 - (3) En mezclas pobres es recomendable que el contenido de cal libre del cemento no exceda de 0.5%.
 - (4) Los concretos porosos preparados con cemento de bajo contenido de C_3A pueden sufrir fuertes daños debido al ataque por sulfato dado que el agua penetra a través del concreto, se evapora y deposita sales de sulfatos dando lugar a un incremento de la concentración y la formación de cristales. El doble ataque de fuerzas físicas y químicas incrementa el daño.
-

¿Cuáles serían las recomendaciones para los agregados?

(1) En relación con el agregado fino se tendrá presente lo siguiente:

- a) El agregado fino deberá cumplir con las especificaciones de la norma ASTM C 33.
- b) Preferentemente se utilizará agregado cuyas rocas originarias sean ígneas.
- c) El agregado estará constituido por fragmentos de rocas limpios, duros, compactos, de perfil angular y textura rugosa. No deberá presentar elementos escamosos.
- d) El agregado no deberá tener materiales que puedan ser peligrosamente reactivos con los álcalis del cemento.
- e) El agregado no deberá tener sales solubles totales en porcentaje mayor del 0.015%.
- f) En el ensayo de estabilidad de volumen la pérdida no deberá ser mayor del 8% empleando sulfato de sodio como reactivo.

(2) Las consideraciones que se deben tomar para el agregado grueso son las siguientes:

- a) De preferencia se empleará grava de río triturada o roca triturada. Las partículas serán limpias, compactas, de textura rugosa y perfil angular. No deberán presentar elementos escamosos.
- b) El agregado deberá estar libre de sulfuros o sulfatos en forma de sales o revestimiento superficial. Igualmente, no deberá presentar revestimientos o incrustaciones superficiales.
- c) En el ensayo de estabilidad de volumen la pérdida no deberá ser mayor del 10% empleando sulfato de sodio como reactivo.

(3) Tanto para el agregado fino como para el grueso, no deberá emplearse para el lavado del mismo con agua que contenga sales, materia orgánica o sólidos en suspensión.

¿Cuáles serían las recomendaciones para los aditivos?

- (1) Es recomendable el empleo de puzolana, que al combinarse con el hidróxido de calcio y convertirlo en insoluble, impide la formación de sulfo-aluminato de calcio, controlando la posibilidad de desintegración de la estructura.

- (2) El empleo de cementos puzolánicos y fundamentalmente la sustitución del 15% al 30% de cemento en peso por material puzolánico incrementará la resistencia a los sulfatos de concretos preparados con todos los tipos de cementos, incluyendo el tipo V. La efectividad de la acción puzolánica se incrementa con aumento del tiempo de curado.

- (3) Las cenizas tienen efectos similares a los de las puzolanas.

- (4) No es recomendable el empleo de cloruros de calcio o de sodio como acelerantes.

- (5) La incorporación de aire a la mezcla puede favorecer la resistencia del concreto al ataque por sulfatos.

3.2.6 ATAQUE POR CLORUROS

3.2.6.1 CONCEPTOS GENERALES

Los cloruros se hallan normalmente en el ambiente en las zonas cercanas al mar, en el agua marina, ciertos suelos y aguas contaminadas de manera natural o artificial.

En los terrenos y las aguas subterráneas naturales la concentración de cloro no es alta, generalmente se encuentran cantidades de 30 a 100 mg/lt. En cambio si se trata de aguas de regadío que están en contacto con abonos minerales o de aguas residuales industriales el contenido de cloro puede llegar de 700 a 1000 mg/lt.

El cloruro de magnesio ($MgCl_2$) o el cloruro de aluminio ($AlCl_3$), reacciona con la cal de la pasta de cemento endurecida formando compuestos solubles en el agua que pueden ser lavados por esta. Los cloruros de metales alcalinotérreos como el cloruro de sodio ($NaCl$) o el cloruro de potasio (KCl), que no reaccionan con la cal ni con el restante componentes de la pasta, no son perjudiciales en sí, pero en soluciones concentradas pueden producir la lixiviación de la cal. Por ejemplo, el $NaCl$ provoca una ligera reacción de intercambio disolviéndose el $CaCl$ resultante. Los cloruros tienen una acción insignificante sobre el concreto desde el punto de vista de la agresión química directa. Pero erradamente se les considera en muchas oportunidades causantes de deterioro que es producido por otros agentes.

En este sentido hay que tener perfectamente claro el concepto de que los cloruros no tiene acción perjudicial directa sobre el concreto sino es a través de su participación en el mecanismo de la corrosión de metales embebidos en el concreto, produciéndose compuestos de hierro que al expandirse rompen la estructura de la pasta y agregados. El no entender a la cabalidad este fenómeno lleva muchas veces a confusión pues con frecuencia se descartan materiales con cloruros para su empleo en concreto simple sin ser esto necesario.

Como nota interesante debemos comentar que para producir concreto no reforzado, se puede emplear incluso agua de mar, (como en efecto se hace en algunos lugares en el mundo) si la estructura en cuestión no estará sometida posteriormente, a humedecimiento que produzca que entren en solución permanente los sulfatos que también contiene el agua de mar. Empleando complementariamente algún cemento puzolánico o resistente a los sulfatos, en los casos más críticos se controlaría cualquier reacción de sulfatos, ya que estos construirían el único riesgo potencial de deterioro. Si se llega a construir estructuras de concreto armado en un ambiente marino, los iones del agua de mar se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento de concreto hasta llegar a la armadura. Cuando la concentración de los iones de cloruro en la superficie del acero de las armaduras alcanza valores que exceden un nivel crítico, la protección de la armadura corre peligro de desaparecer y la corrosión puede desencadenarse. Hablaremos de la corrosión más adelante, además de la acción desencadenante de los cloruros.

3.2.6.2 EL CEMENTO Y EL ION CLORURO

En el interior del concreto el ion cloruro puede provenir de sus componentes: cemento, agregados, agua de mezcla y aditivos. En prevención de esta ocurrencia, los reglamentos de construcción establecen máximos permisibles en el conjunto según el grado de exposición de la estructura.

TABLA 3.9 Contenido máximo de ion cloruro soluble en agua en el concreto

Tipo de Elemento	Contenido máximo de ion cloruro soluble en agua en el concreto expresado como % en peso del cemento	
	ACI	RNC
Concreto pretensado	0.06	0.06
Concreto armado expuesto a la acción de cloruros	0.15	0.15
Concreto armado no protegido que puede estar sometido a un ambiente húmedo pero no expuesto a cloruros	--	0.15
Concreto armado que deberá estar seco o protegido de la humedad durante su vida por medio de recubrimientos impermeables	1.00 0.30	0.80 --
Otros tipos de concreto armado		

El ion cloruro en el concreto se encuentra combinado químicamente, absorbido físicamente o en estado libre. Únicamente la parte del cloruro no combinado es la responsable de la corrosión del refuerzo. Se estima que aproximadamente el 0.4% del cloruro, con respecto al peso del cemento puede llegar a combinarse.

La difusión del ion cloruro en el concreto se reduce por la capacidad del cemento para combinarlo química o físicamente, en cuanto reacciona con el aluminato tricálcico (C_{3A}) que forman cloro-aluminato cálcicos de composición aproximada:

$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ y la fase ferrita, reaccionando el ferro aluminato tetra cálcico (C_4FAI) o $4CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot Al_2O_3$ con la formación de cloro ferrito cálcico, de composición: $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$.

En el ambiente marino la corrosión se debe a los iones de cloruro provenientes del agua de mar y la brisa marina que se difunden en el concreto a través de su estructura capilar.

3.2.7 ATAQUE POR REACCIÓN DEL AGREGADO (ÁLCALI-AGREGADO)

Las reacciones químicas contenidos en el concreto pueden afectar su comportamiento. Algunas reacciones pueden ser benéficas, pero otras, perjudican al concreto, ya que causan expansión anormal, fisuración y pérdidas de resistencia.

Una de las causas de deterioro del concreto, mas investigada en los últimos cuarenta años, es la denominación reacción álcali-agregado, que se origina entre determinados agregados de activos y los óxidos de sodio y potasio del cemento (Álcalis). La reacción se inicia en la superficie del agregado y se produce en la interface con la pasta de cemento, formando un gel que absorbe y se dilata, creando presiones internas que llevan a la rotura del material.

La condición de humedad y el rango de temperaturas del concreto en servicio pueden influir en la reactividad y sus efectos. En la mayoría de los casos no es necesario considerar que el agregado es reactivo si este tiene un registro de servicios satisfactorio.

La reacción álcali-agregado comprende de los siguientes sistemas:

- Reacción álcali-sílice
- Reacción cemento-agregado
- Reacción álcali- rocas carbonatadas

El sodio y el potasio pueden reaccionar en presencia de iones OH sea con la sílice amorfa (ópalo, calcedonia), sea con los silicatos (granitos, esquistos, feldespatos, micas, basaltos), sea con los calcáreos arcillosos dolomíticos.

3.2.7.1 REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE

3.2.7.1.1 ASPECTOS GENERALES

Se han observado, desde 1940, expansiones en estructuras de concreto preparadas con el mismo cemento y diferentes tipos de agregados, o con el mismo agregado y diferentes tipos de cementos, concluyéndose que algún constituyente de ciertos cementos reaccionaba con algún tipo de elemento de ciertos agregados, produciendo expansiones excesivas y el correspondiente deterioro del concreto.

Los estudios han demostrado que los agentes responsables del cemento eran los óxidos de sodio y de potasio (presentándose en algunas localidades de los Estados Unidos, no habiendo un registro debidamente comprobado en el Perú) que al reaccionar, en forma de hidróxidos alcalinos, con la sílice opalina presente en determinados agregados, producían silicatos alcalinos que, debido a la naturaleza semipermeable de la pasta, producían presiones osmóticas con posterior destrucción del concreto.

La reacción álcali-sílice se ha presentado únicamente en algunas regiones del globo. Se encuentra de manera preponderante en los Estados Unidos de Norteamérica, extendida en la zona central que comprende los estados de Oklahoma, Kansas e Iowa; también, en algunas áreas de Australia, Nueva Zelandia, Alemania, Islandia, Turquía, Dinamarca, Japón y la India.

En Latinoamérica, no se ha registrado reacciones de este tipo, con excepción de algunas puntuales en Brasil y Chile. En el Perú, no se conocen casos, pero tampoco se descarta. En la actualidad se realizan estudios en ciertos yacimientos de agregados en el ámbito nacional.

Los estudios igualmente han demostrado que la reacción se produce siempre que los contenidos de óxidos de sodio y potasio que sean mayores de 0.6% en peso del cemento y los agregados contengan alguna forma reactiva de sílice.

Estas reacciones se presentan con mayor intensidad en climas cálidos con elevada humedad de ambiente y temperatura entre 10° a 38°C.

3.2.7.1.2 MECANISMO DE ATAQUE

La reacción más común se produce entre los constituyentes activos de sílice del agregado y los álcalis del cemento. La reacción de la sílice con los álcalis da nacimiento a sales expansivas, del tipo $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O-CaO-H}_2\text{O}$ que llevan a la fisuración del concreto.

La reacción álcali-sílice se caracteriza por la presencia de dos zonas alrededor de la mayoría de los agregados fracturados y a lo largo del plano de rotura: Una de ellas externa y oscura, en contacto con los agregados es un gel rico en SiO_2 conteniendo además Ca y K. La otra interna blanca, está formada por cristales en forma de hojas más o menos dispersas, conteniendo Si, K y Ca.

Es importante indicar que, individualmente, ninguna de estas manifestaciones puede por si misma ser considerada evidencia cierta que se ha producido la reacción álcali-sílice, sin embargo considerando todos estos signos en conjunto se tendrá una indicación muy fuerte de deterioro debido a la reacción álcali-sílice. La seguridad complementaria se obtiene por análisis petrográfico que indica si las fisuras internas del concreto son causadas por la reacción entre los álcalis del cemento y las partículas silicosas susceptibles de reaccionar.

Los materiales identificados como potencialmente reactivos son el ópalo (amorfo), la calcedonia (criptocristalina fibrosa), el cuarzo criptocristalino mega cristalino, el cuarzo intensamente fracturado, la cristobalita y la tridimita, la riolita, la dacita, la latita, los vidrios andesíticos, o los productos de la desvitrificación criptocristalina de estos vidrios.

Algunas de las rocas que podrían contener los materiales mencionados, aunque ello no significa que necesariamente los contengan, son el horsteno, las calizas y dolomitas silicosas, riolitas, dacitas, andesitas, esquistos y pizarras silicosos, y las filitas.

La reacción empieza con el ataque de los hidróxidos alcalinos, derivados de los álcalis (Na_2O y K_2O) del cemento sobre los minerales silicosos del agregado, que forman un gel de álcalis y silicatos, y se produce una alteración de los límites del agregado. El gel, incorpora agua, que aumenta de volumen y como está confinado por la pasta de cemento, produce presiones internas que llevan a la expansión, fisuración y ruptura de la pasta de cemento.

El fenómeno se debe a la presión hidráulica generada por ósmosis, pero la presión expansiva de los productos sólidos de la reacción de álcalis y sílices puede también causar expansión. Se evalúa que la expansión de las partículas del agregado es lo que hace más daño en el concreto.

Se puede predecir que con ciertos materiales se producirá una reacción entre los álcalis y el agregado, pero no se pueden estimar los efectos perjudiciales a partir del conocimiento de las cantidades de los materiales reactivos. Por ejemplo, la reactividad real del agregado se ve afectada por el tamaño de las partículas y su porosidad, pues ambos factores incluyen sobre el área en que puede tener lugar la reacción. Como la cantidad de álcalis depende tan solo del cemento, su concentración en la superficie reactiva del agregado dependerá de la magnitud de esta superficie.

El contenido mínimo de álcalis del cemento con el cual puede haber una reacción expansiva es de 0.6% expresado en óxido de sodio. Este porcentaje se calcula mediante la estequiometría como el contenido real de Na_2O más 0.658 por el contenido de K_2O del clinker. Dentro de ciertos límites, la expansión de un concreto elaborado con un agregado reactivo dado es mayor al elevarse el contenido alcalino del cemento y, para una misma composición de cemento, al elevarse su finura.

Otros factores que influyen en el desarrollo de la reacción entre álcalis y el agregado, son la existencia de agua no evaporable en la pasta y su permeabilidad. La humedad es necesaria y la reacción se acelera en condiciones sucesivas de humedad y secado.

La temperatura acelera la reacción, por lo menos dentro de la gama de 10° a 38°C. Por lo tanto, puede verse que el problema de la reacción entre los álcalis y agregados se vuelve sumamente complejo, debido a la intervención de diversos factores químicos físicos. En particular, el gel puede alterar su constitución por absorción, y ejercer así una presión considerable, mientras que en otras ocasiones se produce una difusión del gel fuera del área confinada.

La fisuración, en concretos con restricción tiene una forma que ha sido denominada "mapa" o "patrón de mapa" como se muestra en la Foto 3.5. En el concreto armado las fisuras pueden presentarse paralelas al refuerzo. A través de las fisuras se efectúa la exudación del gel con carácter viscoso, que en contacto con CO₂ de la atmósfera endurece con coloración blanca.



FOTO 3.5 Elemento de concreto armado afectado por la reacción álcali-sílice.

Las manifestaciones típicas del deterioro del concreto debido a la reacción álcali-sílice son: expansión; fisuración, exudación del gel a través de los poros o fisuras formando escamas endurecidas o cordones duros sobre la superficie; zonas de reacción en las partículas de agregado afectadas en el concreto; y en algunos casos ampollas en la superficie del mismo.

Las expansiones del gel que envuelve a los agregados generan fuerzas que fracturan la pasta con que está en contacto. Por lo tanto las primeras fisuras se detectarán alrededor de los agregados.

De continuar el proceso las fisuras se harán más evidentes y terminarán por disgregar al elemento.

Estas fisuras a su vez constituyen caminos de ingreso para otras sustancias agresivas y alcancen el interior de la masa de concreto.

Generalmente no se aprecian cambios de coloración ni otro síntoma que a simple vista permitan determinar la existencia de este proceso.



FOTO 3.6 Patrón típico de fisuración debida a la reacción álcali-sílice.

3.2.7.1.2 METODOS DE ESTUDIO

Cuando no se tiene experiencia previa del comportamiento activo del agregado, no es posible evaluarlo cabalmente por la carencia de un método rápido y seguro. Usualmente, se parte por la investigación petrográfica de los agregados para lo cual se cuenta con la norma ASTM C 295, sin embargo, este procedimiento no sólo requiere experiencia en los técnicos que lo aplican, sino que además produce resultados de orientación. El Comité ACI-201, en el documento Guide to Durable Concrete ACI 201.2R, reproduce la tabla formulada por W.J. Halstead en 1958 (tabla 3.10), para clasificar rocas y minerales naturales y vidrios sintéticos que pueden reaccionar expansivamente con los álcalis del cemento.

TABLA 3.10 Minerales y sustancias reactivas, composición química y naturaleza física

MINERALES Y SUSTANCIAS REACTIVAS	COMPOSICIÓN QUÍMICA	NATURALEZA FÍSICA
Ópalo	SiO ₂ .H ₂ O	Amorfa
Calcedonia	SiO ₂	Microcristalina o criptocristalina. De ordinario fibrosa a) Microcristalina a Criptocristalina b) Cristalina muy fracturada, en tensión y/o
Criptocristalina	SiO ₂	llena de inclusiones
Tridimita	SiO ₂	Cristalina
Vidrios riolíticos dacíticos, latíticos o andesíticos, o productos Cripto-cristalino de desvitrificación	Silica, con pequeñas proporciones de Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , CaO, MgO, Na ₂ O y K ₂ O	Cristalina Vitrea criptocristalina como matriz de rocas volcánicas o como fragmentos en tobas
Vidrios silicicos sintéticos	Silícica, con pequeñas proporciones de alúmina, álcalis y otras sustancias.	vitrea

ROCAS PRINCIPALES QUE PUEDEN CONTENER ALGUNO(S) DE LOS MINERALES PRECEDENTES

silex opalinos	Riolitas y tobas
silex calcedónicos	Dacitas y tobas
silex cuarzosos	Andesitas y tobas
calizas silíceas	Fillitas
solomías silíceas	Cuarzos y cuarcitas
esquistos silíceos	Fracturados, en tensión o rellenos de inclusiones

Observación : puede haber rocas con algunas de las denominaciones anteriores que, por no contener los minerales precedentes, sean inocuas.

Un método de ensayo químico, que ha acumulado importantes experiencias para determinar la reactividad potencial de los agregados, es descrito en la norma ASTM C 289. El método pretende inferir la reacción potencial del agregado sujeto a estudio. Al efecto se prepara una reacción con una solución de hidróxido de sodio y una fracción del agregado molido y comprendido entre las mallas 300 mm y 15 mm, determinado la cantidad de sílice disuelta, sin embargo, los resultados que se obtienen no son definidos y en la mayoría de los casos se requiere de otro tipo de análisis. A pesar de ello, esta norma es de general aplicación por la rapidez y facilidad de ejecución.

El procedimiento más concluyente para determinar la potencial reactividad alcalina de la combinación de cemento y agregado, se especifica en la norma ASTM C227; sin embargo, requiere un largo proceso, no menor de 6 meses, para determinar el comportamiento del agregado.

El método de ensayo es simple: se prepara un espécimen prismático del mortero, utilizando el agregado en estudio, con granulometría especificada y un cemento con contenido de álcalis mayor del 0.6%. Los especímenes se conservan en agua a 38°C, midiendo su expansión luego de 3 a 6 meses.

El agregado se considera reactivo, si el incremento de longitud del espécimen es más del 0.05% en el primer caso, y de más del 0.1% al término de la prueba.

Los resultados del ensayo precipitado proporcionan información sobre la probabilidad que una combinación cemento-agregado sea potencialmente reactiva, con expansión destructiva del concreto.

Los criterios para determinar la reacción potencialmente destructiva de las combinaciones cemento-agregado a partir de los resultados de este método de prueba, se proporcionan en el apéndice de las especificaciones para los agregados ASTM C33.

3.2.7.1.3 RECOMENDACIONES

(1) Si se reconoce que los agregados son potencialmente reactivos (ya sea por pruebas de laboratorio o por informes de su comportamiento en obra) no se deben emplear cuando el concreto vaya a ser expuesto en un medio ambiente en que haya presencia de agua de mar o álcalis, sobre todo si se dispone de agregados no reactivos. Cuando se tenga que usar agregados reactivos, previamente se deberán realizar pruebas, y preferencia obtener informes de campo que impliquen que al establecer límites adecuados para el concreto de álcalis del cemento o aplicar una puzolana apropiada o ambas cosas, se puede esperar que el concreto preste servicios satisfactorios. En los casos en que no haya presencia de agua de mar o suelos alcalinos, cuando no se disponga de materiales buenos y económicos se pueden emplear materiales reactivos siempre que se cumplan los requisitos:

- **Cemento con bajo contenido de álcalis:** Se debe utilizar un cemento con bajo contenido de álcalis (equivalente a un máximo de 0.6% de Na_2O). Debido a la necesidad de gastar menos energía en la fabricación del cemento y a los nuevos controles anticontaminantes cada vez será más difícil de obtener cementos con bajo contenido de álcalis excepto a precios especiales. Se debe prohibir el uso de agua de mar o de agua que contenga álcalis, como agua de mezclado y evitar añadir cloruro de potasio o sodio.

- **Puzolanas:** Cuando por razones económicas no se pueda conseguir cemento con bajo contenido de álcalis, se debe emplear una puzolana adecuada de acuerdo a la norma ASTM C 618. Las puzolanas deben probarse de acuerdo con la norma ASTM C441 para determinar su efectividad, para prevenir una expansión excesiva ocasionada por la reacción álcali-agregado. El criterio de considerar una reducción de 75% basada en una relación de cemento a puzolana arbitraria, proporciona únicamente elementos de comparación. En su publicación, Peper y Mather demostraron que se tendrían que usar puzolanas en proporciones mayores respecto al cemento para lograr una reducción del 75% en la expansión de una mezcla de cristales con un cemento que tuviera un contenido equivalente a 1% de Na_2O . Afortunadamente, la mayoría de los agregados son menos reactivos que el cristal. Siempre que se piense aplicar puzolanas debe recordarse que si éstas aumentan la necesidad de agua, pueden provocar incrementos en la contracción producida por desecación. Una mayor finura y una formación de los gránulos del agregado traen como resultado un aumento de necesidad de agua. La velocidad a la cual un concreto hecho con puzolanas bien dosificadas desarrolla sus cualidades de resistencia puede ser igual a la de concretos hechos con cemento portland a los 28 días (aunque pueden originarse retardos en la velocidad de desarrollo de su resistencia).
- (2) La adición de un porcentaje controlado de determinados tipos de sílice finamente molida, permiten controlar, reducir, y aún eliminar la expansión debida a la actividad álcali-sílice.
 - (3) Estando el agua involucrada en la posibilidad de que se produzca la reacción álcali-sílice, cualquier medio práctico de disminuir la exposición del concreto al agua o la humedad, puede aumentar su vida útil.
 - (4) Los factores que puedan controlar la reacción álcali-sílice pueden aquellos que determinen y se eliminen los agregados reactivos, la limitación del contenido de álcalis del cemento y la inclusión como adición de algún material el cual anule la reacción o acelere y produzca mientras el concreto está relativamente blando.

3.2.7.2 REACCIÓN CEMENTO-AGREGADO (ÁLCALI-SILICATO)

3.2.7.2.1 MECANISMO DE ATAQUE

Este tipo de reacción no deber ser confundida con aquellas otras comprendidas dentro de la denominación álcali-agregados; sin embargo, en algunos casos, puede presentarse conjuntamente con la reacción álcali-sílice.

La reacción cemento-agregado es el nombre que se da a una reacción álcali-sílice especial en aquellos casos en que ésta se presenta aun cuando se emplee un cemento de bajo contenido de álcalis. Este es un tipo de reacción en el que el movimiento de humedad y secado posterior pueden originar una concentración de álcalis en área localizadas del concreto.

Se han presentado expansiones excesivas, acompañadas de fisuraciones importantes, en concretos preparados con agregados gruesos de pequeño tamaño y altamente silicosos, a los que se conoce como "arenosos-gravosos" y que presentan feldespatos y granitos de grano grueso como constituyentes importantes. Estos se encuentran en los Estados Unidos en el sistema de los ríos de los Estados de Kansas, Nebraska, Iowa, Missouri y Wyoming, están involucrados en deterioro del concreto atribuido a este tipo de reacción que en el Perú no ha sido detectada.

Estos agregados "arenosos-gravosos" presentan composición diversa y diferentes tendencias expansivas que permiten concluir que el tipo de fisuración producido es causado por reacciones fundamentalmente diferentes de aquellas involucradas en la reacción álcali-sílice. Los concretos afectados por esta reacción suelen contener partículas reactivas con los álcalis, presentándose gel similar al hallado en la reacción álcali-sílice, aun cuando no hay correlación entre la extensión de la fisuración y el contenido de álcalis del cemento, habiéndose observado reacción con excesiva expansión y la consiguiente fisuración en mezclas con cemento cuyo contenido de álcalis era sólo del 0.17% expresado como óxido de sodio.

El uso de aditivos puzolánicos, o la limitación del contenido de álcalis en los cementos a 0.6%, no ha probado generalmente ser efectiva en evitar la fisuración en forma de mapas. Por estas razones varios investigadores han concluido que este tipo de fisuración es causado por reacciones fundamentalmente diferentes de aquellas involucradas en la reacción álcali-sílice. Las similitudes, sin embargo, son interesantes. La expansión y fisuración en forma de mapa son al menos superficialmente similares en ambos casos.



FOTO 3.7 Puente de concreto armado afectado por la reacción álcali-agregado

Se considera que la reacción cemento-agregado es entre los álcalis del cemento que producen un pH alto y abundantes hidróxidos y los componentes silíceos del agregado. Los daños en el concreto son provocados por una expansión interior moderada originada por reacciones álcali-sílice y una contracción superficial ocasionada por condiciones ambientales difíciles.

3.2.7.2.2 MEDIDAS CORRECTIVAS PARA LA REACCIÓN CEMENTO-AGREGADO

- (1) A partir de lo dicho anteriormente, se podría deducir que la reacción físico-química que acompaña o causa la expansión o fisuración debido a la reacción cemento-agregado no es completamente conocida.

Elo es un gran obstáculo en el desarrollo de medidas correctivas y ha forzado a confiar completamente en aproximaciones empíricas las cuales requieren de largo plazo para su adecuada evaluación, recomendamos que siempre que sea posible se evite emplear este tipo de combinaciones cemento-agregado.

- (2) Una medida correctiva bien establecida en la práctica, pero no bien entendida en la teoría, es el uso como agregado de una combinación de casi 70% de material arenoso-gravoso con casi un 30% de caliza triturada del agregado grueso. Además, se deberán realizar pruebas en los concretos para determinar si la combinación da buenos resultados y si la roca caliza de la granulometría seleccionada resiste la congelación al aplicarse en concretos con aire incorporado.

3.2.7.3 REACCIÓN ÁLCALI-ROCAS CARBONATADAS

3.2.7.3.1 MECANISMO DE REACCIÓN

Este tipo de reacción se produce por los álcalis del cemento que actúan sobre ciertos agregados calcáreos, como por ejemplo los calcáreos de grano fino que contienen arcillas, que son reactivos y expansivos.

Este fenómeno se presenta de preferencia cuando el concreto está sometido a atmósfera húmeda.

Se ha encontrado expansión excesiva y fisuración en concretos recién colocados en los que se había empleado agregado grueso proveniente de rocas dolomíticas carbonatadas, (encuentran en algunas pocas localidades de los Estados Unidos y Canadá) apreciándose que la expansión se incrementa con el contenido de álcalis del cemento.

Todas rocas carbonatadas que tienen una reactividad expansiva se caracterizan por los consiguientes aspectos:

1. Son dolomíticas pero contienen una cantidad apreciable de calcita.
2. Contienen arcilla y/o limo
3. Tienen una matriz de grano extremadamente fino
4. Tienen una textura característica consistente de pequeños rombos de dolomita aislados, diseminados en una matriz de arcilla o limo y calcita finamente dividida.

Las investigaciones sobre este tipo de reacción han determinado que algunos tipos de arcilla juegan un papel importante en el mecanismo de expansión, ya sea porque absorben agua con posterior hinchazón actuando activamente durante el proceso de desdolitización, o actuando como una membrana semi-permeable en el desarrollo de presiones osmóticas; o ya sea porque su presencia como un material intersticial entre los rombos dolomíticos debilita la adherencia entre ellos. En cualquier caso la fuerza expansiva en sí misma es lo suficientemente grande como para ser importante en la reacción de dolomitización.

Se han efectuado investigaciones sobre esta reacción, proponiendo medidas de control para el empleo de rocas expansivas. Estas medidas incluyen adecuada selección de las canteras para eliminar las rocas peligrosas, o restringir el volumen y empleo de cementos con alto contenido de álcalis.

El concreto afectado por la reacción expansiva álcali-carbonato se caracteriza por un patrón de fisuración, generalmente más desarrollado en las partes de la estructura en la que el concreto tiene una constante renovación de humedad, como es el caso de las partes de los muelles que están cerca del nivel de agua, en la parte posterior de muros de contención, bajo losas de pavimento, banquetas, en postes o en columnas en los que se presentan un "efecto de mecha". Un hecho que ayuda a distinguir esta reacción del álcali-sílice, es la ausencia de filtraciones del gel silíceo en las fisuraciones. Otros síntomas de la severidad de la reacción son las juntas de expansión que aparecen cerradas y algunas veces, el concreto que las rodea aparece desmoronado.

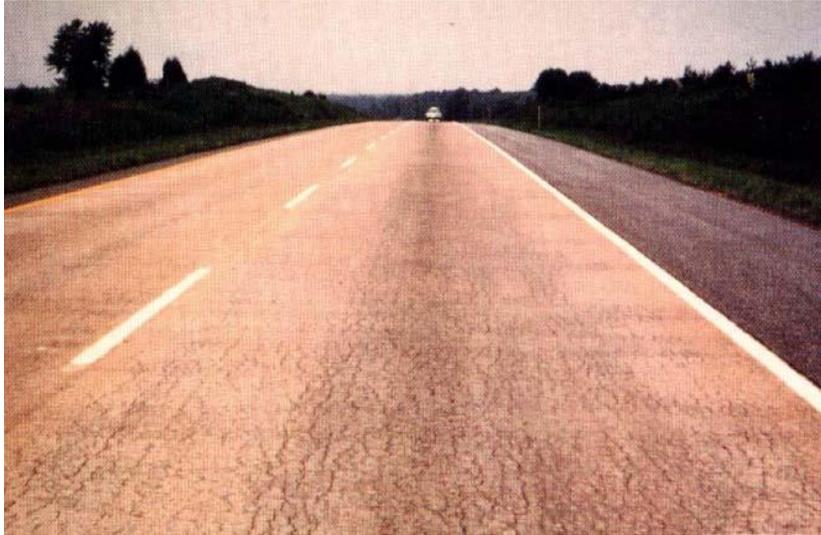


FOTO 3.8 Pavimento de concreto afectado por una fisuración debida a la reacción álcali-carbonato

3.2.7.3.2 IDENTIFICACIÓN POR MEDIO DE PRUEBAS DE LABORATORIO

- (a) Exámenes petrográficos del agregado.- Este tipo de exámenes se puede usar para identificar las características de la roca, tal como las clasificó Hadley, cuya lista fue modificada por Buck y por Dólar-Mantuani. Se reconoce que por lo general, las rocas reactivas tienen rombos dolomíticos cuya dimensión varía entre 1 y 200 mm. De tamaño máximo; estos rombos se presentan sobre un fondo de calcita más fina y de residuos insolubles; pero la presencia de dolomitas (en cualquier cantidad) en una roca carbonatada de grano fino hace deseable que se efectúe la prueba del cilindro de roca (ASTM C586).

Es recomendable realizar la prueba aun cuando se considere que la textura es típica y los residuos insolubles (incluyendo arcilla) forman una parte considerable del agregado. Mientras mayor número de rocas expansivas se van identificando, se descubre mayor variabilidad de textura y de composición. Si se requiere hacer una prueba o análisis petrográfico, para confirmar el tipo de agregado presente y sus características como se explicó.

Se puede observar los daños que hayan resentido el agregado y la matriz que lo rodea, tales como micro y macro fisuración. En algunas partículas de agregado se podrán observar anillos originados por la reacción, que podrán identificarse como negativos o positivos al ser tratados por ácidos; aunque su existencia no significa necesariamente que traerán consecuencias negativas. Dentro de los vacíos del concreto se podrán hallar depósitos secundarios de carbonato de calcio, hidróxido de calcio y etringita, sin encontrarse depósitos de sílice endurecido o en forma de gel que están asociados con el agregado que se investiga.

- (b) Expansión de prismas de concreto.- Los prismas se fabrican con los mismos materiales que van a ser empleados en la obra y después se almacenan a 100% de humedad relativa a 23°C (73°F) o (para acelerar la reacción) se puede fabricar con álcali adicional y/o almacenar a temperatura más elevada. Por lo general, se hacen comparaciones con la expansión de prismas que contienen un agregado no reactivo de control.
- (c) Otras pruebas de laboratorio.- Se puede identificar la reacción álcali-carbonato por medio de un examen visual de superficies aserradas o del suelo. Algunas veces es útil el examen por medio de rayos X de los productos de la reacción.

3.2.7.3.3 CRITERIOS PARA EVALUAR LA REACTIVIDAD

Hasta la fecha no se han establecido correlaciones definitivas entre las expansiones que se presentan en el laboratorio en cilindros de roca o en prismas de concreto y el comportamiento peligroso del concreto en servicio. Los factores que intervienen son complejos y entre ellos se cuentan: heterogeneidad de las rocas, tamaño del agregado grueso, permeabilidad del concreto y cambios en las condiciones ambientales cuando el concreto está en servicio, principalmente el uso de cloruro de sodio como sustancia química descongelante.

Generalmente se observan fisuración en las primas de concreto al alcanzar una expansión de aproximadamente el 0.05%.

La experiencia recopilada en Ontario (Canadá) indica que si los prismas de concreto hechos con la combinación de elementos propuesta para ser empleada en obra, que haya sido almacenados a 23°C con humedad relativa a 100%, no muestran una expansión superior a 0.02% antes de 84 días es poco probable que se presente reactividad. En otros lugares se han sugerido ligeramente más amplios.

No existe certeza de poder determinar rápidamente la reactividad potencial por medio de la prueba del cilindro de roca, ya que en algunas muestras una contracción inicial que puede desarrollarse después de una expansión considerable. No existe una correlación universal entre la expansión de los cilindros de roca y el concreto en servicio, aunque puede existir con prismas de concreto almacenados en el laboratorio.

Comúnmente las expansiones de los cilindros de roca mayores de 0.10% se toman como indicadores de que se deben realizar más pruebas para determinar la expansión del agregado en el concreto. Afortunadamente muchas rocas carbonatadas que se expanden en cilindros de roca, no lo hacen en el concreto.

3.2.7.3.4 RECOMENDACIONES

Los procedimientos recomendados para minimizar la reactividad álcali-carbonato son los siguientes:

- Evitar el empleo de rocas reactivas por medio de extracción selectiva.
- Dilución con agregados no reactivos o uso de un tamaño máximo más pequeño.
- Aplicación de cemento con bajo contenido de álcali (probablemente 0.4% de álcali combinado o menos). En la mayoría de los casos, esto evitará que ocurran expansiones dañinas, pero en pavimentos en los que se utilice cloruro de sodio como sustancia descongelante no puede afirmarse con certeza.
- No existen métodos conocidos de preservar adecuadamente al concreto que contiene los elementos que contribuyan a desencadenar las reacciones ya descritas.

El agua o la humedad intervienen, por lo menos, en dos de estas reacciones. Los efectos destructivos del congelamiento y deshielo son más pronunciados después de las etapas iniciales de destrucción producidas por estas reacciones químicas; por lo tanto, cualquier medio práctico que pueda disminuir la exposición de ese concreto al agua puede aumentar su vida útil.

- Los criterios aplicados actualmente en los Estados Unidos para separar a los agregados reactivos y no reactivos, son generalmente efectivos para prevenir la destrucción catastrófica de estructuras de concreto, pero son ineficientes en dos maneras. Primero han hecho que se tomen precauciones más severas (limitar los álcalis calculados del cemento al equivalente de 0.60% de Na_2O , cuando un límite mayor hubiera sido "seguro") de lo que se podría justificar. Segundo, algunas veces han permitido que ocurran reacciones álcali-sílice que han llegado a causar fisuraciones severas, al permitir el uso de agregados clasificados como no reactivos, en combinación con cementos con más de 0.60% equivalente de Na_2O .

Se llega a la conclusión de que es necesaria una nueva investigación, o una nueva interpretación de los resultados ya obtenidos para poder definir mejor los siguientes parámetros relevantes:

- (a) Grado y velocidad del agregado.
- (b) Influencia de las proporciones en la mezcla del concreto, en especial el contenido unitario de cemento.
- (c) Influencia del medio ambiente sobre el concreto.
- (d) Influencia del tamaño y dimensiones de las estructuras.

3.2.7.4 EXPERIENCIA NACIONAL

En el Perú no se ha "observado" desarreglos en obras de concreto por razón de la reacción álcali-agregado. Consecuentemente, no existe mayor riesgo de reacción álcali-agregado, de utilizar agregados de canteras conocidas, que hubieran evidenciado en el tiempo buen comportamiento.

Este es el caso general de las construcciones dentro del radio urbano. La mayor atención al problema debe darse en los estudios previos que requieren la explotación de nuevos yacimientos, principalmente en construcciones de infraestructura, como sistemas viales y obras hidráulicas. En estos casos, la investigación petrográfica oportuna de las canteras puede permitir la selección de la más conveniente, descartando aquellas que pudieran presentar algún riesgo. Si todos los yacimientos tuvieran minerales que pueden presentar actividad con el cemento, deberá procederse a ensayos de reactividad potencial para evidenciar las que fueran favorables. Finalmente, en la hipótesis de no encontrar una cantera con agregados libres de toda reacción, conviene definir los requerimientos de cemento en la mezcla para evaluar la cantidad de álcalis que estarán presentes en la obra en kg/m^3 y determinar de esta manera el posible riesgo especialmente en contenidos mayores de 3.5kg/m^3 .

En caso desfavorable, se deberá evaluar la posibilidad de utilizar cementos de bajo contenido de álcalis y eventualmente previo estudio, cementos puzolánicos u otras medidas como la sustitución parcial de agregados o al empleo de aditivos. En la última década se ha cuestionado el límite fijado para los cementos de bajo contenido de álcalis, que se considera arbitrario. No todos los álcalis contenidos en el cemento son igualmente disponibles para la reacción. Existe influencia de la forma en que se encuentran los álcalis, se sal neutral o básica, en la magnitud de la reacción. Por otra parte, los álcalis que actúan sobre los agregados en el concreto pueden provenir, además del cemento de los mismos agregados del agua y de los aditivos. La NTP334.009 como su antecedente ASTM C 150, establece que en caso de utilizarse agregados reactivos puede especificarse cementos de bajo contenido de álcalis, limitados al 0.6% y expresado en óxido de sodio según la relación: $\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{K}_2\text{O}$. La NTP 400.037 sobre requisitos de los agregados para concreto, restringe esta exigencia como opcional en el caso de los concretos sujetos a la acción de la humedad, en cuanto la reacción ocurre en presencia del agua.

A nivel internacional, excepción de los países que siguen la norma ASTM, no se especifica limitación para los álcalis dentro de las normas de cemento, salvo en Bélgica y otros países como Argentina, Brasil que los aplican a los cementos resistentes a los sulfatos y la China, India y Alemania a los cementos de escoria.

3.2.8 ATAQUE POR CORROSIÓN

3.2.8.1 CORROSIÓN DEL CONCRETO

La corrosión no es un fenómeno restringido a los metales, también abarca a los materiales pétreos y plásticos.

Las reacciones electroquímicas definen en su mayor parte la corrosión metálica y consecuentemente la de la armadura embebida en el concreto, mientras las reacciones químicas dominan la corrosión del concreto como material de óxidos.

El concreto sin armadura se corroe porque sustancias agresivas son llevadas al mismo mediante soluciones acuosas (naturales o artificiales tales, como efluentes) por medio de gases que se disuelven en una película de humedad, casi siempre presente en la superficie. Estas soluciones causan la disolución del material. Una hinchazón del concreto se observa al formarse productos voluminosos que generan fisuras y grietas en el concreto.

Factores biológicos también pueden intervenir en la destrucción del material, sea por animales marinos, algas o microorganismos. Son las segregaciones digestivas las que inician el ataque. La radiación ultravioleta sólo afecta a los plásticos, pero no a los metales ni al concreto.

El ataque destructivo que afecta al concreto se suscribe a los dos componentes de la matriz que son el agua y cemento. Los llamados áridos (agregados) no forman parte, en sentido estricto, de la corrosión del concreto.

Como en el fraguado el agua desempeña un papel primordial, uno no cree que justamente el agua podría ser un factor desencadenante de la corrosión. Muchas agua naturales son apropiadas para iniciar el ataque.

Por otro lado un contenido de sales que no sobrepasa el 3.5% en peso, puede ser utilizado como agua de mezcla pero nunca cuando se trata de amasar concreto destinado para recubrir armadura, sea ella tensada o no.

¿Cómo es el ataque por el agua?

Una exacta previsión del problema depende de los resultados del análisis químico del medio agresivo. Podemos distinguir tres grados de ataque, basándose en tipo y concentración del ambiente corrosivo. Los tres grados son: débil, fuerte y muy fuerte. Los parámetros más decisivos son: valor pH, presencia y concentración de ácido carbónico y las concentraciones de NH_4^+ , Mg^{2+} y SO_4^{2-} .

Según la Norma DIN (4030) podemos contar con los siguientes valores límites. Ver tabla 3.10

Si de los cinco elementos corrosivos se encuentran en el umbral superior, se debe suponer un efecto potenciado, por ejemplo una concentración de 250 mg/L. de Mg_2^+ y 500 mg/L de SO_4^{2-} dan lugar a un fuerte ataque, aunque los dos valores individualmente permitirían la previsión de un ataque débil o sólo moderado

NOTA: En la tabla 3.10 no aparece el carácter fuertemente agresivo de las aguas blandas, tampoco aparece el ion cloruro porque de por si el cloruro no ataca el concreto fraguado sin armadura.

TABLA 3.10 Ataques del ion cloruro en el concreto simple

REACTIVO	CONCENTRACION (mg/L)		
	Ataque débil	Ataque Fuerte	Ataque Muy fuerte
Ácidos, pH	6.5 - 5.5	5.5 - 4.5	< 4.5
CO_2 y H_2CO_3	15 - 30	30 - 60	>60
Amonio	15 - 30	30 - 60	>60
Magnesio	200 - 300	300 - 1500	>1500
Sulfatos	200 - 600	600 - 3000	>3000

¿Cómo es el ataque por el agua de mar?

El agua marina se comporta de forma excepcional. La concentración salina es de 36 g/L; 1.3g/L corresponden al ion Mg_2^+ y 2.78g/L al ion sulfato. De lo precedentemente expuesto uno podría pensar que el agua de mar es muy agresiva frente al concreto. No es así. Ensayos con una solución pura de Mg_2^+ y SO_4^{2-} de concentraciones iguales demuestran que esta solución en concordancia con la tabla 3.10 es muy agresiva.

La componente que amortigua el ataque del agua de mar es el ion bicarbonato (HCO_3^-) presente en una concentración de 145 mg/L lo que crea una capa protectora de carbonato de calcio, debido al carácter básico del concreto. Esta capa de carbonato de calcio, que precipita, sella la superficie del concreto y los poros y previene de esa forma la penetración de sustancias agresivas (solubilidad del bicarbonato: 1810 mg/L y la del carbonato sólo es 13 mg/L a 18°C). Por eso, el agua de mar puede clasificarse como poco agresiva para el concreto.

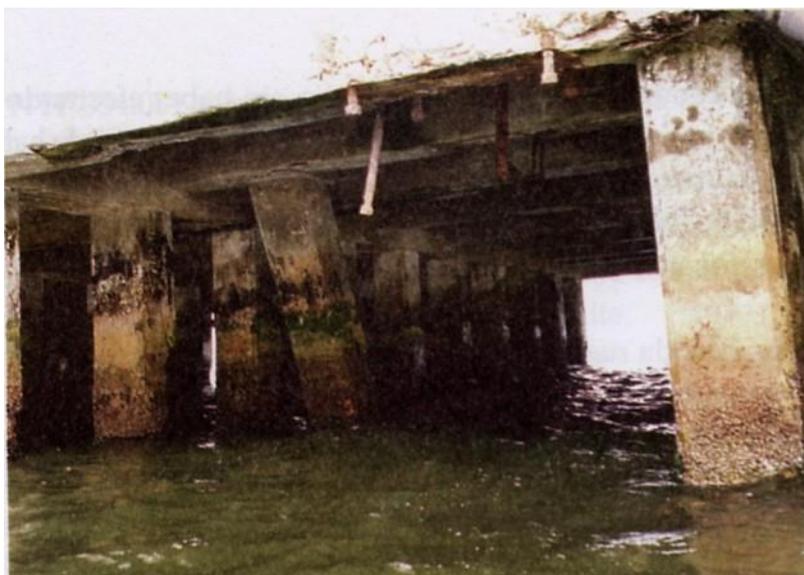


FOTO 3.9 Muestras de corrosión en el muelle de concreto en las zonas de alta y baja marea y en la zona de salpicadura.

3.2.8.2 CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO

Generalmente los metales se encuentran en la naturaleza formando compuestos con otros elementos (óxidos, cloruros, etc.); para usarlos en su forma simple hay que extraer el metal mediante un **proceso de reducción**, lo que exige extraerle cierta cantidad de energía. El proceso inverso por el cual el metal vuelve a su estado natural, va acompañado de un descenso en su energía, es decir, tiene lugar mediante una reacción espontánea.

Podemos afirmar entonces que el metal tiene una tendencia espontánea innata de volver a su estado natural, este proceso que **corresponde a una oxidación** se conoce como **CORROSION** y representa la destrucción paulatina del metal.

Cuando la corrosión metálica tiene lugar en un medio acuoso, ocurren un fenómeno de naturaleza electroquímica, es decir supone la existencia de una reacción de oxidación y otra de reducción y la circulación de iones a través del electrolito; de esta manera se generan dos zonas sobre la superficie del metal, de las cuales una actuará como ánodo y la otra como cátodo.

Donde se produzca la oxidación del metal será la zona anódica, la cual libera electrones que emigran a través de metal hacia otro lugar donde reaccionan a base de producir una reducción de alguna sustancia existente en el electrolito, esta sustancia será los **iones hidrógeno** en medios ácidos y el oxígeno disuelto en el agua en medios alcalinos y neutros.

Así planteado el problema, la corrosión depende de una serie de reacciones en las que interviene directamente los iones del agua es decir, depende del pH del medio, como el potencial del proceso de corrosión depende de estos equilibrios, se puede establecer una relación en términos de **pH**, los cuales representan gráficamente en los diagramas de Pourbaix, estos gráficos establecen para cada metal las condiciones de **pH** y de potencial en las que el metal se corroe, se pasiva o permanece inmune.

¿Cómo es la corrosión de la armadura en el concreto armado?

El concreto y el acero trabajan en conjunto por diferentes razones, aportando cada uno de estos materiales sus mejores cualidades al material nuevo que llamamos concreto armado.

Una de estas razones para el buen funcionamiento es que el concreto confiere al acero una protección de doble naturaleza: por un lado es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro, el líquido encerrado en los poros del concreto es un electrolito que forma un óxido protector (pasivación) de forma duradera.

El ambiente de alta alcalinidad del concreto ($\text{pH} \approx 12.5$) protege al acero, lo pasiva, impidiendo su oxidación más aún si se coloca acero ligeramente oxidado (sin escamas) en el concreto, después de un tiempo el acero aparece limpio; ocurre una desoxidación y se forma una película protectora de hidróxido ferroso, transparente e imprescindible que actúa de barrera impidiendo la oxidación.

La alta alcalinidad del concreto es debida principalmente al hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento y a los álcalis que puedan estar incorporados como sulfatos en el clínker, aunque algunos autores sostienen que la alcalinidad proviene mayormente de la solución atrapada en los poros lo cual es debido a los hidróxidos de sodio y potasio ($\text{pH} = 13$ a 14).

Se debe indicar que la cantidad relativa de cada uno de esos iones depende fundamentalmente de la composición y características del cemento, del grado de hidratación y de la relación agua/cemento (a/c). A esta elevada alcalinidad y con el contenido de O_2 normal del ambiente en las estructuras sobre el suelo, el acero se recubre de una capa pasiva de óxidos muy adherentes, compactos e invisibles, que lo preserva indefinidamente de cualquier signo de corrosión. Mientras el concreto sea de buena calidad y no cambie sus características físico-químicas por acción del medio exterior. Por otra parte en ausencia de oxígeno, el refuerzo de acero se oxidaría muy lentamente sin causar problemas de corrosión del mismo, como es el caso de las estructuras sumergidas, donde el concreto no se encuentre agrietado.

Pero, lamentablemente el concreto por mejor calidad que tenga, pierde gradualmente su estado alcalino y esta situación de protección, de pasivación, desaparece, y alcanza a las barras de refuerzo. **El acero se vuelve entonces vulnerable** ¿Cómo pierde el concreto su estado alcalino? Lo pierde por "envejecimiento" o por "enfermedad".

El "envejecimiento" del concreto es consecuencia del proceso químico que resulta de la combinación del anhídrido carbónico (CO_2) existente en pequeñas cantidades en el aire, con el hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], que constituye una parte importante del cemento hidratado para formar carbonato de calcio (CaCO_3) como consecuencia la carbonatación progresa del exterior al interior del concreto, apareciendo una estrecha banda o "frente" de avance del proceso que separa dos zonas con pH muy diferente una con $\text{pH} > 12.6$ (interior) y al otra con $\text{pH} < 8$ (la superficial). La carbonatación es permanente y lo peor inevitable, si no se toman medidas preventivas. Lo que sí es controlable es su ritmo de avance y esto depende de:

- a. La existencia o no existencia de recubrimientos (enlucidos, enchapes, pintura, etc.) parcial o totalmente "impermeable al aire"
- b. La permeabilidad del concreto que es función inversa de su resistencia y de su grado de consolidación es decir, a mejor calidad de concreto menor velocidad de carbonatación y
- c. La humedad atmosférica la mayor velocidad de carbonatación se da en climas con humedades relativas entre 50 y 70%.

Por ejemplo en Lima, en concretos de 210 kg/cm^2 , bien compactados se ha constatado que la velocidad de carbonatación en estructuras sin forro, es del orden de 1.2 mm por año, en el momento recubierto con losetas la velocidad se reduce un 25%. El concreto también puede perder su alcalinidad por "enfermedad". Esta "enfermedad" ocurre cuando hay cloruros en el concreto armado. ¿Qué consecuencias tiene la carbonatación? Tal como hemos mencionado esencialmente reducir la alcalinidad inicial del concreto que es elevada ($\text{pH} \geq 12.5$), a un medio esencialmente neutro, de afuera hacia adentro del concreto, en el que el pH se reduce a valores del orden de 8.5.

Esta reducción de alcalinidad importa mucho porque reduce la pasivación que protege la reducción de las armaduras inmersas en el concreto y las hace vulnerables a la corrosión.

La corrosión de la armadura en el concreto consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que la rodea (Fig.3.8). La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste de cuatro elementos principales:

- a. Un ánodo, donde ocurre la oxidación.
- b. Un cátodo, donde ocurre la reducción.
- c. Un conductor metálico (la barra de acero) donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones.
- d. Un electrolito, en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.

Al perder el concreto su alcalinidad, el acero como se ha manifestado se torna vulnerable pudiendo sufrir dos tipos de corrosión:

- a. La corrosión por oxidación directa y
- b. La corrosión galvánica

- a. La corrosión por **oxidación directa** ocurre una vez que el acero ha perdido la protección alcalina del concreto ante la presencia **de humedad y oxígeno, necesariamente de ambos**. Típicamente este proceso es lento, particularmente en climas con escasa humedad.

Sin embargo, **inexorablemente** la oxidación del acero comenzará a ocurrir con el envejecimiento del concreto. Una vez iniciada la oxidación esta progresa con rapidez, debido a que el óxido de hierro ocupa varias veces el volumen del acero original generando presiones internas elevadas que el concreto no puede resistir, por lo que se deslaminan, se raja o se fisura dando así acceso directo a la humedad y al oxígeno.

Este tipo de corrosión es **generalizada**, es decir, ocurre en toda el área que se ha carbonatado.

- b. La **corrosión galvánica** es de naturaleza electro-química, es decir ocurren tanto en el flujo de electricidad como procesos químicos. Para ello se requiere la presencia de **humedad y de oxígeno necesariamente de ambos**. En esta situación el concreto armado funciona como una pila de linterna o batería de automóvil. Las barras se convierten parcialmente en ánodos y parcialmente en cátodos. La humedad y los cloruros reducen la resistividad eléctrica del concreto convirtiéndolo en un electrolito. El oxígeno, de otro lado provee el elemento de oxidación.

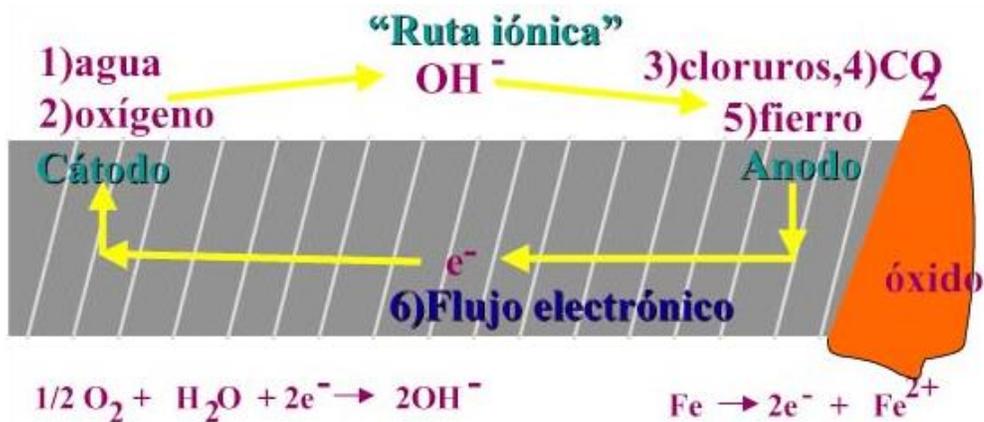


Fig. 3.8 Ruta iónica del proceso de corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

Un ejemplo típico de corrosión galvánica de acción muy agresiva, ocurre con la presencia de **cloruros** en el concreto. El proceso de corrosión en este caso es muy complejo y se activa aún en concretos **no carbonatados**, al iniciarse el movimiento de electrones a través del concreto en el ánodo (+) y el cátodo (-) se destruye la capa pasivamente del acero, carbonatándose localmente el concreto, lo que genera **corrosión tipo picaduras**. El acero anódico comienza a corroerse formando compuestos inestables que luego con el oxígeno forman óxidos férricos estables, en el proceso se carbonata el concreto, se oxida crecientemente el acero aumentando de volumen, luego se fisura, raja o deslaminata al concreto con lo que el proceso de carbonatación se activa acelerando el proceso de corrosión galvánica que se combina además con el proceso de oxidación directa.

Estos iones cloruro destruyen, como se ha dicho, la capa pasivamente del acero de refuerzo, a veces en forma muy concentrada, lo que origina la corrosión por "picaduras". Esta relación de ánodos pequeños y cátodos grandes es sumamente peligrosa puesto que puede provocar la rotura de la barra en la sección atacada.

En resumen para que pueda haber corrosión la carbonatación, por envejecimiento o "enfermedad", debe alcanzar al acero, para iniciar la corrosión debe haber humedad y debe haber oxígeno, además, la existencia de cloruros en el proceso se vuelve particularmente grave, se auto acelera y se auto alimenta.

Los cloruros pueden aparecer en el concreto:

- a. Como consecuencia de agentes externos (es el caso de exposición a ambientes marinos con elevado contenido de cloruro de sodio) y
- b. Incorporadores en la masa de concreto al haber estado presente en uno o más de los componentes del mismo (cloruro de sodio en los agregados o en el agua de la mezcla) o por haber sido introducido en algún aditivo acelerante (típicamente cloruro de calcio).

La cantidad de cloruros crítica por encima de la cual estos se vuelven sumamente peligroso, es del orden de 300 p.p.m. del concreto. Esto equivale a 720 gramos de ion cloruro o por metro cúbico de concreto o aproximadamente a 1200 gramos de cloruro de calcio por metro cúbico.

Las fisuras en el concreto tienen gran influencia ya que constituyen un camino rápido de penetración de los agentes agresivos hasta las barras de acero.

Cuando los agentes agresivos alcanzan el acero embebido en el concreto, las zonas no recubiertas de concreto comenzarán a actuar como ánodo frente a las adyacentes que se comportan como cátodo.

3.2.8.3 CONSECUENCIAS DE LA FISURACIÓN

Existen dos teorías bastante diferenciadas acerca del efecto que tienen las fisuras en la corrosión del acero de refuerzo en el concreto. La primera teoría manifiesta que las fisuras reducen significativamente el tiempo de servicio de las estructuras al permitir el acceso de iones de cloruro, humedad y oxígeno al acero de refuerzo, no solo acelerando el inicio de la corrosión sino también proporcionando espacio para el depósito de los productos de la corrosión. El argumento opuesto o la segunda teoría dice que aunque las fisuras pueden acelerar el arranque de la corrosión, esta corrosión es localizada y confinada a la zona de intersección con las barras de refuerzo. Ya que los iones de cloruro eventualmente penetran en el concreto no fisurado e inician una corrosión más distribuida, después de algunos años de servicio hay muy poca diferencia entre la cantidad de corrosión en el concreto fisurado y sin fisurar. Estas dos teorías representan posiciones extremas, pero actualmente es aceptado que la segunda la teoría se acerca mucho más a la realidad que la primera.

Factores: Hay varios factores que influyen en el efecto de las fisuras sobre la corrosión; los que son función de la fisura por si misma son el ancho, profundidad, forma y orientación de la fisura con respecto al refuerzo. Los demás factores están relacionados con el tipo de estructura y la calidad del concreto.

Forma de la fisura: Es razonable esperar que el ancho de la fisura al nivel del refuerzo determine el alcance de la corrosión, pero la mayoría de los códigos y reglamentos trata con el ancho de las fisuras en la superficie y el hecho es que no existe una relación directa entre el ancho de la fisura en la cercanía de la barra de acero. El ancho de la fisura al nivel del refuerzo está en función del origen de la misma (tal como flexión, tensión o asentamiento del concreto plástico), la cantidad de recubrimiento, el esfuerzo en el acero, la cuantía y colocación de las barras, el diámetro de las barras y la profundidad de la zona sometida a tensión.

Orientación con respecto al refuerzo: Este es uno de los aspectos más significativos del efecto de las fisuras que tienen normalmente como mínimo un ancho de 1mm.

Cuando la fisura es transversal a la barra se observa corrosión localizada (ésta se limita a más o menos tres diámetros de la barra). Si el concreto es de baja permeabilidad la corrosión será cada vez lenta y eventualmente cesará. Si la fisura es longitudinal y coincide con la barra de refuerzo (la causa más común de esto es el asentamiento del concreto plástico ver capítulo 3), la pasividad se pierde en varios lugares y la corrosión se puede desarrollar de manera continua e incluso acelerar el proceso.

Según el ACI presenta los resultados de varias investigaciones dedicadas a estudiar el concreto sometido a diferentes grados de exposición; de la información obtenida se concluye que no hay razón para creer que existe una relación entre el ancho de las fisuras y la corrosión en el acero. El ACI sostiene que la existencia de esta relación se ha sostenido basado en el sentido común: las grietas más anchas deben permitir el más fácil ingreso de sustancias corrosivas, por lo que deben ser más perjudiciales que las pequeñas, y que lo cierto es que las fisuras más anchas pueden causar que la pasividad del refuerzo se pierda más pronto, causando que la corrosión se inicie más temprano, pero no hay razón para esperar que la velocidad de corrosión se vea influenciada por las fisuras.

3.2.8.4 FORMACIÓN DE FISURAS

La aparición de fisuras en las estructuras de concreto armado es inevitable debido a la baja resistencia a la tracción del concreto, la fisuración interior puede comenzar a niveles tan bajos como 210 kg/cm^2 en el esfuerzo. En el diseño normalmente se desprecia la resistencia a tensión del concreto. Las estructuras diseñadas con bajos esfuerzos en el acero bajo cargas de servicio cumplen su función con muy poca fisuración, en muchos casos no hay fisuración visible debido a que muchos miembros no están sometidos a su carga de servicio completa y el concreto tiene cierta resistencia a tensión. Sin embargo, con elevados esfuerzos en el acero por cargas de servicio (consecuencia del uso de acero de alta temperatura), se debe esperar cierta fisuración. El control de la fisuración o agrietamiento es importante para mejorar la apariencia estética de las estructuras; para muchas de ellas, el control de las fisuras desempeña un papel importante en el control de la corrosión al disminuir las posibilidades de que penetren la humedad y sales hasta el acero de refuerzo.

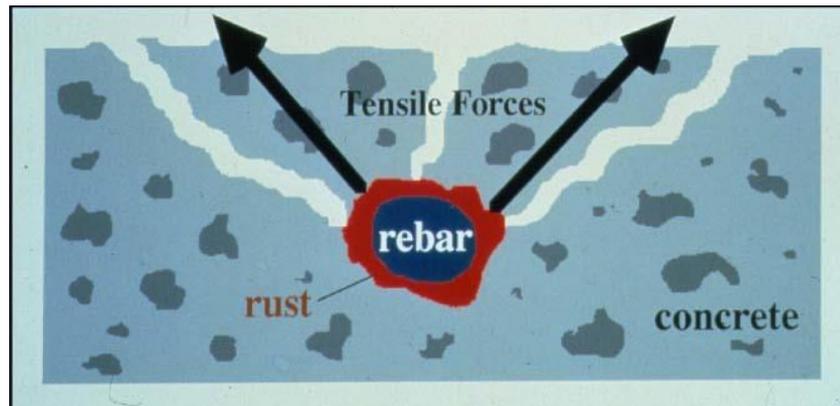


Fig. 3.9 Mecanismo de fisuración, debido a los esfuerzos de tensión generados por la hinchazón del acero de refuerzo afectado por la corrosión.

3.2.8.5 MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

Como se podrá deducir es importante tomar medidas preventivas para evitar o postergar al máximo, la corrosión; los principales métodos de protección y control de corrosión se basan en eliminar alguno de los cuatro elementos que conforman la celda de corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor electrónico). Diversos métodos se utilizan para proteger el concreto armado de la corrosión, por ejemplo:

- Calidad del concreto y de los constituyentes del mismo.
- Pinturas sobre la superficie del concreto.
- Pinturas directamente sobre el acero.
- Recubrimientos especiales en el concreto armado.
- Con protección catódica.
- Agregando inhibidores de corrosión.

A. Algunas medidas nuevas que se toman en estructuras nuevas:

1. Evitar drásticamente el uso de cloruros o la presencia de estos en los componentes del concreto.

Así como no se debe usar cloruro de calcio como aditivo acelerante. Tampoco debe usarse agua de mar para el mezclado del concreto y agregados contaminados con sal en el concreto armado.

2. Una baja relación a/c produce un concreto menos permeable y con mayor resistencia a la corrosión. Por lo tanto, la relación agua/cemento en concretos que con agua de mar, con agua que contenga sales o que estén en contacto con concentraciones de cloruros más moderadas no debe exceder de 0.40, tanto en el caso de que esta concentración se encuentre en nivel del suelo o del agua, como en el caso en que el concreto se encuentre dentro del área de fluctuación de estos niveles o esté expuesto a salpicaduras. Si no se puede lograr esta relación a/c, se puede emplear una relación de 0.45 siempre que se logre aumentar el espesor del recubrimiento de concreto sobre cualquier pieza metálica en 1.3 cm.
3. En concreto colocados hasta 8m sobre el nivel de aguas del mar o sus salpicaduras, o dentro de una distancia horizontal de 30m, la relación no debe exceder de 0.50 (por peso) lo que significa resistencias características no menores de 245 kg/cm², en obras marinas o vecinas al mar la resistencia característica mínima debe ser de 280 kg/cm².
4. Estos límites recomendados sobre la relación agua/cemento se aplican a todos los tipos de cementos portland, aunque algunos estudios a largo plazo sobre la durabilidad del concreto (expuesto al agua de mar) realizados en la PCA, mostraron que el cemento con un contenido del 5 al 8% de aluminato tricálcico (C₃A) presentan menor fisuración provocado por la corrosión del acero, que el cemento con un contenido de C₃A menor a 5%
5. La protección que puede ofrecer el concreto contra la penetración de sales hasta el refuerzo u otros materiales contenidos, está determinada por el espesor del recubrimiento de concreto. En las orillas del mar, en sus cercanías, o en cualquier otro lugar en que exista una combinación de agua de mar (inclusive salpicaduras) y oxígeno atmosférico (libre) en construcciones marinas, y otros ambientes severos, se requiere una capa de concreto mayor a la que se usa normalmente.

Una capa mínima de 7.5 cm es recomendable para esos casos (la AASHTO recomienda 10 cm excepto para pilotes prefabricados). La exposición del concreto en tierra firme (dejando a un lado que haya agua con sales disueltas) no presenta, comúnmente, problemas de corrosión excepto en el caso de cubiertas de puentes. En donde las sales que se aplican para controlar congelamientos como cunetas, banquetas y pasamanos, es recomendable que la capa sea de por lo menos de 5.0 cm y que la relación agua/cemento sea baja (0.40 máximo, por peso).

6. No debe colocarse metales de diferente conductividad eléctrica en contacto dentro del concreto.

Cuando se diseña y construye bien el concreto armado, tomando debida cuenta de las condiciones de exposición a que estará sometido, se previenen posibles "enfermedades", se evita el envejecimiento prematuro, se logran estructuras longevas. En lima es común la existencia de estructuras de concreto armado con 50 años de antigüedad en muy buen estado de conservación.

De otro lado cuando el concreto "enferma" o "envejece" prematuramente y aparecen las primeras evidencias de deterioro como consecuencia de la corrosión del acero de refuerzo, es posible restaurar la competencia estructural pérdida y disminuir el ritmo de corrosión normalmente pero las acciones que deben tomarse son costosas.

B. En estructuras existentes:

En estructuras existentes dependerá en gran medida del diagnóstico de la patología determinada. En general pueden ser:

1. Revestimientos aplicados sobre el concreto en forma líquida formando una capa protectora (epóxicos, acrílicos y poliuretanos).
2. Revestimientos hidrófugos, que son materiales a base de silicona que no solo repelen la humedad y resisten al desgaste, sino que permiten al concreto respirar naturalmente. Al aplicarse sobre la superficie y que penetre impregnándose en ella.

También puede aplicarse protección directa sobre el acero de refuerzo, tales como:

3. Recubrimientos.- Pintado de la armadura con recubrimientos epóxicos y también galvanizado de la armadura.

El recubrimiento protege por barrera, de allí que cualquier poro/daño en el revestimiento es muy perjudicial para la protección del acero.

4. Protección catódica.- Este sistema es el único que se puede considerar como de verdadero control de la corrosión, ya que permite que la armadura se comporte como cátodo.

La protección catódica se puede aplicar por ánodos de sacrificio o por corriente impresa siendo este último el más usado a nivel mundial.

La protección por ánodos de sacrificio implica la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero, el cual actuaría como el ánodo. (En la práctica ánodos de aluminio o zinc).

En el caso de corriente impresa el ánodo podría ser cualquier material ya que se utiliza una fuente de energía de corriente que entra en la estructura a proteger, haciéndola cátodo.

Otro método de protección:

Inhibidores de corrosión.- El inhibidor de corrosión es una sustancia que se agrega a la mezcla de hormigón (concreto) para proteger la armadura contra el ataque corrosivo, aunque algunas veces pueda ir en detrimento de la calidad del concreto.

Este método podría ser la mejor solución en aquellos casos donde el concreto se prepara con agua o arena salobre, también en aquellos trabajos que se ejecuten en construcciones en zonas de salpique en ambientes marinos.

Uno de los primeros inhibidores de corrosión usados en campo, ha sido el nitrito de calcio, pero su efectividad depende de la concentración de iones cloruro en el concreto y de la calidad del mismo (No hay mucha práctica ni reportes de lugares donde se haya aplicado).

3.2.9 ABRASIÓN

La abrasión del concreto es definida como el desgaste de su superficie debido a procesos de fricción o rozamiento. Si bien las partículas arrastradas por el viento pueden tener efecto abrasivo sobre las superficies del concreto, la más importante causa de abrasión en pisos y pavimentos que es producida por el paso de personas, circulación de vehículos, o rodadura de objetos o máquinas.



FOTO 3.10 Pavimento de concreto afectado por la abrasión.

La resistencia a la abrasión viene a ser “la habilidad de una superficie para resistir el desgaste producido por fricción o rozamiento”.

En la mayoría de los casos, el desgaste por abrasión no ocasiona problemas estructurales, sin embargo puede traer consecuencias en el comportamiento bajo condiciones de servicio o indirectamente propiciando el ataque de algún otro enemigo (agresión química, corrosión, etc.). Siendo este último más evidente en el caso de las estructuras hidráulicas. Durante más de un siglo se ha estado investigando con el fin de desarrollar pruebas de laboratorio eficientes sobre la abrasión del concreto. El problema es complicado, ya que existen diferentes tipos de abrasión y no se ha encontrado un método eficaz en todas las condiciones. De acuerdo a las recomendaciones de Prior, se consideran cuatro tipos de abrasión:

1. Desgaste de pisos de concreto debido al tráfico de peatones y vehículos ligeros, patinazos, raspaduras y deslizamientos de objetos sobre la superficie (frotamiento)
2. Desgaste de las superficies de caminos y carreteras de concreto a montacargas, camiones pesados y automóviles con o sin cadenas (rozamiento, raspado, percusión)
3. Desgaste por erosión, que está definida como el deterioro causado por la acción abrasiva de fluidos o sólidos en movimiento. La resistencia a la erosión es importante en estructuras hidráulicas como los vertederos, estribos de puentes y túneles, en la que el concreto está sometido a la acción abrasiva del agua en movimiento la cual transporta partículas sólidas. La acción de choque, deslizamiento o rozamiento de tales partículas puede causar desgaste superficial del concreto.

La magnitud de la erosión depende del número, velocidad, tamaño, perfil, densidad y dureza de las partículas en movimiento por unidad de tiempo.

4. Desgaste de presas de concreto, vertederos, túneles y otros sistemas de conducción de aguas en los que se presentan altas velocidades y presiones negativas. Este tipo se conoce generalmente como desgaste por cavitación, definiremos como cavitación a la erosión progresiva del concreto originada por el flujo no lineal de aguas limpias a velocidades sobre los 12m/seg.

El origen de la cavitación está en que, cuando se forman en aguas en movimiento burbujas de vapor ellas fluyen conjuntamente con el agua. Cuando ingresan a una región de alta presión colapsan con un gran impacto. A este proceso de formación de burbujas de vapor y su posterior colapso se le conoce como cavitación. La energía que se libera durante este colapso puede ser lo suficientemente grande para desgastar áreas de la superficie del concreto en tiempos comparativamente pequeños.

3.2.9.1 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DEL CONCRETO

El factor principal reside en qué tan resistente es desde el punto de vista estructural o mecánico, la superficie expuesta al desgaste.

Se han desarrollado varias maneras de medir el desgaste o la resistencia a la abrasión tanto a nivel de laboratorio como a escala natural, pero los resultados son bastante relativos pues ninguna de ellas puede reproducir las condiciones reales de uso de las estructuras, ni dar una medida absoluta en términos numéricos que pueda servir para comparar condiciones de uso o concretos similares, por lo tanto el mejor indicador es evaluar principalmente algunos factores. Entre estos factores que disminuyen la resistencia del concreto a la acción de agentes abrasivos se puede indicar:

- Resistencia a la compresión.
- Propiedades y características de los agregados.
- Métodos de acabado.
- Las técnicas constructivas.
- Curado.
- Diseño de mezcla.

Algunas pruebas y la experiencia en obras han demostrado que, por lo general, la resistencia a la compresión es el factor que individualmente controla en forma más definitiva la resistencia del concreto a la abrasión, ya que esta aumenta al incrementar la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión y a la abrasión varía de manera inversamente proporcional a la relación entre vacíos (agua + aire) / cemento. Para mezclas ricas, el limitar el tamaño máximo de agregado aumentará la resistencia a la compresión y como resultado se obtendrá una resistencia máxima de las superficies del concreto a la abrasión. Otro elemento de gran importancia es la resistencia de los agregados gruesos y finos a la abrasión (en la superficie).

La vida útil de algunos concretos, tales como los empleados en pisos de almacenes, que están sujetos a la abrasión provocada por el tráfico de vehículos con llantas metálicas o de hule duro, puede aumentarse grandemente mediante el uso de agregados especialmente duros y resistentes. El efecto de la diferencia de dureza entre los agregados es más notable en concretos de baja resistencia que en concretos y recubrimientos de alta resistencia.

Debe ponerse especial cuidado en los procedimientos de acabado si se desea que la calidad de la superficie de una losa de concreto sea tan buena como la de su parte interior. Retardar las operaciones de aplanado y pulido aumenta la resistencia a la abrasión.

En pisos de dos capas, se puede obtener una capa superficial con excelente resistencia a la abrasión y aplicar concreto ordinario en el resto de la losa. Puede hacerse que la capa superficial sea más resistente a la abrasión espolvoreando sobre la superficie capas secas de cemento y de agregado fino duro, o de cemento y agregado de hierro.

Otro factor de gran importancia para obtener concreto resistente a la abrasión y que no desprenda polvo le constituye el curado adecuado. Un estudio demostró que una superficie curada durante siete días es casi el doble de resistente al desgaste que una curada durante tres días solamente; un curado adicional aumentará estas propiedades.

En la colocación de pavimentos de concreto en climas fríos, el bióxido de carbono que se desprende de calentadores sin ventilación, que son utilizados en concretos que sufren intemperismo o procesos de congelación y deshielo, puede afectar adversamente la resistencia a la abrasión.

3.2.9.2 RECOMENDACIONES Y CONTROL DE LA ABRASIÓN

Teniendo claros estos conceptos, es obvio que en la medida que desarrollaremos las capacidades resistentes de la capa de concreto que soportará la abrasión, lograremos controlar el desgaste.

Se estima que la superficie aludida debe tener resistencia en compresión mínima de 280 kg/cm² para garantizar una durabilidad permanente con respecto a la abrasión, lo cual indica que es necesario emplear relaciones agua/cemento bajas no mayor de 0.50, considerar un slump de 1" para la mezcla de coronación o acabados y de 3" para las mezclas de base, compatible con la colocación eficiente, agregados bien graduados que cumplan con las normas ASTM C33 o la NTP 400.037, limpios, sanos y duros, además se utilizará de preferencia agregados gruesos con un tamaño máximo no mayor de 25mm. (1").

Los contenidos de cemento no serán menores de 8 bolsas por m³ si se trata de cementos portland normales o estándar, y de 8.5 bolsas por m³ si se trata de cementos adicionados.

Se recomienda emplear el mínimo contenido de aire compatible con los requisitos dictados por las condiciones de exposición a las cuales el concreto ha de estar sometido. Para pavimentos o losas interiores que no están expuestos a congelación y deshielo es recomendable que el contenido de aire sea no mayor de 3%, ya que además de reducir la resistencia un alto contenido de aire puede producir burbujas, especialmente si a la superficie se le da un acabado de tipo monolítico. Para pavimentos o losas expuestas a intemperismo o a estados de congelación y deshielo se recomienda emplear los valores indicados en el Comité ACI-211.

Cuando se estime que se van a presentar condiciones severas de desgaste superficial, es recomendable emplear una capa de recubrimiento de resistencia a la compresión no menor de 350kg/cm²; y limitar el tamaño del agregado a 1/2" en el recubrimiento.

Al margen de estas precauciones previas a la producción, está demostrado que un elemento fundamental en el resultado final lo constituye la mano de obra y la técnica de acabado.

Cuando se procede a realizar sin permitir la exudación natural de la mezcla, la capa superficial se vuelve débil al concentrarse el agua exudada, incrementándose localmente la relación agua/cemento.

Se considera que en condiciones normales, el acabado debe ejecutarse alrededor de las 2 horas luego de la colocación del concreto y habiéndose eliminado el agua superficial.

La cantidad de energía que pone el operario en el proceso de acabado tiene relación directa con el grado de compactación de la superficie habiéndose comprobado experimentalmente una gran diferencia cuando éste trabajo se ejecuta con acabadoras mecánicas (de uso no muy corriente en nuestro medio).

Es usual apreciar la costumbre generalizada de espolvorear cemento sobre la superficie húmeda con objeto de "secarla" y terminar antes con el acabado, lo cual constituye una práctica negativa si aún continúa la exudación, pues la película de cemento actúa como una barrera impermeable reteniendo el agua y favoreciendo que disminuya localmente la relación agua/cemento.

Si este procedimiento se efectúa luego de la exudación y se integra el cemento o un mortero seco con el resto de la pasta, el efecto es muy beneficioso pues se consigue reducir localmente la relación agua/cemento e incrementar la resistencia, por lo que el concepto básico está en la oportunidad en que se hace esto y no en la acción misma.

Otra precaución muy importante está constituida por la técnica de curado pues de nada sirve tener materiales y un diseño de mezcla excelentes si luego no propiciamos las condiciones para se desarrolle la resistencia, y que son temperatura y humedad adecuadas.

El curado debe iniciarse inmediatamente después de concluido el acabado superficial siendo recomendable mantenerlo no menos de 7 días cuando se emplea cemento tipo I y un tiempo mayor si se emplean cementos de desarrollo lento de la resistencia.

Otras técnicas de curado como el secado al vacío es mucho más eficiente en cuanto a resultados, pero no constituye soluciones que se puedan generalizar en nuestro medio por su costo, por lo que es necesario aplicar las técnicas convencionales como son el riego continuo o las conocidas "arroceras" que son alternativas simples y efectivas si se aplican bien y con continuidad.

Una técnica probada mundialmente que mejora notablemente la resistencia a la abrasión de las superficies de concreto consiste en emplear el denominado "concreto fibroso" (fiber concrete) .

Hay una variedad muy grande de tratamientos adicionales para lograr una superficie mucho más resistente que la obtenida con un concreto standard, y para ciertos casos especiales no hay otra opción que recurrir a ellos, sin embargo la recomendación principal es el no usarlos sin antes evaluarlos en forma práctica. En el caso de productos del tipo que vienen listos para su uso en obra, hay que tener cuidado pues los fabricantes no pueden cubrir con un solo producto la infinidad de parámetros involucrados en lo que al concreto se refiere, luego hay que aplicar recomendaciones de ellos con sentido común y comprobar sus bondades antes de incluirlos en las obras.

CAPÍTULO IV

CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FISURACION DEL CONCRETO NO ENDURECIDO (ESTADO PLASTICO)

4.1.0. INTRODUCCIÓN

Veremos en este capítulo los problemas del concreto en su estado plástico, como pueden ser aquellos derivados de los cambios volumétricos, los cuales en algunos casos producen fisuración y en otros no, como ya nos referiremos más adelante. Además analizaremos la contracción del concreto que es la causa más frecuente de los cambios volumétricos, y además nos referiremos a los factores que llevan a la contracción, que bien pueden darse en su estado plástico como endurecido, en este capítulo sólo hablaremos en su estado plástico. Adicionalmente daremos los problemas del concreto al sufrir asentamiento debido a la combinación de estos factores como son: temperatura ambiental, humedad relativa, vientos, restricciones, etc.; que también son causantes de la contracción del concreto.

Si podemos hablar de las fisuras, pueden dividirse entre las que ocurren antes del endurecimiento y las que ocurren después (estado endurecido). El periodo antes del endurecimiento es el intervalo después de la colocación del concreto en que todavía es posible remodelarlo. Puede ser de 1 a 8 horas y en algunas referencias lo consideran de 1 a 12 horas, dependiendo de la temperatura y humedad del concreto y de sí se ha añadido un acelerador o retardador a la mezcla.

Las fisuras que ocurren antes del endurecimiento son usualmente resultado de un asentamiento diferencial dentro de la masa de concreto, o de una rápida pérdida de agua mientras el concreto es aún plástico y antes de que haya obtenido resistencia.

Pueden deberse a una combinación de endurecimiento de la superficie y de asentamiento interno. Una forma menos común de fisuración plástica ha ocurrido bajo condiciones de humedad e incluso de una película de agua. Se cree que este último tipo está relacionado con las características de fraguado del cemento que pueden estar influenciadas por aditivos.

4.2.0. ASIENTO PLÁSTICO

4.2.1. CONCEPTOS GENERALES

Podremos definir el asiento plástico a aquel concreto que después de que se ha colocado en los moldes o encofrados, los sólidos de la mezcla comienzan a asentarse, desplazando el agua y el aire retenido. El agua aparece como agua que exuda en la superficie, este es un aspecto fundamental para la comprensión de los fenómenos que ocurren en el concreto en su etapa plástica, hasta que el concreto se endurece.

La exudación (bleeding) es el fenómeno consistente en el ascenso del agua del concreto hasta la superficie de éste, a partir del momento del vertido y su compactación. Es debido a una tendencia a la clasificación de los componentes por densidades, debida a la acción de la gravedad, es decir es en cierto modo un proceso de sedimentación de los componentes.

La exudación es un fenómeno inherente al concreto, que no puede ser eliminado. En tiempo húmedo, frío y sin viento, el agua exudada se ve en la superficie. En tiempo caluroso, seco y con viento, el agua exudada se evapora de la superficie más rápidamente de lo que acude a ella.

Básicamente la exudación sólo puede reducirse (no anularse) a través de:

- Más cantidad de cemento.
- Adiciones en el cemento o adiciones al concreto, de finura comparable a la del cemento.

- Reducción de la relación A/C.
- Control riguroso del tipo y calidad si se usan retardadores.
- Empleo de agentes aireantes.

Expuesto lo anterior, el asiento plástico es el experimentado por el concreto cuando se produce la exudación y es tanto más importante cuando más la sea ésta. Se produce en las primeras 3 horas, variando un poco este plazo con la temperatura.

Este asiento plástico continúa hasta que el concreto se endurece. El refuerzo, el encofrado o pernos de encofrado, los accesorios empotrados o los agrupamientos de agregado grueso pueden restringir el libre asentamiento del concreto, haciendo que se separe y formen vacíos y/o grietas adyacentes al elemento restrictor en el concreto plástico. La expansión o el asentamiento de la cimentación o el movimiento de los encofrados en un momento en que el concreto aún no ha adquirido ninguna resistencia siempre darán por resultado fisuras. El concreto colocado sobre un ligero declive tiene tendencia a fluir abajo, lo que da por resultado fisuras plásticas.

Mientras sea plástica, una mezcla húmeda se asentará más tiempo que una seca. Asimismo, las mezclas húmedas se asentarán más que las secas por que usualmente contienen más agua por unidad de volumen de concreto. Es deseable que este se coloque a una humedad uniforme para reducir asentamientos diferenciales. La subrasante en el caso de pavimentos o cimentación de concreto, debe humedecerse uniformemente porque los puntos secos absorberán más agua del concreto que las áreas húmedas y el concreto permanecerá plástico más tiempo sobre las áreas más húmedas de las subrasante.

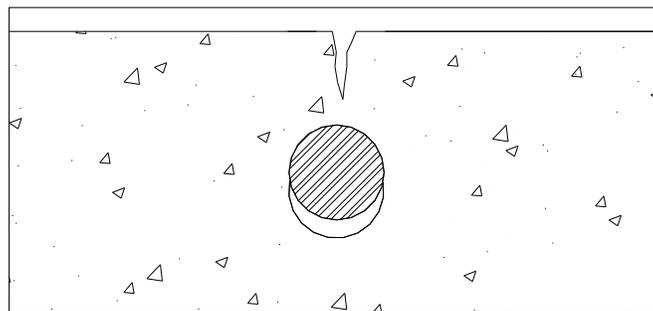


Fig. 4.1 - fisura debida al asentamiento plástico

Cuando hablamos de pavimentos de concreto se coloca una base no absorbente, tal como las láminas de plástico usadas a veces como barreras contra la humedad de bajo de losas, la base no absorbe ninguna agua del concreto y, conforme se asienta éste, llega más agua a la superficie de la losa. Bajo tal condición, al concreto le toma más tiempo fraguar- dependiendo de otras condiciones tales como temperatura, espesor de losa y proporciones de mezcla-que pueden desarrollar fisuras.

4.2.2. MECANISMO DE FISURACIÓN DEBIDA AL ASIENTO PLÁSTICO

La mayoría de los investigadores concuerdan en que el primer paso en el proceso de deterioro del concreto involucra la formación de fisuras en el concreto que está sobre el acero de refuerzo, debidas al asentamiento del concreto.

En el caso del asentamiento relacionado con el refuerzo de acero, la fisuración aumenta con el aumento del tamaño de las barras de refuerzo, el aumento del revenimiento y la disminución del recubrimiento según Dahil y otros son de importancia relativa, además muestran que la variable más importante en cuanto a la fisuración por asentamiento se refiere es el espesor del recubrimiento (Fig. 4.2). Aparentemente para la mayoría de los casos, excepto para las combinaciones de barras grandes y revenimiento alto. Es suficiente un recubrimiento de 5 cm para resistir esta fisuración. No solo aumenta la aparición de fisuras conforme aumenta el tamaño de las barras, el revenimiento y la disminución de recubrimiento, sino que también aumenta la severidad de las mismas.

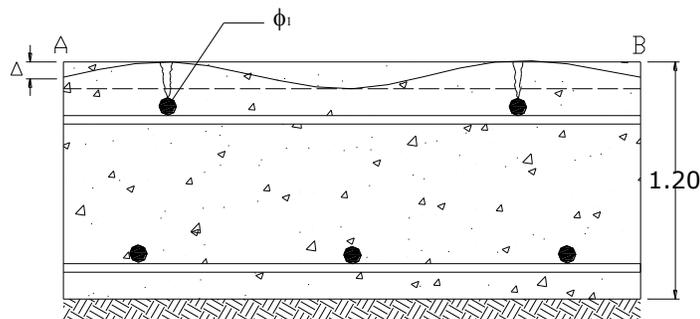


Figura 4.2 - Fisuración sobre el refuerzo debida al asiento plástico

Según un análisis de esfuerzos en el concreto fresco mediante una técnica foto-elástica, realizada como complemento de las investigaciones anteriores, se halló que los esfuerzos máximos eran de tensión y localizados directamente sobre el refuerzo. El refuerzo máximo de tensión sobre las barras varió de 0.02 a 0.084 kg/cm² conforme el espesor del recubrimiento disminuyó de 5.1 a 1.9 cm alejándose del refuerzo el esfuerzo disminuía bruscamente pasando por un punto de contra flexión a una distancia que cambiaba según el recubrimiento, pero que varía entre aproximadamente 2.5 cm para el recubrimiento 1.9 cm hasta casi 5 cm para el recubrimiento de 5.1 cm.

4.2.3. RECOMENDACIONES Y CONTROL

Las llamadas fisuras por asentamiento plástico pueden eliminarse por medio de una adecuada preparación de la cimentación (para el caso de pavimentos de concreto) que incluya una adecuada compactación del relleno; por el diseño apropiado de los encofrados en conformidad con las prácticas recomendadas por las normas de encofrados; por el uso de una mezcla de concreto bien proporcionada al mínimo asentamiento practicable; y por una adecuada compactación del concreto, que puede incluir revibración después de ocurridas las fisuras.

Unas buenas medidas de previsión pueden ser; el buen control de colocación del refuerzo para cumplir con las especificaciones y permitir buen acceso del vibrador durante el llenado, vibrar enérgicamente o revibrado (ACI 347), de acuerdo con la técnica estipulada para esta operación, y utilizando maquinaria apropiada para la tarea (verificar con los manuales de vibradores). Un encofrado adecuado y tratamiento adecuado del mismo, para evitar a toda costa encofrados calientes y/o muy absorbentes, además de evitar la utilización de encofrados muy flexibles.

Tratar de llegar a concretos con revenimientos lo más bajo posible 2", 3" y 4", aumentando el recubrimiento del concreto y disponiendo un intervalo de tiempo suficiente entre el vaciado de concreto en columnas y el vaciado en vigas y losas.

4.3.0. CONTRACCIÓN O RETRACCIÓN PLÁSTICA

4.3.1 CONCEPTOS GENERALES

La contracción es una de las causas más frecuentes de cambios volumétricos y a la que se asocian muchas veces problemas de fisuración que son debidos a razones que veremos más adelante. La contracción puede darse en su estado plástico como endurecido, a esta contracción en el estado plástico se le denomina contracción plástica, a parte de esta existen problemas de contracción en el concreto endurecido como son los de contracción por secado y contracción por temperatura que nos referiremos más adelante en el capítulo de los problemas del concreto endurecido. La contracción se produce fundamentalmente entre la primera hora y las seis horas a partir de la colocación, esto durante en el proceso de fraguado y endurecimiento, estas causan daños frecuentes en elementos estructurales como losas, muros, columnas, etc., especialmente cuando la evaporación del agua exudada es más rápida que la velocidad de acudida del agua de la masa interna a la superficie, frenada por la acción capilar en los poros del concreto. Es una situación típica en el vaciado del concreto en climas secos en época calurosa, por ejemplo, aunque no es ésta la única. El riesgo se agrava si el curado es deficiente y sólo puede reducirse con las mismas medidas expuestas en el tema debido al asentamiento plástico (ver tema 4.2.0)

La retracción plástica también puede explicarse por la pérdida paulatina de agua en el concreto. Aunque el fenómeno es complejo, de una forma simplificada se podría decir que el concreto contiene agua en cinco estados distintos:

- El agua combinada químicamente o de cristalización;
- El agua del gel;
- El agua zeolítica o intercrystalina;
- El agua absorbida, que rodea los granos de agregado y pasta de cemento, estando adherida a ellos formando meniscos, y
- El agua capilar o libre.

4.3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RETRACCIÓN PLÁSTICA

A parte del grado de humedad ambiente, en el fenómeno de retracción incluyen los siguientes factores:

- a. El tipo, clase y categoría del cemento influyen en el sentido de dar más retracción los más resistentes y rápidos, a igualdad de las restantes variables, se recomienda utilizar cementos como el tipo I, II, V o IP (de menor a mayor contracción).
- b. A mayor finura de molido del cemento corresponde una mayor retracción.
- c. La presencia de finos en el concreto aumenta apreciablemente la retracción. Los finos pueden provenir de los agregados o, lo que influye más todavía, de adiciones inertes que pueda poseer el cemento
- d. La cantidad de agua en la mezcla está en relación directa con la retracción. Por ello, a igualdad de dosis de cemento por m³ de concreto, la retracción aumenta con la relación agua/cemento; y a igualdad de relación, aumenta con la dosis de cemento.
- e. La retracción aumenta cuando disminuye el espesor del elemento en contacto con el medio ambiente, por ser entonces mayor el efecto de pérdida de agua con respecto al volumen del elemento.
- f. El concreto armado retrae menos que el concreto simple, ya que las barras de refuerzo se oponen al acortamiento y lo disminuyen, tanto más cuanto mayor sea la cuantía. La relación entre un valor y otro de la retracción viene a ser del 80%.

4.3.3 FISURACIÓN POR EFECTOS DE LA RETRACCIÓN PLÁSTICA

Las fisuras plásticas por contracción, que ocurren mayormente en superficies horizontales, usualmente se desarrollan en el momento en el que el reflejo del agua desaparece de la superficie del concreto (Foto 4.1). Es más probable que ocurran durante clima seco y caluroso que cuando el clima es húmedo y frío. Una evaporación excesivamente rápida del agua desde la superficie del concreto es la causa principal de la fisuración plástica por contracción.



FOTO 4.1 Losa de concreto armado fisurada por la contracción plástica (comparación con un lapicero para tener una relación del tamaño de la fisura)

El ritmo de evaporación depende de la temperatura del aire, la humedad relativa, la temperatura de la superficie del concreto y la velocidad del viento de dicha superficie. La retracción es una deformación impuesta que provoca tensiones o esfuerzos de tracción (estos esfuerzos son debidos a la restricción ocasionada por la masa interior) y, por consiguiente, fisuras, cuando se encuentra impedido el libre acortamiento del concreto; por ello tiene tanta más influencia cuanto más rígida es una estructura. Generalmente son fisuras amplias a veces alcanza entre 1 y 2m, y poco profundas (< 30 mm con frecuencia) y pueden darse casos excepcionales que alcancen los 100 mm e incluso atravesar todo el espesor de la losa delgada. Pueden ser cerradas alisando la superficie del concreto o revibrando. Son de escasa trascendencia estructural. Las fisuras de retracción plástica son más frecuentes en elementos superficiales.



FOTO 4.2 Patrón típico de fisuración por contracción plástica.

4.3.4 EFECTOS DE LA RETRACCIÓN EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Hablamos anteriormente de elementos rígidos que sufren fisuraciones debidas a la retracción plástica, con más ocurrencia en la superficie de pisos y losas o de cualquier otro elemento que tenga área superficial grande, cuando se presentan las condiciones apropiadas para su formación. En el caso de vigas con poco peralte y de poca luz, suelen aparecer fisuras de retracción; o estas cuando tengan luz media o grande si están fuertemente restringida en sus extremos.

Un caso típico es el del muro de contención, en el que la coacción exterior está representado por el terreno. Si no se han dejado juntas de retracción, el muro acaba de fisurarse cada 10 o 12m, pudiendo aparecer con el tiempo una segunda familias de fisuras intermedias. En los elementos de tipo superficial las fisuras de retracción son muy frecuentes, especialmente si aparecen asociados con vigas o nervios que actúan en líneas de coacción en el conjunto.

Las armaduras suponen también impedimento al interior libre de retracción o contracción del concreto. Por ello, en vigas muy reforzadas y con un gran recubrimiento, éste puede fisurarse por retracción, dado el gradiente que existe entre la superficie libre (donde la retracción es máxima) y la armadura que impone su coacción al concreto circundante. Favorece el hecho habitual de que el recubrimiento es mucho más rico en pasta que el interior del elemento, a causa de vibrado del concreto.

La probabilidad de fisuración por retracción está íntimamente ligada con la elongabilidad del concreto.

Cuando el concreto se combina con otros materiales, debe recordarse el fenómeno de la retracción y estudiar la compatibilidad de deformaciones del conjunto. Es el caso de los revestimientos sobre el concreto aplicados prematuramente, en los que, al contraerse éste, el revestimiento queda sometido a compresión, acabando por agrietarse e incluso caerse.

4.3.5 PRECAUCIONES Y CONTROL

- a. Programar llenados sin incidencia del sol en el área por llenarse y protegidos del viento.
- b. Cuando el fenómeno ocurre, debe inmediatamente golpearse enérgicamente con una llana, trabajando la superficie hasta corregir el defecto. Tener en cuenta que esta operación sólo se puede realizar cuando el concreto no ha entrado definitivamente en el proceso de fragua.
- c. Cuando las condiciones son desfavorables y la obra es importante, se debe disponer un sistema que efectivamente controle la humedad para evitar su pérdida. Entre estos sistemas se puede indicar:
 - Uso de humidificadores mediante pulverización (Foto 4.3), (no ducha o regado) de agua que mantenga la superficie húmeda.
 - Uso de mantas de plástico que se van colocando por partes a medida que alcanza el llenado o vaciado del concreto.
- d. Para el caso de losas vaciadas sobre el terreno, la buena práctica exige además de las precauciones normales, humedecer la superficie de la sub-base adecuadamente antes del vaciado del concreto.
- e. Una buena solución para el caso en que se tenga que vaciar en un día muy caluroso, es programar el vaciado de los elementos horizontales como losas, vigas, antes de los muros de corte, columnas, etc.
- f. Se recomienda utilizar cementos con bajo calor de hidratación como son cementos portland tipo II.
- g. En general cuando el clima es muy caluroso (mayor a 28 °C) o cuando es vaciado el concreto con el sol. Se debe tomar las siguientes precauciones:
 - Enfriar los agregados, manteniéndolos humedecidos y a la sombra.
 - Usar agua fría para la mezcla, de preferencia con hielo picado



FOTO 4.3 Aplicación del curador químico, por medio de un pulverizador.

En la tabla 4.1 se indican temperaturas del concreto que pueden llegar a ser críticas para la fisuración plástica a diferentes humedades relativas. La velocidad de evaporación se puede estimar de la figura 4.3. En la tabla 4.1 se muestran datos del clima para algunas regiones. Se deben tomar precauciones cuando se estime que la velocidad de evaporación puede alcanzar $1.0 \text{ Kg/m}^2/\text{hr}$.

Estas precauciones consisten en el uso de una sub-base y encofrados perfectamente humedecidos, vaciar el concreto a la temperatura lo más baja posible, colocar cortavientos y evitar el sol directo, reducir el tiempo entre el vaciado del concreto y el inicio del curado, y minimizar la evaporación, especialmente durante las primeras horas siguientes al vaciado, preferiblemente mediante el rociado muy fino de agua para mantener un velo de humedad.

TABLA 4.1

COMBINACIONES DE TEMPERATURA DEL CONCRETO Y HUMEDAD RELATIVA QUE SON POTENCIALMENTE CRITICAS PARA LA FISURACION POR CONTRACCIÓN PLASTICA

TEMPERATURA DEL CONCRETO (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)
40.6	90
37.8	80
35.0	70
32.2	60
29.4	50
26.7	40
23.9	30

Se indica la temperatura máxima del concreto para diferentes humedades relativas con el fin de limitar la evaporación aproximadamente 1.0 Kg/m²/hr, asumiendo la velocidad del viento en 16 Km/hr. Y la diferencia de temperatura entre el concreto y el aire en 5.6 °C.

Grafico del comité ACI-308 para evaluar tasa de evaporación en el concreto

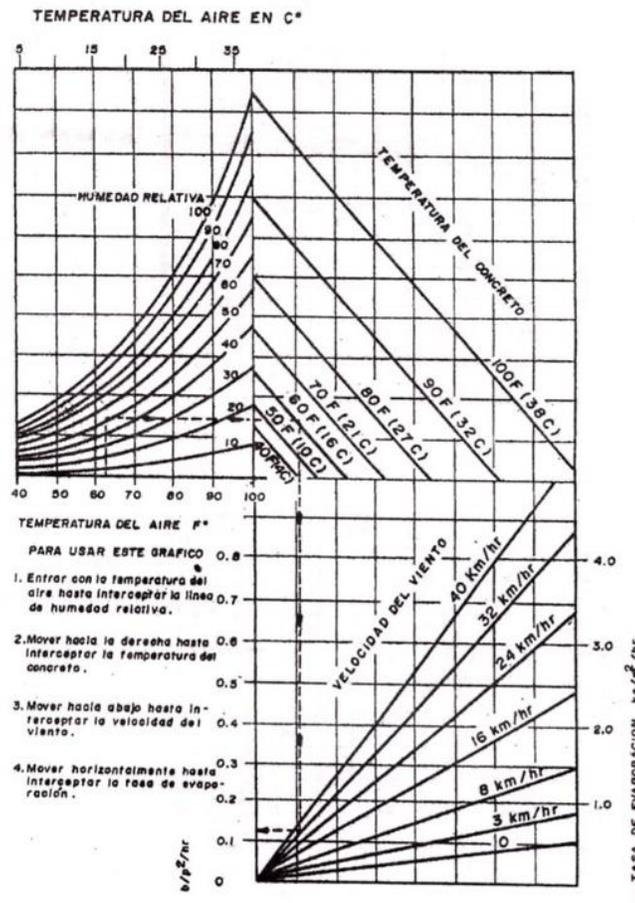


Figura 4.3. Evaluación del grado de evaporación en el concreto

CAPÍTULO V

CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FISURACION DEL CONCRETO ENDURECIDO

5.1.0. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos originados en el concreto en su estado endurecido, se pueden sintetizar en los siguientes rubros:

- Contracción por secado
- Efectos térmicos
- Agresividad química interna y externa

5.2.0. CONTRACCIÓN POR SECADO

5.2.1. CONCEPTOS GENERALES

Los fenómenos de contracción por secado están referidos básicamente, cuando el concreto se seca, se contrae o encoge, y cuando se vuelve a mojar, se expande. Estos cambios de volumen, con cambios en el contenido de humedad, son una característica inherente de los concretos de cemento hidráulico. Es el cambio en el contenido de humedad de la pasta de cemento, lo que causa la contracción o expansión del concreto; mientras que los agregados proporcionan una restricción interna que reduce en gran parte la magnitud de estos cambios de volumen. Cuando el cemento se mezcla con el agua, se producen varias reacciones químicas. Estas reacciones comúnmente llamadas "hidratación", crean un producto hidratado que consiste básicamente en algunos materiales cristalinos (principalmente hidróxido de calcio), y en gran cantidad de gel de silicato de calcio endurecido, llamado "gel de tobermorita".

Este gel rígido está formado por partículas de tamaño coloidal y tiene un área superficial extremadamente alta. En una pasta de cemento endurecida, algo del agua se aloja en los poros capilares de la misma, pero una mayor cantidad de agua se encuentra en el gel de tobermirita. La contracción se origina por la pérdida de agua que sufre el gel. Al secarse, la primera agua que se pierde es la que ocupaba las capilaridades relativamente grandes en la pasta de cemento. Esta pérdida de agua causa una contracción muy pequeña o ninguna. Tal es la pérdida del agua absorbida y del agua que se encuentra entre las capas del gel hidratado, que causa la contracción de la pasta. Cuando el concreto se expone a ciertas condiciones de secado, la humedad que contiene se difunde lentamente del interior de la masa del concreto hacia la superficie exterior, en donde se pierde por evaporación. Por el contrario, al mojar el concreto, este proceso se invierte ocasionando expansión del concreto.

Si podemos hablar de la deformación unitaria producida por la contracción por secado sin ningún control puede oscilar entre 400 y 1100×10^{-6} cm/cm, dependiendo del caso particular. En función de esto, las tensiones que se producen, pueden variar entre 100 kg/cm² y 275 kg/cm² en la generalidad de los casos, por lo que si recordamos que el orden de magnitud del esfuerzo de tracción del concreto es de alrededor del 10% de la resistencia en compresión se puede deducir que para los concretos normales (100 kg/cm² a 350 kg/cm² de resistencia en compresión y del orden de 10 kg/cm² a 35 kg/cm² en tracción) los esfuerzos por contracción por secado normalmente superan a la capacidad resistente en tracción. En consecuencia, debido a los altos valores de esfuerzos de tracción que ocasiona, la contracción por secado es generalmente la causa principal de la fisuración del concreto. Esto lleva a concluir que si no se comprende el fenómeno y no se toman las medidas adecuadas para controlarlo, se producirá indefectiblemente la fisuración; y en muchos casos en que éste es inevitable debido a las tensiones que ocurrirán, las condiciones del diseño arquitectónico y las características de exposición ambiental de las estructuras, habrá que determinar la ubicación conveniente de las juntas para orientar y regular la fisuración. Aunque la contracción por secado es una de las principales causas de la fisuración, los esfuerzos por temperatura, las reacciones químicas, el congelamiento, así como los esfuerzos excesivos a la tensión debido a cargas de estructuras, con frecuencia son las causas de la fisuración en el concreto endurecido.

5.2.2. MECANISMO DE FISURACIÓN

El agrietamiento del concreto debido a la contracción por secado es un aspecto que ha recibido más atención por parte de los arquitectos, ingenieros y contratistas, que ninguna otra característica o propiedad del concreto. La fisuración es uno de los problemas más graves que se presentan en construcciones de concreto. La cantidad de fisuración se puede minimizar por medio de un buen diseño práctica correcta de construcción, y eliminar también las grandes fisuras visibles empleando adecuadamente el acero de refuerzo, así como las juntas de contracción.



FOTO 5.1 Losa de concreto fisurada debido a la contracción por secado (comparado con una llave para determinar el tamaño de la fisura)



FOTO 5.2 Patrón de fisuración con contracción o retracción por secado.

Si la contracción del concreto es causada por el secado pudiera realizarse sin ninguna restricción, el concreto no se fisuraría. Sin embargo, en una estructura el concreto está siempre sujeto a algún grado de restricción, ya sea por la cimentación, por otro elemento de la estructura o por el acero de refuerzo ahogado en el concreto. Esta combinación de contracción y restricción desarrolla en el concreto esfuerzo por tensión. Cuando los esfuerzos por tensión son iguales a la resistencia a la tensión, el concreto se fisura. Este fenómeno se ilustra en la figura 5.1.

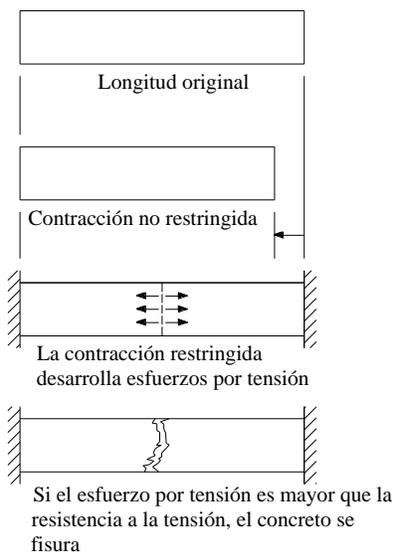


Fig.5.1 Fisuración del concreto debido a la contracción por secado

Otro tipo de restricción se crea por la diferencia que existe entre la contracción de la superficie y el interior de un elemento de concreto, especialmente a edades tempranas. Ya que la contracción por secado es siempre mayor en la superficie desarrollándose así los esfuerzos de tensión. Esto puede causar la fisuración de la superficie, sin embargo, estas fisuras no penetran profundamente en el concreto. Estas fisuras pueden, con el tiempo, penetrar de manera más profunda en el elemento de concreto, si la parte interior del mismo está sujeta a un secado adicional.

La magnitud de los esfuerzos por tensión desarrollados durante el secado del concreto está influenciada por una combinación de factores tales como:

- a. La cantidad de contracción.
- b. El grado de restricción.
- c. El módulo de elasticidad del concreto.
- d. La fluencia o relajación del concreto.

Por lo tanto, la cantidad de contracción es sólo uno de los factores que rigen en la fisuración. En cuanto a la fisuración en sí, es deseable que exista un módulo de elasticidad bajo y altas características de fluencia del concreto, ya que tienden a reducir la magnitud de los esfuerzos por tensión. Por lo tanto, para minimizar la fisuración, el concreto deberá tener bajas características de contracción por secado y alto grado de extensibilidad (módulo bajo y alta fluencia), así como una alta resistencia a la tensión. Sin embargo, la gran extensibilidad de un elemento de concreto sujeto a flexión podría causar grandes deflexiones.

5.2.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CONTRACCIÓN POR SECADO

Los factores más importantes que afectan la contracción comprenden la composición del cemento, el tipo de agregado, el contenido de agua y las proporciones de la mezcla. El grado de pérdida de humedad o la contracción de un determinado concreto se ve afectado en forma directa, por las dimensiones y la forma del elemento de concreto, por el medio ambiente y por el tiempo de exposición al secado. Explicaremos con mas detalle estos factores:

- a. **Efecto del Cemento:** Algunas pruebas llevadas a cabo por Brunauer, Shalky y Yudenfreund indican que para periodos cortos de curado, las pastas de cemento Tipo II mostraron considerablemente menor contracción que las pastas Tipo I, y mucho menor que los cementos Tipo III, se recomienda el uso de cementos en ese orden Tipo I, II, V o IS. Las pruebas realizadas por Lerch, muestran que la proporción de yeso en el cemento tiene mayor efecto en la contracción. Los productores de cemento, debido a la composición del mismo, regulan las diferencias en la contracción, optimizando el uso de yeso en el cemento.

La finura de un cemento puede tener algún efecto en la contracción por secado. Los experimentos hechos por Carlson, mostraron que los cementos más finos producen casi siempre mayor contracción, pero que el aumento de la contracción al incrementar la finura del cemento no es significativo. Sus resultados indican que la composición del cemento es un factor decisivo, por lo que para algunos cementos con un aumento de la finura puede mostrar un cambio ligero y, en algunos casos, producir una mínima contracción en el concreto.

- b. **Influencia del tipo de agregado:** Los agregados gruesos y finos, que ocupan entre el 65% y 75% del volumen total del concreto, tienen mayor influencia en la contracción. Puede considerarse que el concreto consta de una estructura de pasta de cemento, cuyo alto potencial de contracción está restringido por el agregado. La contracción por secado de un concreto será solamente una fracción (aprox. de 1/4 a 1/6) de la pasta de cemento.

La gran influencia del tipo de agregado en la contracción por secado en el concreto fue mostrada por Carlson. En la tabla 5.1, a modo de ejemplo, se proporcionan algunos de los datos obtenidos sobre la contracción de concretos idénticos y con igual relación a/c.

TABLA 5.1 Efecto del tipo de agregado en la contracción del concreto

Agregado	Gravedad específica	Porcentaje de absorción	Porcentaje de contracción en 1 año
Piedra arenisca	2.47	5.0	0.116
Pizarra	2.75	1.3	0.068
Granito	2.67	0.8	0.047
Piedra caliza	2.74	0.2	0.041
Cuarzo	2.66	0.3	0.032

Los agregados en el concreto restringen la retracción inherente de la pasta de cemento, por lo que la capacidad de deformación de los mismos y su adherencia con la pasta de cemento son las propiedades físicas que tiene por importancia fundamental en la contracción del concreto. Cuanto mayor es la rigidez del agregado y su módulo de elasticidad, mayor será la reducción de la retracción en el concreto. Al estar el módulo de elasticidad inversamente relacionado con la porosidad y la absorción del agregado, se puede concluir en que los agregados más densos y con baja absorción producen concretos con menor retracción, siendo el efecto inverso con agregados livianos y muy absorbentes.

Por otro lado, la cantidad de agregado en el volumen total del concreto, así como su granulometría tiene influencia primordial en la contracción, puesto que agregados con gradación discontinua ameritan una gran cantidad de cemento para lograr una estructura mixta (piedra + pasta de cemento + arena) resistente, y consecuentemente tiene mayor preponderancia la retracción de la pasta al disminuir el volumen total del agregado. Indirectamente, el tamaño máximo de las partículas de los agregados, afecta también la contracción ya que depende de éste la cantidad de agua de mezcla (que como veremos en el siguiente punto es otro de los factores condicionantes de la contracción), a mayor tamaño máximo o módulo de fineza total de los agregados, menor será la contracción y viceversa.

- c. **Efecto del Contenido de Agua en la Mezcla como Condicionante de la Contracción:** El contenido de agua de una mezcla de concreto es otro factor importante que influye en la contracción por secado. Un gran incremento en la contracción está en relación con el aumento del contenido de agua, tal como fue demostrado por el U.S. Bureau of Reclamation. En la Fig. 5.2 se ilustra una relación típica entre el contenido de agua y la contracción por secado. Un incremento en el contenido de agua también reduce el volumen de restricción del agregado y, por lo tanto, da como resultado mayor contracción. La contracción de un concreto puede ser minimizada conservando el contenido de agua de la pasta tan bajo como sea posible. Esto dará como resultado un contenido de agua más bajo por unidad de volumen de concreto, y en esta forma se obtendrá menor contracción.

Si se recuerda que la cantidad de agua en la mezcla está en función inversa del tamaño máximo del agregado, y en relación directa con el asentamiento (slump) se puede concluir que empleando el mayor tamaño de agregado y el menor asentamiento compatible con los requisitos de trabajabilidad, se logra reducir la contracción por secado.

El aspecto final relacionado con la cantidad de agua y la retracción lo constituye la relación Agua/Cemento, donde el factor preponderante es la concentración de la pasta. Un concreto con relación a/c alta, indica una concentración pobre de la pasta de cemento y un intercambio elevado de agua de absorción en los poros del gel durante el secado, con el incremento de la contracción. En el caso inverso, los concretos con relaciones a/c bajas, tienen menor contracción por secado.

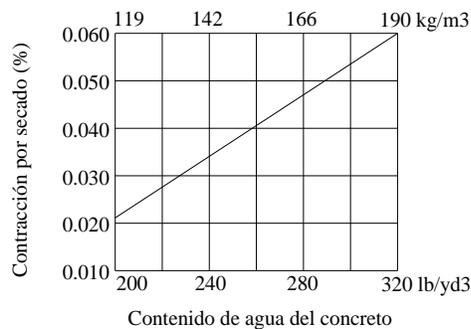


Figura 5.2 - Efecto característico del contenido de agua en la contracción por secado

- d. **Influencia de los Aditivos:** En general, los aditivos contribuyen a reducir el agua de amasado, tienden a colaborar en reducir la contracción, pero este efecto, no es muy evidente en la mayoría de los casos. Sin embargo, está demostrado que en el caso de los superplastificantes, esta reducción sí es significativa, en un orden de magnitud del 30%. Los incorporadores de aire, pese a introducir una estructura de vacíos adicional en la mezcla, no incrementan de manera significativa la retracción, con inclusiones de aire de hasta el 5%. Algunos aditivos inclusores de aire son fuertes retardantes, contienen acelerantes que pueden aumentar la contracción por secado del 5% al 10%.

Los acelerantes ocasionan un incremento en la contracción por secado que en el promedio puede llegar a ser hasta del 50% de la normal, desarrollándose la mayor parte a edades tempranas (7 días) y disminuyendo con el tiempo. Los acelerantes incrementan la temperatura del concreto fresco por la reacción exotérmica con el cemento y consecuentemente los requerimientos de agua en la mezcla y la contracción, por lo que este es otro de los efectos a tener presentes en el control de la temperatura de la mezcla. Las puzolanas empleadas como aditivos en las mezclas, no son de uso normal en nuestro medio, no obstante, estas ya vienen introducidas en varios de los cementos disponibles en el mercado nacional como cementos portland Tipo I e IPM, por lo que es interesante abordar su efecto. Las puzolanas contribuyen en general a aumentar los requerimientos de agua en la mezcla, pues le confieren una consistencia cohesiva por la que es necesario añadir más agua de la usual para obtener la trabajabilidad deseada. Luego pues, tienden a incrementar la contracción, pero este efecto se refleja primordialmente en estructuras de pequeñas dimensiones, mas no en las estructuras masivas. Esto es debido en primer término, al efecto de las dimensiones de los elementos, y la retentividad de agua que manifiestan las puzolanas; y en segundo lugar porque en los vaciados de elementos de dimensiones reducidas es necesario trabajar con mayores asentamientos para poderlas colmar eficientemente, y esto obliga a añadir más agua, lo que no se da en vaciados masivos en que las dimensiones de los elementos permiten trabajar con concretos muy secos.

- e. **Influencia de la Duración del Curado Húmedo:** El concepto básico reside en que la duración del curado húmedo del concreto no reduce la contracción por secado, pues sólo la detiene mientras dura, pero una vez que se inicia el secado, se verifica igual. La explicación está en el curado entre 7 y 28 días propicia el desarrollo de las características resistentes del concreto y su capacidad de soportar esfuerzos generados por la contracción, pero no altera la continuidad del fenómeno pues en la medida que se produzca la pérdida del agua habrá retracción inexorablemente. El curado sin embargo evidencia experimental que cuando el curado húmedo se efectúa con vapor y a presión atmosférica cual es el caso de los prefabricados, la contracción se reduce, probablemente por modificar la estructura de los poros del gel.

- f. **Influencia del Tamaño del Elemento:** El tamaño de un elemento de concreto afecta el ritmo con que la humedad desaparece del concreto y, en esa forma, afecta su grado de contracción. Se ha mostrado que para el concreto expuesto a una humedad relativa del 50%, el secado sólo penetra 75mm aproximadamente en el transcurso de un mes, y 0.6m después de 10 años. Además, se investigó ampliamente el efecto del tamaño y de la forma del elemento de concreto en cuanto a la contracción y a la fluencia del concreto. Se encontró que tanto el rango de contracción como el valor de la misma, así como la fluencia del concreto, disminuyen en relación directa con el aumento de tamaño del elemento del concreto.

5.2.4. CONTROL DE LA FISURACIÓN POR CONTRACCIÓN

El concreto tiende a contraerse durante el secado cuando sus superficies se exponen a un aire de baja humedad relativa. Debido a que diversos tipos de restricciones evitan que el concreto se contraiga de manera arbitraria, debe esperarse la posibilidad de que se presente una fisuración, a menos que la humedad relativa del ambiente se conserve al 100%, o que las superficies del concreto sean selladas para prevenir la pérdida de humedad. La prevención de la fisuración consiste en reducir al mínimo la tendencia a la fisuración, mediante el uso de un refuerzo adecuado y bien colocado, así como la utilización de juntas de control. La fisuración también puede minimizarse mediante el uso de cementos expansivos que producen concretos de contracción compensada.

5.2.4.1. REDUCCIÓN DE LA TENDENCIA A LA FISURACIÓN

Como se mencionó anteriormente, la tendencia a la fisuración se debe no sólo a la cantidad de contracción, sino también al grado de restricción, al módulo de elasticidad y a la fluencia o a la relajación del concreto.

Algunos factores que reducen la contracción disminuyen, al mismo tiempo, la fluencia o la relajación, e incrementan el módulo de elasticidad, ofreciendo así poca o ninguna ayuda para detener la tendencia a la fisuración. Por lo tanto, debe incidirse en la utilización de aquellos factores que producen una reducción real en la tendencia a la fisuración.

Cualquier medida que pueda tomarse para reducir la contracción del concreto, reducirá también la tendencia a la fisuración. La contracción por secado puede reducirse por medio del uso de menor cantidad de agua de mezcla y de agregados de mayor tamaño. Un bajo contenido de agua puede lograrse usando un agregado con buena granulometría, consistencia más rígida y menor temperatura inicial del concreto. Sin embargo, como se ve en el tema acerca del efecto de los aditivos, la reducción del contenido de agua mediante el uso de aditivos reductores de agua por lo general no disminuye la contracción.

Otra forma de reducir la tendencia a la fisuración es por medio del uso de agregado de mayor tamaño. Un agregado más grande permite un aumento de volumen del agregado y una reducción total del agua requerida para obtener un determinado revenimiento. El agregado de gran tamaño también tiende a restringir más al concreto, y aunque esto puede dar lugar a microfisuraciones internas, éstos no son necesariamente dañinos.

5.2.4.2. ACERO DE REFUERZO

Un refuerzo colocado en forma correcta y en cantidades adecuadas no sólo reducirá la cantidad de fisuración, sino evitará la fisuración desagradable. Al distribuir las deformaciones de contracción a lo largo del refuerzo, el cual pasa a través de los esfuerzos de adherencia, las fisuras se distribuyen de tal manera que aparecerá un mayor número de fisuras, pero serán más finas en lugar de algunas fisuras anchas. Aunque es práctico el uso del acero de refuerzo para reducir la fisuración en un concreto de sección relativamente delgada, no ocurre así en estructuras masivas tales como presas, debido a la baja contracción por secado en estas estructuras. En el reglamento de concreto reforzado ACI 318-99. Se indica la cantidad mínima y el espaciamiento del refuerzo que deben usarse en pisos, losas y muros de contención.

5.2.4.3. JUNTAS

El uso de juntas es el método más efectivo para evitar la formación de la fisuración desagradables. Si una considerable longitud o extensión de concreto, tal como muros, losas o pavimentos, no cuenta con juntas adecuadas para resistir la contracción, el concreto producirá sus propias juntas fisurándose. Las juntas de contracción en muros se hacen, por ejemplo, pegando tiras de madera o de caucho en el interior de los paneles, las cuales producirán en el concreto, hendiduras verticales angostas, tanto en el interior como en el exterior del muro. La fisuración del muro de concreto, debido a la contracción, aparecerá en esas hendiduras liberando el esfuerzo del muro y evitando así la formación de fisuración desagradables. Estas hendiduras deberán sellarse en el exterior del muro para evitar la penetración de humedad. Las juntas aserradas se utilizan comúnmente en pavimentos, losas y pisos. La colocación de una junta depende de las características del caso de que se trate. Cada trabajo debe estudiarse individualmente para determinar el lugar en que deben colocarse las juntas. Para losas o pisos, considerar juntas entre 24 a 36 veces el espesor del elemento pues en caso contrario es casi seguro que habrá fisuración por contracción descontrolada.

5.3.0. EFECTOS TÉRMICOS

5.3.1. CONCEPTOS GENERALES

La diferencia de temperatura dentro de una estructura de concreto puede ser debido a la hidratación del cemento o cambios en las condiciones ambientales o de ambos. Estas gradientes de temperatura producen cambios volumétricos del concreto. Cuando éste se encuentra restringido y estos esfuerzos superan la resistencia en tracción del concreto se fisurará. Los efectos de la gradiente térmica debido a la hidratación del cemento están normalmente asociada con concretos masivos (cual puede incluirse columnas largas, vigas, estribos de puente, cimentaciones, como también presas), mientras la variación de temperatura pueda cambiar en la temperatura del ambiente pueda afectar a algunas estructuras.

Considerando fisuras térmicas en el concreto masivo, el calor liberado y la hidratación del cemento portland, causado por la temperatura interna del concreto tiende a elevarse durante el periodo de curado inicial. El concreto gana rápidamente ambos esfuerzos y rigidez al iniciarse el enfriamiento. Algunas restricciones de libres contracciones durante el enfriado resultarán con esfuerzos de tensión. Los esfuerzos de tensión se desarrollarán durante la fase de enfriamiento que es proporcional al cambio de temperatura, al coeficiente de dilatación térmica, al efectivo módulo de elasticidad (cual es reducido por el creep), y el grado de restricción. En gran cantidad de estructuras, el mejor potencial de la variación de temperatura es el grado de restricción. Los procedimientos para ayudar a reducir térmicamente la fisuración inducida incluye reduciendo al máximo la temperatura interna, demorando la agresión del enfriado, controlar el coeficiente del cual el concreto se enfría, e incrementar la tensión de la capacidad de esfuerzo del concreto. Este y otros métodos usados para reducir la fisuración en concreto masivos están representados por los comités ACI 207.1R, ACI 207.2R, y ACI 224R.

El concreto endurecido tiene un coeficiente de dilatación térmica que está dentro del rango de 4 a $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ (7 a $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), con un promedio de $5.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) y es el que condiciona la capacidad de deformación por temperatura. Si aplicamos los principios de la termodinámica, se puede inferir que cada $^{\circ}\text{C}$ de gradiente térmico induce un esfuerzo en el concreto del orden de $2\text{kg}/\text{cm}^2$. Por lo tanto, para concretos normales del orden de $200\text{kg}/\text{cm}^2$ de resistencia en compresión, ocasiona un gradiente térmico de alrededor de 10°C y origina fisuraciones si las condiciones de borde restringen las deformaciones, ocasionando esfuerzos que superan la capacidad resistente en tracción del concreto. Los cambios térmicos producidos por el calor de hidratación del cemento se verifican con mayor intensidad en el denominado concreto masivo, que en términos generales incluye a las estructuras con relación volumen/área superficial expuesta muy grande.

Como podemos observar las figuras 5.3 y 5.8 se verán los tipos de cementos que tienen una influencia muy importante en el incremento de temperatura por el calor de hidratación. Por otro lado, la temperatura de colocación así como la temperatura ambiente tienen mucha importancia en el ascenso de la temperatura y el tiempo en que llega a su valor máximo como podemos observarlo en las figuras 5.4 y 5.5.

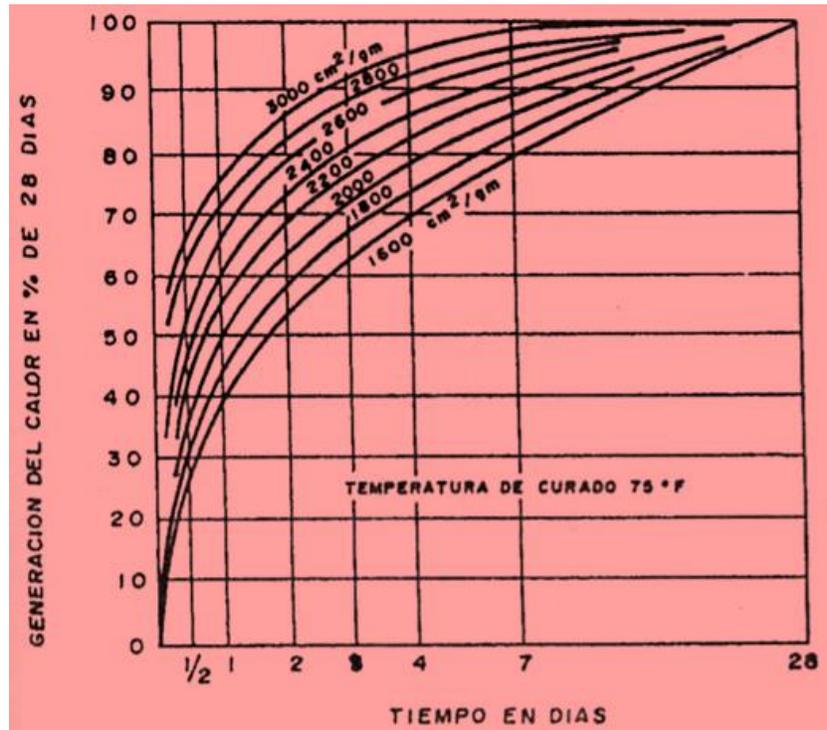


Figura 5.3 Generación de calor VS tiempo

5.3.2. NATURALEZA DEL PROBLEMA

Como ya hemos analizado los problemas que conlleva el cambio de volumen de los elementos que se encuentran restringidos de alguna manera y en la definición misma de concreto masivo que soporta gradiente térmica muy elevadas que es la principal causa de este cambio de volumen.

Hablaremos más a fondo de este tema con respecto al concreto masivo puesto que es aquel que genera los mayores problemas en las estructuras que tienen que soportar gradientes térmicos elevados.

Las estructuras de concreto masivo se dividen en dos grandes grupos: las del concreto masivo simple y las de concreto masivo reforzado.

Si podemos hablar del acero, diremos que el acero no previene la fisuración ni disminuye la cantidad total del mismo, ni ofrece tampoco impedimento alguno para que el concreto cambie de volumen. El acero de refuerzo es efectivo para limitar el ancho de las fisuras individuales. Su función principal es mantener la suficiente fuerza de tensión en las fisuras existentes provocadas por la restricción con el fin de que se formen fisuras adicionales suficientes como para compensar el cambio volumétrico. Para que este control sea eficiente, la tensión o tracción en el acero de refuerzo debe estar limitada a cierto esfuerzo determinado (si el esfuerzo llega al punto de fluencia), el cambio volumétrico se puede concentrar en una sola fisura ancha o en algunas sumamente espaciadas.

El decidir sobre a qué medida se le debe dar más énfasis, si podría minimizarse el cambio volumétrico o el acero de refuerzo para el control de fisuras, esto depende en gran medida en que tan masiva sea la estructura y en la magnitud de las fuerzas que restringen el cambio volumétrico. A veces los esfuerzos de diseño, las limitaciones del vaciado y el ambiente mismo son tan severos que vuelven impráctico controlar la fisuración mediante el control de cambio volumétrico. Por otro lado, el diseñador normalmente tiene amplia libertad para escoger los esfuerzos de diseño y las dimensiones de la estructura, así como lo vimos en la contracción por secado donde influyen también las dimensiones de la estructura.

En muchos casos el costo de aumentar las dimensiones de la estructura debido a la selección de un concreto de menor resistencia (siempre y cuando se cumpla con los requisitos de durabilidad) se ve más que compensado por el ahorro en el acero de refuerzo, disminución en el costo del vaciado y por la reducción del costo del concreto en sí.

El primer paso que se debe dar para diseñar las medidas para el control de la fisuración en las estructuras de concreto masivo reforzadas o sin reforzar es el determinar la temperatura máxima efectiva que alcanza el cemento. En las estructuras de concreto masivo simple se determinan las temperaturas pico con el fin de prevenir la fisuración; en el concreto reforzado se presume que la fisuración ocurrirá y las consecuencias de sobrestimar o subestimar el aumento neto de la temperatura no son tan importantes: normalmente las estructuras de concreto masivo reforzado no requieren de tanta precisión en la determinación del aumento de temperatura.

5.3.3. DETERMINACIÓN DE TEMPERATURAS

5.3.3.1. MÉTODO DE R. CANNON

Se sugiere el siguiente procedimiento para calcular la temperatura pico de hidratación:

- Determinar la relación volumen a superficie (V/S)
- Determinar el aumento de temperatura asumiendo que se trata de cemento tipo I y vaciado a una temperatura ambiente de 21°C.
- Determinar la cantidad de grados de temperatura que es necesario aumentar o disminuir para tomar en cuenta la diferencia que existe entre la temperatura efectiva de vaciado y la temperatura ambiente de 21°C.
- Multiplicar la suma de los resultados de los dos anteriores pasos por el factor de generación de calor apropiado para el tipo de cemento utilizado.
- Ajustar el aumento de la temperatura obtenido para la cantidad total de material aglutinante (cemento + puzolana) contenido en la mezcla, multiplicando el aumento por el factor: $1 - 0.00067(C + P - 178)$, donde C es la cantidad de cemento en kg/m^3 y P es la cantidad de puzolana en kg/m^3 .
- La temperatura pico es la suma del aumento de la temperatura obtenida en el paso anterior y la temperatura efectiva de vaciado.

A continuación se explican en detalle los pasos mencionados anteriormente:

- **Relación volumen/superficie (V/S):** La relación V/S representa la longitud promedio de la trayectoria por la cual el calor se disipa del concreto (ver Fig. 4.3). La trayectoria promedio será siempre menor que la distancia mínima entre las caras del elemento. Solo se debe considerar el área superficial que está expuesta al aire o a los encofrados. Los encofrados de madera se pueden reemplazar, con fines de cálculo, con un ancho equivalente de concreto (razón 1 a 20). Se puede asumir que cualquier cara que se encuentre a más de 20 veces el espesor no contribuye al flujo de calor.

La relación V/S se determina mejor multiplicando la relación V/S que se obtiene sin considerar el efecto aislador de los encofrados, por la relación "trayectoria de flujo mínima incluyendo los encofrados" entre "trayectoria de flujo mínima excluyendo los encofrados".

- La relación V/S en losas no debe exceder de $\frac{3}{4}$ el espesor. Si la losa se vacía en varias capas, la relación V/S no debe exceder la altura de una capa, si es que se proporciona suficiente tiempo para que se enfríe.
- **Aumento de temperatura:** El aumento de temperatura (TR) para cemento tipo I a una temperatura ambiente de 21°C se puede estimar de la siguiente manera:

Si V/S es menor o igual que 1.2 m.

$$TR = \frac{(2.22 + 2.74\sqrt{V/S - 0.08})C_{eq}}{59.4} \dots\dots\dots (5.1)$$

Si V/S es mayor o igual que 1.2 m.

$$TR = \frac{(5.33 + 0.44\sqrt{V/S - 0.08})C_{eq}}{59.4} \dots\dots\dots (5.2)$$

Dónde: C_{eq} : cemento equivalente, peso del cemento + % en que contribuye la puzolana por m³ de concreto, en Kg

- **Temperatura efectiva de vaciado:** En la figura 5.4 se muestra el efecto que tiene la temperatura del concreto durante el vaciado en la velocidad de generación de calor. La velocidad de generación de calor aumenta con el aumento de la temperatura del vaciado.

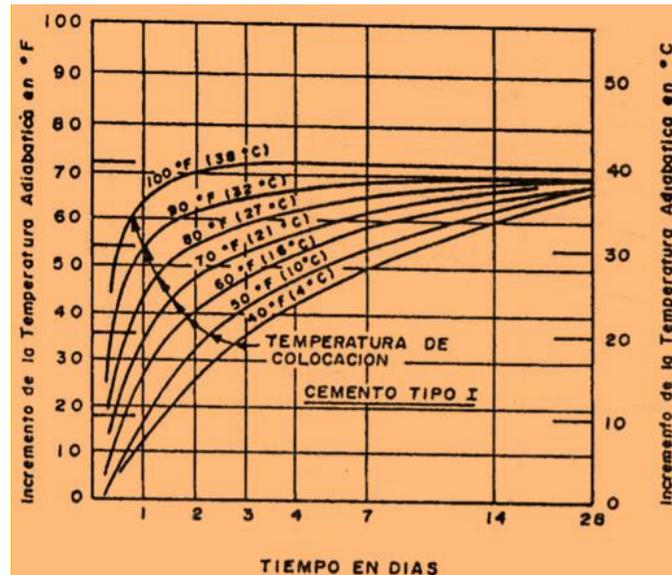


FIGURA 5.4 Incremento de la temperatura adiabática

Por cada 5°C de diferencia entre la temperatura efectiva de vaciado y 21°C (tomada como referencia en la mayoría de gráficos y tablas) se deben añadir o sustraer del aumento de temperatura (TR) obtenido para 21°C aproximadamente 1.12°C por cada 100 Kg de cemento. La temperatura efectiva del vaciado se puede asumir como el promedio de la temperatura real de vaciado y la temperatura media ambiental. Si la mezcla no se ha enfriado, entonces la temperatura efectiva excederá la temperatura ambiental en aproximadamente 2.8°C.

- Se puede usar los siguientes factores de generación de calor (HF) para estimar la temperatura pico de diferentes tipos de cementos:

Tipo I	HF = 1.00
Tipo II	HF = 0.87
Tipo III	HF = 1.21
Tipo IV	HF = 0.69

Para tomar en cuenta la contracción por secado (mínima y despreciable en la mayoría de estructuras de concreto masivo, ver 5.2.0) se puede expresar ésta en términos de un cambio de temperatura equivalente. El comité ACI-207 presenta la siguiente fórmula, en la que se ha supuesto una contracción por secado potencial de 150 millonésimos y un coeficiente de dilatación de 9×10^{-6} por $^{\circ}\text{C}$ como base para determinar la caída de temperatura equivalente:

$$T_{DS} = \frac{(16.7 - 0.44V/S)(W_u - 74)}{59} \dots\dots\dots(5.3)$$

Dónde: T_{DS} = cambio de temperatura equivalente por contracción por secado ($^{\circ}\text{C}$)

W_u = contenido unitario de agua del concreto fresco, pero no menor que 133.5Kg.

V = volumen total, en cm^3 .

S = área de la superficie expuesta, (cm^2)

Obsérvese que cuando V/S es 38 cm, resulta $T_{DS} = 0$; se ha asumido que cuando la trayectoria de secado es mayor que 38 cm (15"), la contracción por secado no afecta los cálculos.

5.3.3.2. METODO DEL COMITÉ ACI-207

El comité ACI-207 en su informe "Effect of restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete" recomienda el empleo de diferentes gráficos para hallar de una manera rápida la temperatura pico de hidratación en estructuras de concreto masivo reforzado. Se puede proceder de la siguiente manera:

- **Se determina la relación volumen/superficie (V/S).** (ver Fig. 4.3)
- **Se determina la temperatura efectiva de vaciado:** De la figura 5.5 se halla el tiempo en que se alcanza temperatura pico, con este resultado y con la figura 5.6 se halla el porcentaje de calor absorbido o disipado hacia el ambiente en ese lapso debido a la diferencia que existe entre la temperatura real de vaciado y la temperatura ambiente.

La temperatura efectiva de vaciado es en este caso la temperatura real de vaciado, más (o menos, dependiendo de si el calor se está disipando o absorbiendo) el porcentaje de calor de diferencia que existe entre la temperatura real de vaciado y la media ambiental.

Ejemplo: Si la temperatura ambiental es de 26°C, el concreto se ha enfriado a 15°C y se ha obtenido que el porcentaje de absorción es de 55%, entonces la temperatura efectiva de vaciado es $15 + 0.55 (26-15) = 21^\circ\text{C}$.

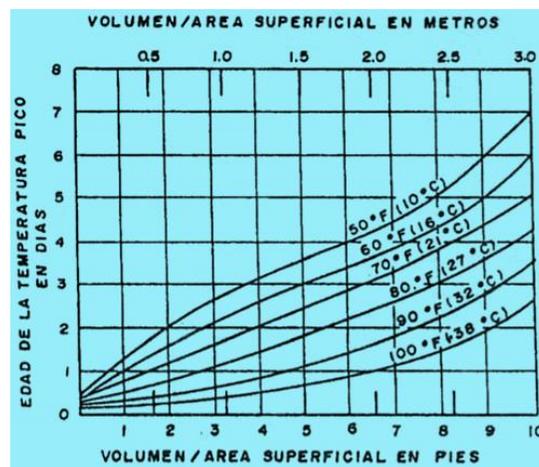


FIGURA 5.5 Temperaturas pico VS volumen/área

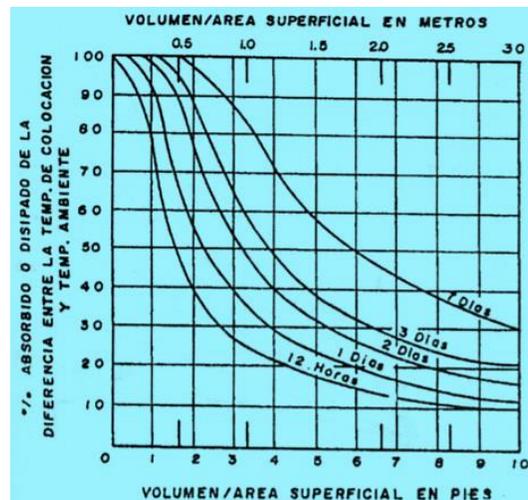


FIGURA 5.6 Porcentaje de calor absorbido o disipado

- **Se determina el aumento de temperatura (TR):** La figura 5.7 muestra el aumento de temperatura para concretos preparados con 223 Kg/m^3 de cemento tipo I, por lo que hay que realizar las correcciones correspondiente. En la figura 5.8 se puede hallar la relación entre los aumentos adiabáticos de temperatura entre los distintos tipos de cemento y el tipo I para un tiempo dado, para hacer la corrección basta multiplicar TR por la relación apropiada. Para hacer la corrección por la cantidad de cemento se multiplica el TR (acabado de corregir) por la relación $C_{eq}/223$, C_{eq} es el cemento equivalente.

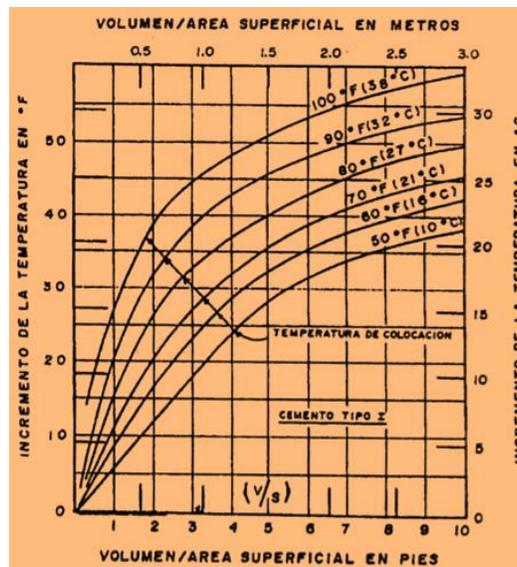


FIGURA 5.7 Aumento de temperatura para concretos preparados con 223 Kg/m^3 de cemento tipo I

- **Se determina la temperatura equivalente por contracción por secado**, de ser necesario.
- **Temperatura pico:** La temperatura pico es la temperatura efectiva de vaciado más el aumento de temperatura TR corregido.

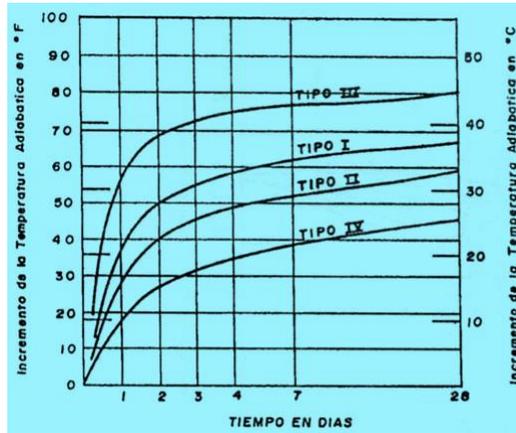


FIGURA 5.8 Aumentos adiabáticos de temperatura entre los distintos tipos de cemento y el tipo I para un tiempo dado

5.3.3.3. TEMPERATURA MÍNIMA

El comité ACI-207 sugiere para determinar la disminución o caída de temperatura que sufre las estructuras de concreto, se debe establecer cuál es la temperatura mínima que se debe considerar para el diseño de elementos reforzados a la que estará sujeto el elemento bajo condiciones de servicio, y recomienda conservadoramente, que se tome la temperatura mínima promedio de exposición que ocurra durante un periodo de aproximadamente 1 semana. La temperatura de la masa de tierra o roca que se encuentra en contacto con muros o losas de concreto que forman una cierta fuente de calor que afecta a la temperatura promedio de los elementos de concreto dependiendo de la trayectoria del flujo de calor o de la relación volumen/superficie (V/S). Se puede asumir a esta fuente de calor como una temperatura constante T_M en algún punto a 2.4 a 3 m. de la cara expuesta del concreto. La temperatura mínima del concreto apoyado contra el suelo o roca se puede aproximar mediante:

$$T_{\min} = T_A + \frac{2(T_M - T_A)}{3} \sqrt{\frac{V/S}{244}} \dots\dots\dots (5.4)$$

- Dónde: T_A = Temperatura ambiental mínima promedio esperada para un periodo de exposición de aprox. 1 semana., en °C.
- V/S = Relación volumen a superficie, en cm.
- T_M = Temperatura de la masa de roca o tierra; aproximadamente de 4 a 16°C, dependiendo del clima

5.3.3.4. EJEMPLO

Para tener un mejor entendimiento de lo que sucede con aquellos elementos que sufren de los efectos térmicos, podemos hacer un ejemplo práctico, y explicar los dos métodos, explicados anteriormente, y así poder determinar el cambio máximo de temperatura, y temperaturas pico.

EJEMPLO.- Muro de Contención

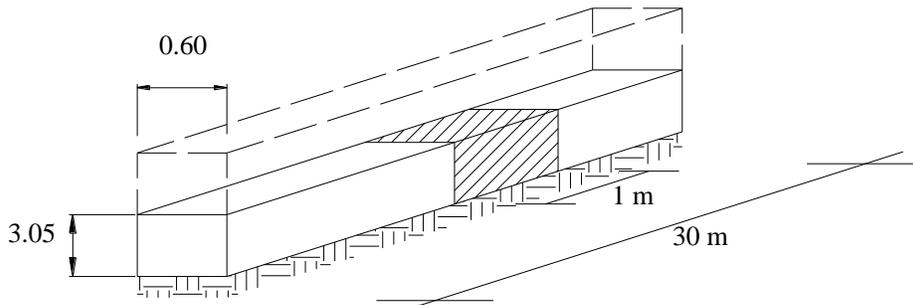
Generalidades:

- Muro de contención de 60 cm de ancho, 6.10 m. de alto y 30 m. de largo.
- Cimentado en roca y relleno por uno de sus lados.
- Encofrado de madera.
- Vaciado en verano con concreto enfriado a 15°C en dos capas de 3.05 m cada una.
- Resistencia especificada, $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$.
- Resistencia promedio a los 90 días = 260 Kg/cm^2 .
- Diseño de mezcla: 128 Kg/m^3 (cemento tipo II), 133 Kg/m^3 (puzolana) y 139 Kg/m^3 (agua).

Método Recomendado por el Comité ACI-207 (Revisar tema 5.3.3.2)

➤ Relación Volumen/Superficie (V/S)

Efecto del encofrado: 1" de madera es equivalente a 20" de concreto = 51 cm.



Para una franja de 1 m. de ancho:

$$v = 0.60 \times 1.0 \times 3.05 \dots\dots (5.5) \quad s = 1.0 \times 3.05 \times 2 + 1 \times 0.60 \dots\dots(5.6)$$

$$v = 1.83 \text{ m}^3 \quad s = 6.70 \text{ m}^2$$

No se toman en cuenta las caras laterales (tapas) ya que éstas se encuentran a una distancia mayor de 20 veces el ancho.

Trayectoria del flujo sin considerar el encofrado

$$T_1 = 0.60 / 2 \dots\dots\dots (5.7)$$

$$T_1 = 0.30 \text{ m}$$

Trayectoria del flujo considerando el encofrado

$$T_2 = \frac{(0.60 + 0.51 + 0.51)}{2} \dots\dots\dots (5.8)$$

$$T_2 = 0.81 \text{ m}$$

$$\frac{V}{S} = (v/s)(T_2/T_1) \dots\dots\dots (5.9)$$

$$\frac{V}{S} = 0.74 \text{ m}$$

- Determinación de la diferencia entre la temperatura efectiva de vaciado y la temperatura final de exposición.

Temperatura media ambiental: 24 °C (asumido)

- Calor absorbido por el concreto:
 - Temperatura de vaciado: 15 °C
 - Se toma los valores de V/S hallados y la temperatura de vaciado, para utilizar la Figura 5.5, se halla que el concreto alcanza su temperatura pico en 1.9 días.
 - Se toma el valor de 1.9 días y V/S hallado, para utilizar la Figura 5.6, y hallar el % de calor absorbido ≈ 62 %

- Temperatura efectiva de vaciado:

$$T_{pe} = 15 + 62/100 \times (24-15) \dots\dots\dots (5.10)$$

$$T_{pe} = 20.6 \text{ °C}$$

- Temperatura mínima de exposición:

Mínima promedio de una semana $T_a = -7 \text{ °C}$ (supuesta)

Nota: Para las condiciones finales V/S = 60 cm, ya que debido al relleno el flujo de calor es en una sola dirección. Si es el caso de las dos caras expuestas se toma V/S = 0.30 cm

- Temperatura mínima del concreto:

Para el concreto que está en contacto con roca, revisar el tema 5.3.3.3.

$$T_a = -7\text{°C}; T_M = 16\text{°C (asumida) (temperatura, roca o tierra)}$$

V/S = 60 cm, en condiciones de exposición

Según la fórmula 5.4 resolveremos que $\Rightarrow T_{\min} = 0.60 \text{ °C}$

$$\text{La diferencia de temperaturas} = T_{pe} - T_{\min} \Rightarrow \boxed{\Delta T = 20.0\text{°C}}$$

➤ Determinación del aumento de temperatura

- Aumento estimado: Utilizando el V/S original y la temperatura efectiva de vaciado, en la Figura 5.7:

V/S = 0.74 m; $T_{pe} = 20.6^{\circ}\text{C} \Rightarrow TR = 12.9^{\circ}\text{C}$, para concretos con 223 Kg/m^3 (para cementos tipo I); Según Fórmula 5.1

- Corrección por el tipo de cemento:

Revisando la Figura 5.8 para 2 días (≈ 1.9 días):

El aumento adiabático de temperatura para cementos tipo I = 28°C

El aumento adiabático de temperatura para cementos tipo II = 22°C

$T_c = (22/28) TR$ (aumento suponiendo que todo es cemento portland)

$T_c = 10.1^{\circ}\text{C}$

- Corrección por mezcla:

C_{eq} = cemento equivalente

$C_{eq} = c + 0.25p$, si la puzolana genera 25% del calor de hidratación del cemento

$c = 128 \text{ Kg/m}^3$

$p = 133 \text{ Kg/m}^3$

$C_{eq} = 161.3 \text{ Kg/m}^3$

$T_c + f = T_c \times C_{eq}/223 \Rightarrow T_c + f = 7.3^{\circ}\text{C}$

Aumento de temperatura ($T + f$) = 7.3°C

➤ Contracción por secado

No se hallará una temperatura equivalente ya que para relaciones de V/S en condiciones finales de exposición mayores de 40 cm. la contracción por secado no es significativa.

➤ Cambio máximo efectivo de temperatura

$$Te = (\text{Diferencia}) + (Tc + f) \overline{Te} \longrightarrow \boxed{= 27.3 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$\text{Temperatura Pico} \Rightarrow Te + T_{\min} = 27.3 \text{ } ^\circ\text{C} + 0.6 \text{ } ^\circ\text{C} \Rightarrow T_{\text{pico}} = 27.9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Método Recomendado por R. Cannon (Revisar tema 5.3.3.1)

- Relación volumen/superficie (V/S)

Se toma el mismo valor hallado en el caso anterior

$$V/S = 0.74 \text{ m}$$

- Determinación del aumento de temperatura:

Para relaciones de $V/S \leq 1.2 \text{ m}$ se resuelve:

Tomando el valor de $C_{eq} = 161.3 \text{ Kg/m}^3$ del caso anterior

$$TR_I = \frac{(2.22 + 2.74\sqrt{V/S} - 0.08)C_{eq}}{59.4} \longrightarrow TR_I = 12.1^\circ\text{C}, \text{ para un cemento tipo I}$$

a 21°C

- Temperatura efectiva del vaciado:

Es el promedio de la temperatura real de vaciado y la temperatura media ambiental:

$$T_{ma} = 25^\circ\text{C}, T_v = 15^\circ\text{C} \Rightarrow T_{pe} = \frac{(T_{ma} + T_v)}{2}$$

Como resultado

$$T_{pe} = 20.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Ajuste por temperatura del vaciado diferente a 21°C :

La diferencia entre la temperatura del cemento tipo I y la temperatura efectiva de vaciado

Diferencia con 21°C \Rightarrow 21-Tpe \Rightarrow dif = 1°C

Se deben restar: $\frac{1.12(C_{eq}/100)(dif)}{5} = -0.4^\circ\text{C}$

- Ajuste por el tipo de cemento:

HF = 0.87, es el factor para cementos tipo II

TR = (TR + ajuste temperatura de vaciado)(HF)

TR = 10.2°C

- Ajuste por la cantidad de cemento:

Factor de corrección = $1 - 0.00067(C + P - 178)$

C = 128 Kg/m³

P = 133 Kg/m³

Factor = 0.94

TR = TR x Factor \Rightarrow TR = 9.6°C

- Temperatura pico:

Viene a ser la suma de Tpe + TR \Rightarrow Temperatura pico = 29.6°C

- Contracción por secado:

No es significativa \Rightarrow no se considera

- Cambio máximo efectivo de temperatura:

Tmín = 0.60°C, se toma el método anterior

Te = Temperatura pico – Tmín \Rightarrow Te = 29.0°C

TABLA 5.2 Temperaturas pico

Método	Cambio máximo efectivo	Temperatura pico
ACI-207	27.3°C	27.9°C
Cannon	29.0°C	29.6°C

Estos valores hallados nos sirven para hacer un estudio más riguroso del concreto masivo, además del refuerzo de acero por temperatura y el diseño de juntas de contracción y dilatación.

5.3.4. CONTROL DE LA FISURACIÓN

5.3.4.1. INTRODUCCIÓN

Es posible prevenir la fisuración causada por la temperatura en una gran masa de concreto si se toman las medidas adecuadas para reducir la cantidad y el ritmo de cambio de temperatura. Las medidas que se utilizan con más frecuencia incluyen el pre-enfriamiento, post-enfriamiento o una combinación de ambos; otra manera de controlar la temperatura es el método de aislamiento térmico que es usado recientemente, se ha usado para proteger las superficies expuestas. El grado necesario de control de temperatura es para evitar la fisuración, que varía en gran parte de acuerdo a los factores tales como: la localización, la altura y el espesor de la estructura, el tipo de agregado, las propiedades del concreto y las restricciones externas. La mayoría de investigaciones del control de fisuración de estructuras masivas son debidas a experiencias en el uso del concreto masivo, como es el caso de construcciones de plantas de vapor, cimentaciones de edificios, puentes, plantas de energía, etc. En el caso de estructuras que se encuentran en zonas de climas cálidos, las variaciones diarias de temperaturas son muy altas que a diferencia de los lugares de climas fríos no son muy altas las temperaturas diarias.

A menudo los lugares de climas cálidos pueden ser suficientes para causar fisuraciones mayormente en superficies que se encuentran expuestas. Estas fisuras superficiales pueden continuar hacia el interior, con casi la mitad del esfuerzo de tracción necesario para causar la fisuración interna.

5.3.4.2. RESISTENCIA A LA FISURACIÓN

La deformación a la tensión que el concreto puede soportar, varía en gran medida con la composición del mismo y su rango de deformación. Cuando la deformación se aplica lentamente, la capacidad de deformación es mucho mayor que cuando es rápida. Por lo tanto, el concreto interior de una gran masa que deba enfriarse lentamente puede resistir una gran deformación antes de que se presente la falla. Si el concreto contiene agregados de textura rugosa y de tamaño máximo pequeño, la capacidad de deformación será alta. Sin embargo, hay un tamaño óptimo del agregado a ese respecto. Los agregados más pequeños requieren más cemento para alcanzar una resistencia especificada, lo que da como resultado mayor calor, una temperatura máxima alta, y la consecuente mayor deformación debida al enfriamiento. Por lo tanto, la capacidad mayor a la deformación que se obtiene de un concreto más rico con agregado más pequeño, puede ser anulada por la mayor deformación que tendrá que soportar, si el tamaño del agregado se reduce demasiado.

5.3.4.2 DETERMINACIÓN DE TEMPERATURAS Y DEFORMACIONES POR TENSIÓN

La deformación por tensión en concreto masivo resulta principalmente de las restricciones que originan la contracción térmica y, en menor grado, de la contracción autógena. La contracción por secado es importante sólo porque causa fisuras superficiales poco profundas. De esta forma el cambio de temperatura es el factor principal que contribuye a que se produzca la deformación por tensión en el concreto masivo. Si se desea predecir una deformación, será necesario predecir la temperatura esperada. Esta predicción puede hacerse con cierta seguridad si se conoce la curva de la temperatura adiabática del concreto, así como la difusividad térmica, los límites y la disminución de las temperaturas.

La temperatura esperada se puede tomar con frecuencia de las temperaturas de aire obtenidas por los informes del tiempo, como temperaturas de superficie para los cálculos.

5.3.4.3 RECOMENDACIONES PARA UN CONTROL DE FISURACIONES

Una vez que se cuenta con las temperaturas y deformaciones probables, el calculista debe determinar cuáles son las medidas más prácticas para proporcionar una amplia seguridad contra la fisuración. Las medidas preventivas no variarán cuando el clima y los materiales sean desfavorables, pero sí los harán cuando las condiciones sean desfavorables. Algunas de las condiciones que facilitan la prevención de fisuras son:

- Un concreto con gran capacidad a la deformación por tensión.
- Variaciones pequeñas de temperatura diaria y temporal.
- Bajo contenido de cemento (permitido para el cálculo con bajos esfuerzos).
- Cemento de bajo calor de hidratación.
- Bloques cortos.
- Ritmo lento de construcción cuando no se usa enfriamiento.
- Una baja restricción, como en el caso de cimentaciones controlables, o en partes de la estructura alejada de las restricciones de la cimentación.
- Alta temperatura promedio anual.
- Baja temperatura de vaciado.

Esta lista sugiere muchas de las medidas que se pueden tomar para prevenir la fisuración. En primer lugar, se deberá hacer un intento para producir un concreto con gran capacidad a la deformación por tensión. Esto podrá significar tener que limitar el tamaño del agregado máximo a un determinado valor, menor que el que se considera más económico. Cuando se tengan disponibles varias canteras de agregados económicos, deberá darse mayor preferencia a la que tenga mayor resistencia a las fisuras; por lo general, éste será un material triturado de baja expansión térmica y bajo módulo de elasticidad. Las características de producción del calor de hidratación del cemento representan un papel importante en la elevación de la temperatura.

El cemento tipo II (de moderado calor de hidratación) deberá usarse para construcciones con concreto masivo (el cemento de bajo calor de hidratación es el tipo IV también se recomienda, pero no se encuentra disponible). Las puzolanas pueden utilizarse para sustituir un aparte del cemento y reducir así la temperatura máxima debida al calor de hidratación. En algunos casos, hasta 35% o más de cemento puede sustituirse por una cantidad igual de puzolana adecuada y seguir con la misma resistencia a los 90 días o un año. Algunas de las puzolanas más comunes, utilizadas en el concreto masivo incluyen: arcillas calcinadas, tierras diatomáceas, tufos volcánicos, piedra pómez y cenizas volantes. El tipo de puzolana que deberá usarse, así como su apropiado % de sustitución, casi siempre se determinan basándose en pruebas, costos y disponibilidad, ver figura 5.9.

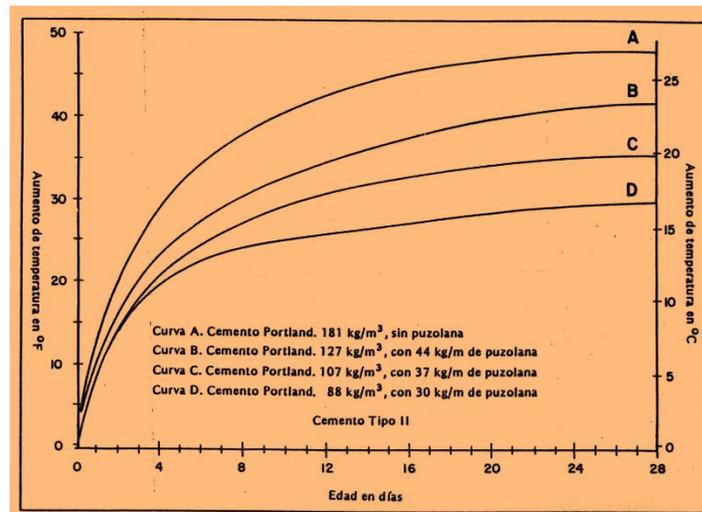


Figura 5.9 Curvas de temperatura adiabática típica para concreto masivo

Deberá usarse el mínimo contenido de cemento permitido para obtener la resistencia y durabilidad especificadas, para reducir el calor de hidratación y los consecuentes esfuerzos térmicos y deformaciones.

Por lo general, una reducción en el contenido de agua del concreto permite una correspondiente reducción del contenido de cemento. Existen dos razones por la que es favorable: sufre menos cambios de temperatura y menor contracción por secado. El contenido mínimo de agua puede lograrse con medidas como el uso de vibradores poderosos que permiten un bajo revenimiento, por medio de aditivos reductores de agua, y vaciado a baja temperatura.

El pre-enfriamiento del concreto durante su producción, y el post-enfriamiento por el sistema de tubos incrustados, después de haber vaciado, son medidas especiales y muy efectivas. Una medida conveniente es la de poner concreto resistente a la fisuración en los extremos (lados y parte superior). Aun cuando el concreto resistente a la fisuración puede ser muy costoso como para utilizarlo en toda la estructura, puede utilizarse en forma limitada sin repercutir en la parte económica, al contrario evitaremos gastos innecesarios. El aislamiento, como se emplea en la actualidad para el concreto, puede obtenerse en una variedad de forma y materiales que tienen rangos de conductividad práctica instalada que van de 3.6 a 0.5 Kg cal/m²/hr/°C. El aislamiento se puede obtener en forma de tableros semi-rígidos, rollos flexibles de material de tipo caucho y espuma rociada que se rigidiza en el lugar. Llevar un control meticuloso de temperaturas antes, durante y después de los vaciados masivos, para verificar la coincidencia del desarrollo de temperatura como lo explicado anteriormente, y en el caso que se den temperaturas extremas del concreto, se deberán enfriar los agregados y/o el agua, modificar las secuencias de vaciado en el tiempo real de inicio del endurecimiento, iniciar el curado húmedo superficial para controlar el secado y disipar el calor, adelantar desencofrados para incrementar el área de disipación de calor, etc.

5.4 AGRESIVIDAD QUÍMICA INTERNA Y EXTERNA

5.4.4 INTRODUCCIÓN

Anteriormente estudiamos al concreto, específicamente en el capítulo III donde desarrollamos con detenimiento, respecto a los problemas de durabilidad, discutiendo los problemas internos y externos del concreto debido agentes degradantes, en donde se generaron cambios físicos, químicos, físico-químicos, electroquímicos, etc. El concreto por su naturaleza química, respecto a sus componentes y sus reacciones entre ellos mismos, generan complicaciones si estos se ven afectados por agentes degradantes, que modifican sus propiedades inherentes, y esto se manifiesta por medio de cambios, en este caso volumétricos, donde lo desarrollaremos muy escuetamente,

5.4.5 CONCEPTOS GENERALES

La agresión química interna está constituida por reacciones de los contribuyentes del concreto con la pasta de cemento, generándose compuestos que cambian de volumen y se expanden destruyéndolo. Principalmente se produce porque el concreto contiene agregados contaminados con sulfatos y/o cloruros (ver tema 3.2.6, 3.2.7 respectivamente), o son reactivos con los álcalis del cemento (ver tema 3.2.8), produciéndose en ambos casos compuestos expansivos.

Existen ensayos físicos y químicos que permiten evaluar y descartar este tipo de agregados en la etapa de selección de estos para su empleo en la elaboración del concreto. Una vez que se ha empleado dichos agregados y se produce la reacción que por lo general tarda varios años en manifestarse, no existe manera de contra restar su efecto, salvo la reparación y reposición del concreto dañado.

La agresión química externa (ver tema 3.2.6) está constituida por el flujo de sales en solución (fundamentalmente sulfatos), hacia el concreto, formando sulfo-aluminatos que tienen la propiedad de aumentar el volumen. Existen maneras de combatir este efecto, sobre todo empleando cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico como tipo II y V y los cementos puzolánicos.

El último tipo de agresión es la electroquímica (ver tema 3.2.9), causada por la corrosión del acero en el concreto reforzado. Cuando se da la condición de un agente oxidante, humedad y el flujo de electrones en el metal, se produce la formación de óxidos e hidróxidos de hierro de volumen mayor al de los elementos originales, causando expansiones que destruyen el concreto. La presencia de cloruros tanto por el flujo externo hacia el concreto, como en los agregados o aditivos, propicia las condiciones necesarias para la corrosión, cuya velocidad e intensidad dependerán de las cantidades de cloruros, humedad y la conductividad eléctrica en cada caso particular.

CAPÍTULO VI

EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN DEL CONCRETO

6.1.0. INTRODUCCIÓN

Antes de proceder con la reparación del concreto, se debe hacer una evaluación de las estructuras para determinar el lugar y la extensión de la fisuración del concreto, las causas de fisuración, y la necesidad de repararlo. Además de los cálculos que pueden ser hechos para determinar los esfuerzos debido a cargas aplicadas, Los planos, especificaciones técnicas, construcción y record de mantenimiento, que deben ser revisados detalladamente. Las discrepancias se inician con la presentación de los datos de obra que posteriormente deben ser anotados en un cuaderno de observaciones.

6.2.0. DETERMINACIÓN DE LA UBICACIÓN Y EXTENSIÓN DE LA FISURA

La ubicación y extensión de la fisuración, es buena como información bajo condiciones generales de una estructura de concreto que puede ser determinada por una inspección visual, ensayos no destructivos, y ensayos de corazones diamantinos (ensayos destructivos) que se obtienen de la estructura. La información obtenida también puede bien venir de los planos, de construcción e informes de mantenimiento. Antes de proceder a reparar una estructura se debe hacer una evaluación para determinar la ubicación, magnitud y causas de la fisuración, como también la necesidad de efectuar reparaciones. En muchos casos la fisuración es el primer síntoma de alguna dificultad en el concreto, por lo que una inspección o estudio de la fisuración es importante para hacer una evaluación de la futura serviciabilidad de la estructura. Si es necesario o pueden efectuarse cálculos para determinar los esfuerzos debidos a sobre cargas

6.2.1. INSPECCIÓN VISUAL

La ubicación y el ancho de la fisura deben ser anotados en un croquis de la estructura. El uso de una plantilla cuadrículada marcada en la superficie de la estructura puede ser beneficioso para una ubicación exacta de la fisura en el croquis.

Las fisuras anchas pueden ser medidas con exactitud cerca 0.001 pulg (0.025mm) usando un comparador de fisuras, el cual es un pequeño microscopio de mano con una escala marcada en el lente para que la superficie pueda ser vista (Fig.6.1) además se puede observar la ubicación del descascaramiento del concreto, la exposición del refuerzo, el deterioro de la superficie, y las manchas por óxido que deben ser anotadas en el croquis.

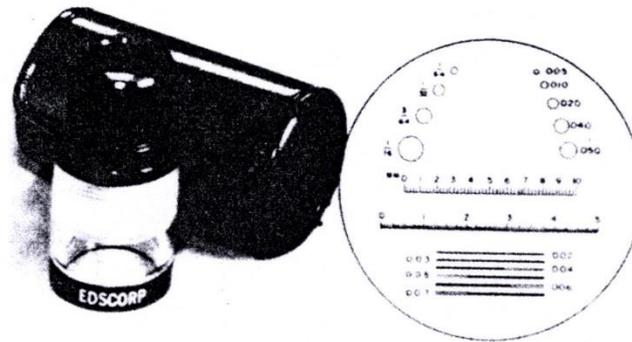


Figura 6.1 Comparación de las medidas del ancho de fisuras

El movimiento de las fisuras pueden ser monitoreadas por un indicador mecánico de movimiento, existiendo varios tipos (Fig.6.2^a). El indicador, o el monitor de fisuras (Fig.6.2) dan una lectura directa del desplazamiento y rotación de las fisuras. El indicador amplifica el movimiento de las fisuras (en este caso, 50 veces) e indica el rango máximo del movimiento ocurrido durante la medición periódica (Fig.6.2b). Los indicadores mecánicos tienen una ventaja ya que estas no requieren protección contra la humedad. Los croquis pueden ser cambiados por fotografías mostrando la condición de la estructura (las fotografías pueden ser de una gran ayuda para la evaluación, y ubicación de las fisuras). Una guía para hacer un mayor estudio de la condición del concreto en servicio es vista por el ACI 201.1R.

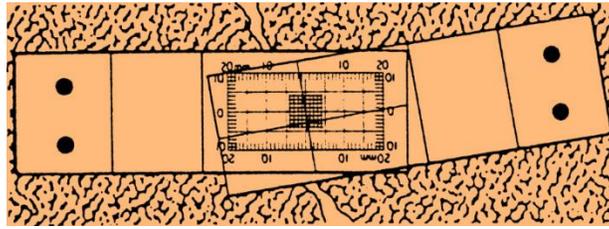


Figura 6.2a Medición de fisuras (monitor después del movimiento de la fisura)

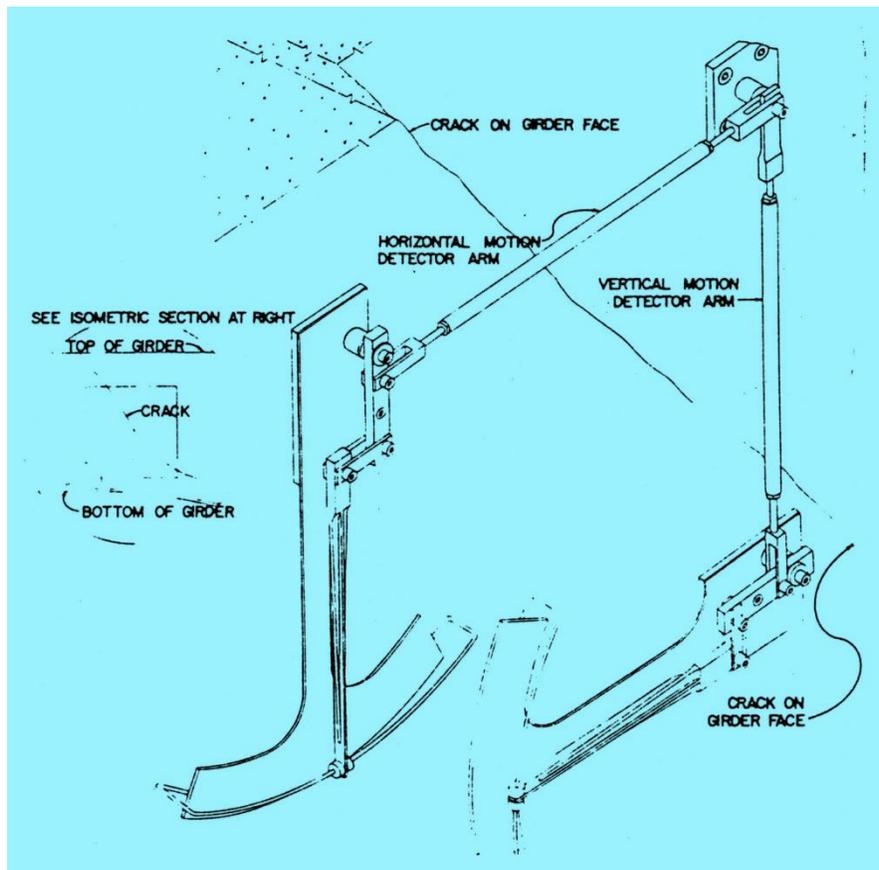


Figura 6.2b – Indicador del movimiento de las fisuras

6.2.2. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los métodos de ensayos no destructivos (NDT) son usados para determinar las propiedades del concreto endurecido y para evaluar las condiciones del concreto en cimentaciones profundas, puentes, pavimentos de concreto, presas, y otras estructuras de concreto. En este reporte se define los ensayos no destructivos como ensayos que buscan la causa de daño no estructural en el concreto. Mientras algunas personas consideran que la extracción de probetas y pruebas de carga como no destructivo, y para una mayor información se puede revisar el informe del Comité ACI 437R. Los métodos de ensayo no destructivos son aplicados al concreto inicialmente por cuatro razones:

- Control de calidad de la nueva construcción;
- Contrarrestar los problemas con la nueva construcción
- Evaluación de las condiciones del concreto viejo con el propósito de rehabilitarlo;
y
- Asegurar la calidad de la reparación del concreto.

La tecnología de los ensayos no destructivos es muy desarrollados y se continúan investigando del tema para mejorar los métodos existentes y desarrollar otros nuevos métodos. Este reporte intenta proporcionar una visión global de los principios de varios métodos (NDT) que han sido usados en la práctica, y resumir estas aplicaciones y limitaciones. Se da mayor énfasis en métodos que han sido aplicados para medir las propiedades físicas y de otra manera la resistencia de las estructuras de concreto, la detección de fisuras o su discontinuidad, y para proporcionar información de las condiciones de evaluación. Los métodos para estimar la resistencia a la compresión in situ se presentan en el ACI 228.1R. Los métodos de ensayos no destructivos son aplicados cada vez más en la investigación de las estructuras de concreto. Este aumento en la aplicación del método de NDT es debido a varios factores:

- Progreso tecnológico en el hardware y el softwares para la recopilación de información y análisis.
- Ventajas económicas en la evaluación de grandes volúmenes de concreto en comparación con la extracción de probetas.

- Se requiere de cierta habilidad para realizarlos rápidamente, además de fácil compresión; y
- Tiene como requisito los métodos del NDT asegurar la calidad de cimentaciones profundas y la reparación del concreto.

Los métodos del NDT proporcionan una importante información del desempeño estructural del concreto, tal como:

- Dimensiones de los elementos;
- Localización de las fisuras, deslaminación, y desintegración;
- Grado de consolidación, y presencia de oquedades y carcomido.
- Actividad de la corrosión en el refuerzo; y
- Extensión de daño debido a la congelación y deshielo, fuego, o exposición química.

A continuación veremos algunos métodos de ensayos no destructivos, que son mayormente utilizados en la evaluación de las estructuras del concreto.

6.2.2.1. PACÓMETRO "PACHOMETER"

Pacómetro "Pachometer": Se utiliza en estructuras de concreto que contengan refuerzo de acero o en el llamado concreto armado (en estas determinaciones se emplean en principio las denominadas ondas electromagnéticas). El principio de todos estos equipos está basado en que la presencia del acero en un campo magnético altera la corriente alterna que circula entre dos polos, que para estos casos se pueda calibrar para determinar la profundidad, la ubicación del refuerzo o el tamaño del refuerzo o ambos casos. Son claramente útiles para la determinación de la posición de armaduras, tanto barras principales como estribos, siempre que la densidad o la proximidad de unas barras a otras no origine "sombras" que perturben la lectura. Sin embargo, En algunos casos puede ser necesario quitar el recubrimiento de concreto para identificar el tamaño de las varillas, especialmente en áreas de gran congestión de refuerzos.

Este tipo de equipos, aun cuando sean manejados por personal muy experto, tiene una precisión muy limitada.

6.2.2.2. ENSAYOS PARA UN PROCESO DE CORROSIÓN

6.2.2.2.1. INTRODUCCIÓN

En el tema 3.2.9, hicimos un informe completo de los problemas de corrosión. Pues ahora nos encargaremos de la etapa de la evaluación de elementos de concreto afectados por la corrosión en el acero de refuerzo. El conocimiento de las diferentes manifestaciones originados como resultado de los fenómenos corrosivos (sean estos apreciables a simple vista o no), Es fundamental para su detección y para la elaboración del diagnóstico de las fallas. Por ello, la inspección de la obra constituye una etapa muy importante en la evaluación y posterior diagnóstico para la reparación de las estructuras de concreto dañadas. Por corrosión. Si planteamos un problema de corrosión en un edificio debe enfrentarse haciendo una visita de inspección, un levantamiento de daños, para luego hacer un diagnóstico, evaluar su gravedad, hacer la reparación y dar un tratamiento posterior que no recurra el proceso de corrosión.

Una inspección a una obra con corrosión debe involucrar por lo menos las siguientes etapas:

- a) Determinación de antecedentes de la estructura y del medio ambiente.
- b) Examen visual general de la estructura.
- c) Levantamiento de daños.
- d) Selección de zonas para la elaboración del plan de muestreo.
- e) Selección de las técnicas de ensayo, medición, y/o análisis más adecuados.
- f) Ejecución de mediciones, ensayos y/o análisis.

La secuencia que se presenta no significa que todas las actividades deben ser necesariamente llevadas a cabo.

Influye el tipo y magnitud de la obra, y de la que se desee obtener, además se puede programar una inspección preliminar y luego una inspección detallada.

6.2.2.2.2. RECONOCIMIENTO DE DAÑOS Y ACTIVIDAD CORROSIVA

Con la simple observación visual hay signos que nos permiten reconocer que una estructura se encuentra sometida a un proceso de corrosión. Luego de ello se puede certificar la apreciación mediante pruebas de campo.

a) Señales Evidenciales:

- Fisuras o grietas paralelas al refuerzo.
- Desprendimiento del recubrimiento del concreto (armadura expuesta).
- Manchas de óxido en la superficie, típico en estructuras con poco recubrimiento y de concreto permeable.

b) Pruebas Cualitativas:

Son las que permiten verificar el proceso de corrosión y tratar de determinar su origen, estas son:

- Mediciones del Potencial Electroquímico de Corrosión:
El potencial electroquímico de corrosión de las armaduras embebidas en el concreto es una magnitud que indica aproximadamente la situación de corrosión o pasividad de las mismas. El flujo de electrones entre las áreas anódicas y catódicas cuando existe corrosión en la barra de refuerzo, producen una caída del potencial llamada "potencial de corrosión". La medida del potencial de corrosión indica aproximadamente la situación de corrosión o pasividad del refuerzo. Es por lo tanto, un método puramente cualitativo, y siempre se debe completar con otro tipo de ensayos, tales como la medición de la velocidad de corrosión. La medida consiste en la determinación de la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de las armaduras y un electrodo de referencia que se coloca en contacto con la superficie del concreto.

El equipo a usar y los criterios para la ejecución de la medición son establecidos en la norma ASTM C-876. El electrodo de referencia más usado es la celda de cobre-sulfato de cobre, (Cu/Cu SO₄) como se muestra en la figura 6.3. Según la norma ASTM C-876, la magnitud de las mediciones permiten reconocer la actividad corrosiva en las barras a partir de -0.20V (CSE); y nos proporciona rangos de probabilidad de ocurrencia del proceso de corrosión en la forma siguiente (mostrado en la tabla 6.1):

TABLA 6.1 Potencial de corrosión

POTENCIAL (Voltios, CSE)	PROBABILIDAD
<-0.20	90% de probabilidad de que no ocurra un proceso corrosivo.
-0.20 a -0.35	Incertidumbre.
>-0.35	90% de probabilidad de que ocurra un proceso de corrosión
>-0.50	Hay actividad corrosiva, con daños visibles.

Este ensayo es realizado usualmente en puntos colocados en una malla. Esto requiere de un espaciamiento entre los puntos y esto depende en particular de la estructura. Un espaciamiento excesivo puede necesitar puntos de actividad o proporcionar insuficiente información para la propia evaluación, aun cuando los espacios reducidos incrementan el costo del estudio. Para el estudio de carpetas de puentes, ASTM C 876 recomienda un espaciamiento de 1.2 m. Si las diferencias de voltaje se encuentran entre puntos adyacentes exceden los 150 mV ó 0.15 V.

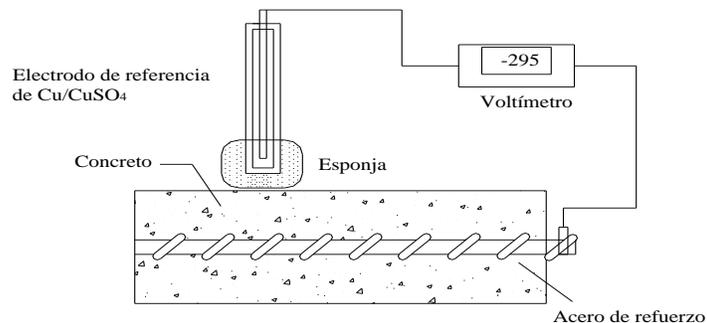


Figura 6.3 - Circuito formado con el electrodo de referencia para medir potenciales de corrosión

Este método no debe ser usado si: la carbonatación se prolonga hasta el refuerzo, Para evaluar en el interior del concreto no tiene que estar sujeto a frecuentes humedades, Para comparar la actividad de corrosión al aire libre del concreto con altas condiciones de humedad variable o contenido de oxígeno, o; Al formular las conclusiones acerca de los cambios en la actividad de corrosión debe repararse si los cambios del contenido de humedad u oxígeno llegan al nivel del refuerzo de acero.

- Pruebas de Sonido

Consiste en detectar los cambios de sonido que se producen al golpear con una comba metálica contra la superficie de concreto, con la finalidad de ubicar zonas donde el concreto se ha desprendido del refuerzo. Esta técnica nos permite aproximar las áreas de reparación, pues a pesar de que no haya manifestación de daños aún, nos certifica que el refuerzo está corroído y que el desprendimiento es ocasionado por el cambio volumétrico del producto de corrosión, afectando la capacidad resistente

- Medición de Espesores de Recubrimiento y Carbonatación

Consiste en determinar la profundidad de la carbonatación en el concreto, comparándola con los recubrimientos provistos a la estructura. Para ello se emplea el indicador de pH del concreto denominado "fenolftaleína" (1%) disuelto en alcohol etílico. Esta solución es incolora en valores de pH inferiores a 8. Para valores superiores a 9.5 se torna púrpura. De esta manera al frente de la carbonatación, cuyo valor de pH es bajo, no presenta coloración y se distingue claramente de la zona no carbonatada de concreto. En concretos normales, sin presencia de cloruros, en los primeros meses de vida de la estructura, el pH del concreto es > 12.6 . En este estado el acero de refuerzo se encuentra pasivado, cubierto por una continua capa protectora de óxido. Con el transcurso del tiempo, por efecto de sustancias ácidas del medio (CO_2), disminuye la alcalinidad del concreto a valores de $\text{pH} = 8$, rompiendo el ambiente de protección. Es bueno indicar que este proceso de carbonatación natural del concreto es un proceso inevitable en el que el anhídrido carbónico (CO_2) del aire con el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ del cemento hidratado forma el carbonato de calcio (CaCO_3), de ahí el nombre de carbonatación. Cuando hay cloruros en el concreto, la velocidad de avance de la carbonatación es mayor y la gravedad de daños se acentúa y se localiza.

- **Determinación del Contenido de Cloruros en el Concreto**

Consiste en determinar, mediante pruebas de laboratorio, el contenido de cloruros en la masa del concreto, ya sea que estos provienen de agentes externos (medio ambiente) o internos (agua, agregados, aditivos). Para ello se extraen muestras pulverizadas de concreto, en diferentes ubicaciones y profundidades vecinas al refuerzo y se someten a análisis químico para determinar la gradiente del contenido de ión-cloruro. Estos iones destruyen la capa pasivante del acero de refuerzo, a veces en forma muy concentrada, lo que ocasiona la corrosión por "picaduras". Esta relación de ánodos pequeños y cátodos grandes es sumamente peligrosa, puesto que puede provocar la rotura de la barra en la sección atacada.

TABLA 6.2 Límites máximos permisibles de contenido del ion cloruro en estructuras de concreto (NTP E-060)

TIPO DE ELEMENTO	CONTENIDO DE CLORURO (Solubles en agua, expresado en % del peso de cemento)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concreto pretensado 	0.06
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concreto armado expuesto a la acción de cloruros. 	0.10
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Concreto armado no expuesto a la acción de cloruros. 	0.15
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Estructuras protegidas 	0.80

- **Determinación de Corriente Erráticas o Vagabundas**

Las corrientes erráticas o vagabundas son las corrientes eléctricas que circulan a través de un circuito no previsto, en nuestro caso, el concreto.

Las corrientes vagabundas se detectan con 2 pares de electrodos de referencia (Cu/Cu = 4 saturado), dispuestos en cruz, se conecta cada para de electrodos al voltímetro, detectándose las corrientes vagabundas, de acuerdo con el gradiente de potencial hallado (ver tabla 6.3).

TABLA 6.3 Gradiente del potencial de corrosión

GRADIENTE DE POTENCIAL Mv/m	INTENSIDAD DE CORRIENTE
< 0.5	Débiles
0.5 a 5	Medianamente intensas
> 5	Intensas

c) Pruebas Cuantitativas

No hay métodos que nos permiten precisar el grado de corrosión, la extensión de las zonas anódicas, ni la velocidad de degradación, en estructuras de concreto armado. Hay factores externos e internos que impiden hacer una evaluación de este tipo, tales como naturaleza del medio ambiente al que están expuestas, temperatura, humedad relativa, espesores de recubrimiento del concreto, calidad de concreto, etc.

6.2.2.3. MÉTODOS DE PENETRABILIDAD

6.2.2.3.1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los mecanismos de degradación en el concreto involucran la penetración de materiales agresivos, como los sulfatos, dióxido de carbono, e iones de cloruros. En más casos, el agua es además requerida para mantener el mecanismo de degradación. Como resultado de esto, el concreto tiene una zona superficial que es altamente resistente al ingreso del agua que será generalmente durable.

La habilidad del concreto para resistir el deterioro por el medio ambiente que depende muchas veces de los materiales que fueron usados para hacer el concreto, además, las proporciones de la mezcla, el grado de compactación, y las condiciones de curado. La calidad de las zonas superficiales ha sido cada vez más reconocidas como un factor muy importante que afecta al valor de degradación de una estructura de concreto (Kropp y Hildsford, 1995). Para evaluar el potencial de durabilidad de un concreto vaciado, sería necesario enfocarse en los métodos de evaluación para medir la habilidad de la zona superficial para restringir el paso de agentes externos que pueden conducir directamente al deterioro del concreto o la despasivación y corrosión de los refuerzos embebidos en el concreto. Los ensayos descritos en esta sección vienen a ser los ensayos de zonas superficiales que proporcionan convenientemente una información para la evaluación del potencial de durabilidad del concreto.

6.2.2.3.2. ENSAYOS DE ABSORCIÓN (ENSAYO DE FIGG POR ABSORCIÓN DE AGUA)

Los ensayos de absorción miden el volumen de agua, el cual es absorbido dentro del concreto y se da bajo una relativa disminución del nivel de presión. Este volumen de absorción está en función de la porosidad capilar, el cual esta retorna dependiendo de la relación agua/cemento y el historial de curado. De estos ensayos pueden ser descritos como una técnica la llamada superficie-absorción y además, existen otros ensayos que miden la absorción dentro de un agujero perforado dentro del concreto. Este ensayo original de Figg en su procedimiento que requiere de un agujero de 5.5 mm de diámetro que puede ser perforado dentro del concreto a una profundidad de 30 mm. El agujero deberá estar limpio, un disco de espuma de polímero rígido se colocó dentro del agujero a una profundidad de 20 mm de la superficie, y el agujero fue sellado con un tapón de silicona (Figg 1973). Una aguja hipodérmica se insertó a través del tapón de silicona sellado y conectado a la jeringa y al medidor de capilaridad vía una serie de conectores (Fig.6.4). El nivel de agua de 100 mm y el tiempo para el traslado del émbolo a 50 mm del medidor de capilaridad horizontal (similar al usado en el ISAT). El valor obtenido fue llamado índice de absorción que es el mejor indicador de la calidad de concreto.

Desde el trabajo inicial de Figg, un sin número de modificaciones fueron hechas al equipo y procedimientos para mejorar la precisión y la repetitividad de los resultados (Catre, 1984, Fig. 1989). Estas modificaciones incluyen un agujero largo, una medición automática del traslado de los émbolos, y el uso de un tapón premoldeado, aliviando la necesidad de esperar al curado del tapón de silicona antes de la ejecución del ensayo. El equipo de este ensayo se encuentra comercialmente disponible.

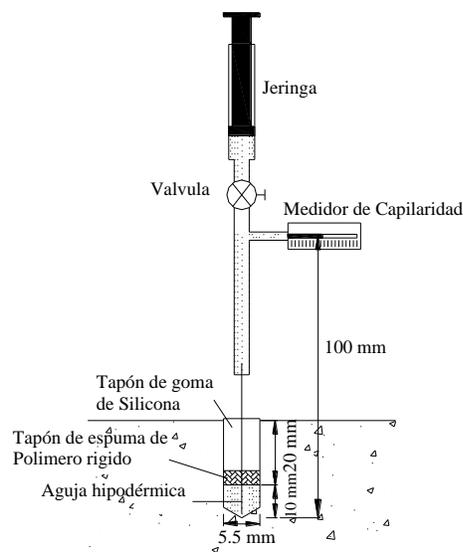


Figura 6.4.- Esquema del ensayo de Figg por absorción de agua

6.2.2.3.3. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DE AGUA (ENSAYO CLAM)

El ensayo de absorción involucra un nivel de agua (200 mm de agua cerca de 2 kpa de presión atmosférica), y el flujo es manejado principalmente por la absorción del concreto. El ensayo de permeabilidad de agua ha sido desarrollado con el uso de grandes presiones para obtener indicadores del coeficiente de permeabilidad del concreto. Este ensayo involucra la medición del flujo de agua dentro de la superficie del concreto bajo una presión constante (Montgomery y Adams, 1985). Este ensayo consiste en el diseño especial de un cobertor que es pegado a la superficie de concreto (Fig.6.5), y es sobre presionado

(presurizado) con agua que es proporcionado por un micrómetro de pistón de tuerca. Se calibra la presión a la medida de la cámara según la presión del agua.

Al realizar el ensayo, la cámara es llenada con agua, el micrómetro de tuerca es girado hasta tener una presión constante de agua cerca de 150 kpa de presión atmosférica, el traslado del pistón es anotado para un intervalo de tiempo de 20 a 30 min. El traslado del pistón es multiplicado por el área del cilindro que tiene el volumen de agua versus el tiempo que proporciona la información de la permeabilidad del concreto.

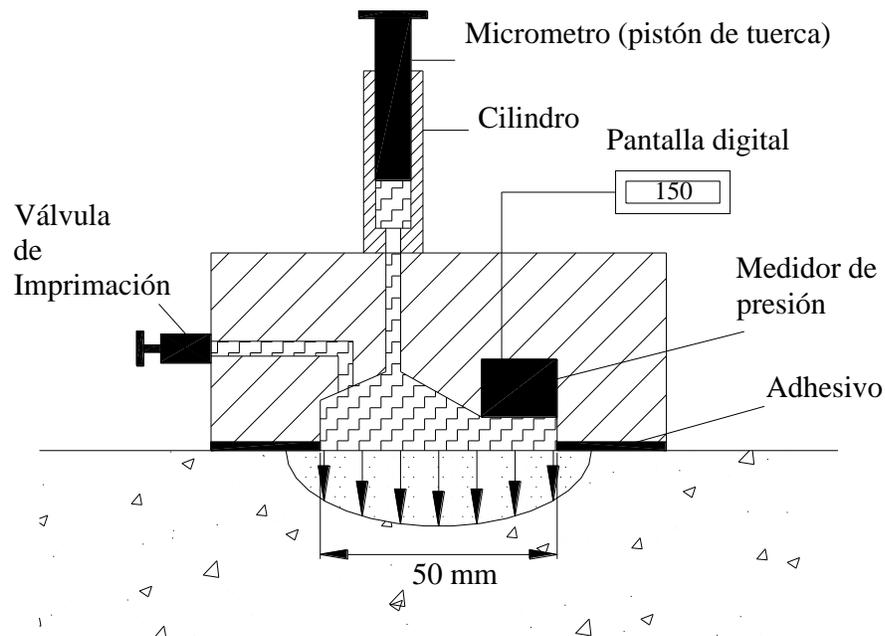


Fig.6.5 Ensayo CLAM

El ensayo CLAM puede ser desarrollado bajo una cierta presión del flujo de agua con un grado de penetración controlada inicialmente medido por la absorción, en lugar de la combinación de absorción e infiltración.

En la medición de absorción, el pistón es adelantado al valor que se mantiene la presión de agua de 1kpa. (Basheer, 1992), porque resulta de la absorción que no es unidireccional, este método nos brinda un índice de absorción es obtenido en vez que la verdadera absorción.

6.2.2.3.4. ENSAYOS DE PERMEABILIDAD DE AIRE (ENSAYO DE FIGG)

Una gran variedad de ensayos han sido proporcionados para basarse en la medición del flujo de aire y otros gases, a través del concreto. Esta relación se mide entre la permeabilidad al aire y otros indicadores de durabilidad, como son: la relación agua-material cementoso, resistencia, y eficiencia del curado (Whiting, 1987), estos ensayos son similares a los basados en agua, los ensayos de permeabilidad de aire involucra el llenado de un agujero dentro de la superficie de concreto o la aplicación de una cámara en la superficie. En muchos casos, consiste en el aspirado en un determinado tiempo tomándose como referencia el indicador de permeabilidad de aire. En general, el ensayo de permeabilidad de aire es simple respecto a los desarrollados en los ensayos de agua.

El verdadero ensayo de Figg de permeabilidad de aire involucra el mismo procedimiento de preparación del agujero como para el caso de absorción por agua descrito anteriormente (Figg 1973). El tubo sin embargo, es conectado a una bomba al vacío en lugar de la jeringa y el manómetro usado para el ensayo de agua. La bomba al vacío es activada hasta que la presión interior del agujero decrece a un valor por debajo de la presión atmosférica. La válvula es cerrada, y el flujo de aire dentro del agujero reduce el vacío.

El tiempo para obtener un incremento de la presión prescrita es medido, y el tiempo es dado en segundos como es el del índice de permeabilidad de aire. Un indicador de una alto índice de permeabilidad de aire es la pérdida del concreto permeable. En el ensayo original de Figg, la presión al vacío prescrita fue de -85 kpa y una presión prescrita con un incremento que fue de 5 kpa. Una subsecuente modificación (Fig.6.6) se intentó mejorar repetidamente, el tamaño del agujero se aumentó a 10 mm de diámetro y 40 mm de profundidad y la presión al vacío inicial prescrita fue cambiada de -85 kpa a -55 kpa (Cather, 1984). La disminución del vacío fue seleccionada para permitir el uso de la mano de un operador de válvulas de vacío. Otras modificaciones del ensayo de Figg (Dhir, 1987) intenta mejorar repetidamente, el diámetro del agujero aumentó a 13 mm, la profundidad a 50 mm, y el cambio de presión prescrita fue tomado cerca de -55 kpa a -45 kpa.

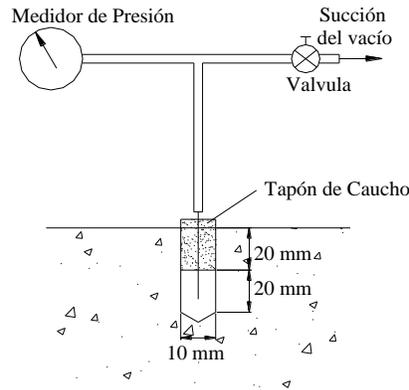


Figura 6.6 - Ensayo FIGG

En la tabla 6.4 mostraremos las ventajas y desventajas de los métodos de penetrabilidad usados para la evaluación de la durabilidad del concreto, cabe mencionar que algunos métodos que aparecen en este cuadro, no los tomamos en cuenta puesto que son muy parecidos a los ya mencionados anteriormente, pero quede claro que los métodos adicionales también son utilizados para el estudio de penetrabilidad del concreto.

TABLA 6.4 Ventajas y Limitaciones de los Métodos de Penetrabilidad

MÉTODO	VENTAJAS	LIMITACIONES
ISAT	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simple y barato para llevar a cabo. ▪ Equipo portátil ▪ Sensible a los cambios de la calidad del concreto. ▪ Totalmente no destructivo. ▪ Se ha progresado en la experiencia del uso de este método. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inestabilidad del concreto debido a una alta absorción de la capa superficial. ▪ Las medidas de absorción de fuera la superficie solo pueden verse afectadas por el revestimiento superficial. ▪ Dificultad para el sellado del cobertor circular en la superficie del concreto.

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensible a las condiciones de humedad del concreto.
Ensayo de Figg (absorción de agua)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No es afectado por el revestimiento y la capa del concreto superficial. ▪ Barato y simple para su uso. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Intrusivo cuando el llenado es requerido. ▪ El llenado puede afectar al concreto bajo el ensayo. ▪ Sensible a las características de los agregados. ▪ Sensible a las condiciones de humedad del concreto.
Ensayo "Covercrete" (absorción de agua)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Brinda una medida integra de toda la zona cubierta. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Intrusivo cuando el llenado es requerido. ▪ El llenado puede afectar al concreto bajo el ensayo. ▪ Sensible a las condiciones de humedad del concreto.
CLAM (Permeabilidad por agua)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mide el flujo bajo condiciones constantes de presión. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proporciona índice de permeabilidad, y no el coeficiente de permeabilidad. ▪ Sensible a las condiciones de humedad del concreto. ▪ Cuando la superficie del concreto es dañada. ▪ Realizar un ensayo a largo plazo si es requerido.
Método Steinert (Permeabilidad por agua)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mide el flujo unidireccional. ▪ De fácil interpretación tanto como el CLAM. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proporciona índice de permeabilidad, y no el coeficiente de permeabilidad.

		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensible a las condiciones de humedad del concreto. ▪ Cuando la superficie del concreto es dañada. ▪ Realizar un ensayo a largo plazo si es requerido.
Ensayo de Figg (permeabilidad por aire)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Barato y simple para su uso. ▪ No se influencia por capas superficiales o revestimientos. ▪ Poca sensibilidad a las condiciones de humedad que los ensayos con agua. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensible a las características de los agregados. ▪ Intrusivo cuando el llenado es requerido. El llenado puede afectar al concreto bajo el ensayo. ▪ Proporciona un índice de permeabilidad y no el coeficiente de permeabilidad.
Ensayo Schönlin (permeabilidad por aire)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No destructivo. ▪ Poca sensibilidad a las condiciones de humedad que los ensayos con agua. ▪ Comprende concretos bajo condiciones de humedad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proporciona índice de permeabilidad, y no el coeficiente de permeabilidad. ▪ Mide solo a superficies de concreto externas y que está afectada por revestimiento superficial.
SAF (permeabilidad por aire)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No destructivo. ▪ Poca sensibilidad a las condiciones de humedad que los ensayos con agua. ▪ Comprende concretos bajo condiciones de humedad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proporciona índice de permeabilidad, y no el coeficiente de permeabilidad. ▪ Mide solo a superficies de concreto externas y que está afectada por revestimiento superficial.

6.2.2.4. ULTRASONIDO

Este método de ensayo requiere de un personal especializado y con una cuidadosa evaluación, puede ser posible la detección de la fisuración del concreto, con equipos para ensayos no destructivos como los llamados "ultrasónicos" (ASTM C 597). La técnica más común es a través de la transmisión de ensayos usando un "soniscopio" u otro equipo disponible. Esto consiste en un pulso mecánico que es transmitido a una cara del elemento de concreto y recibido en la cara opuesta como se muestra en la figura 6.7. Cuando no es posible el acceso o el llegar a la cara opuesta, el transductor puede ser localizado en la misma cara (Fig 6.7^a). Se toma el tiempo por pulsos al pasar a través del elemento que es medido electrónicamente. Si la distancia entre la transmisión y el transductor receptor es conocida, la velocidad de pulso puede ser calculada.

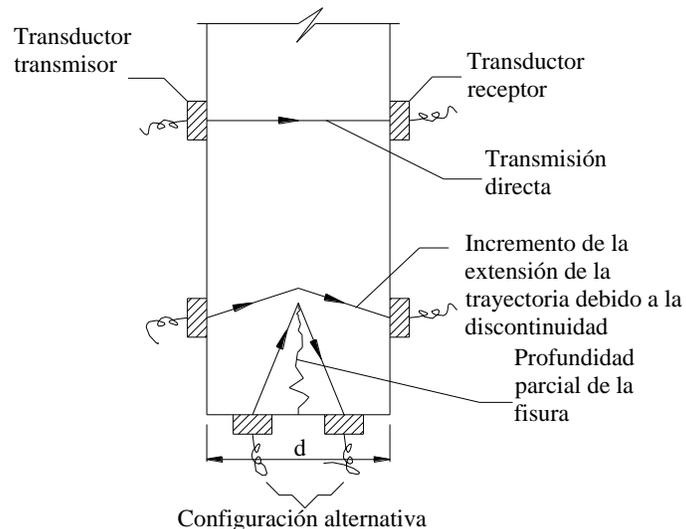
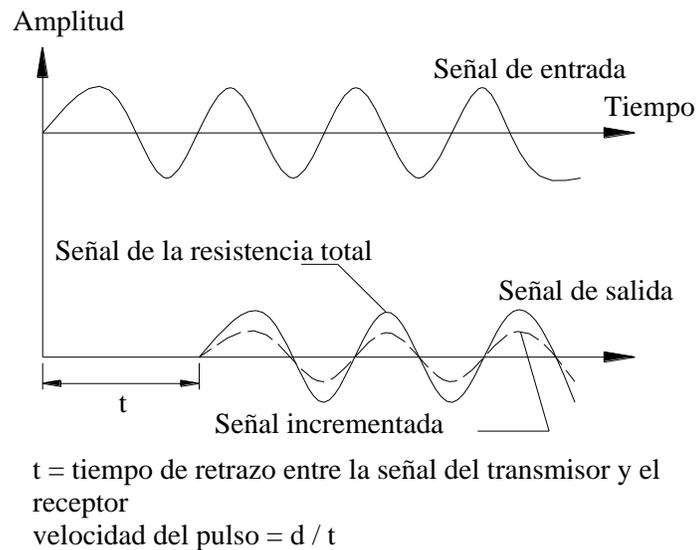


Fig.6.7.a - Pulso transmitido a través del elemento de concreto

Puede haber una variación considerable en la medición de la velocidad del pulso, que puede ocurrir si el resultado es discontinuo, que resulta de un incremento a lo largo del camino de la señal. Generalmente, el mayor aumento de la velocidad del pulso, es un indicador de una alta calidad del concreto.

La discontinuidad interna puede también ser detectado por la resistencia de la señal que puede ser muy débil, esta señal puede ser vista por medio de un "osciloscopio" (Fig.6.7.b). Sin embargo, algunos equipos proporcionan solo una lectura digital del pulso del tiempo de recorrido, sin el despliegue del osciloscopio. Si no llega la señal del transductor de recepción, puede ser un indicador que exista una discontinuidad interna, o una fisura o un vacío. Un mejor indicador de la extensión de la discontinuidad puede ser obtenido por la toma de lecturas de una serie de posiciones en el elemento de concreto.



6.7.b - Señal por el Osciloscopio

El equipo de "ultrasonido" debe ser operado por un técnico entrenado, y el resultado debe ser evaluado cuidadosamente por un ingeniero experto o especializado, porque la humedad, el refuerzo de acero, y objetos embebidos pueden afectar los resultados. Por ejemplo, con fisuras demasiado saturadas, puedan hacer que los testigos de ultrasonido sean generalmente imprecisos. En algunos casos, esta dificultad se distingue entre un grupo de fisuras cerradas o micro fisuras y una única fisura. Una posible alternativa a través de los ensayos de transmisión es el método de "eco-pulso", el cual todavía está en la fase de desarrollo. Una mayor ventaja de esta técnica es el acceso solo a una cara del elemento que es requerido. Es un pulso mecánico que va a través del elemento y que se refleja en la cara posterior del elemento, siendo recibido por un transductor de la cara frontal del elemento.

En el caso de un elemento sólido, en la pantalla de muestra el osciloscopio que consiste en una señal que corresponde al impacto inicial y a la señal del pulso que se refleja, como se muestra en la Figura 6.8. La señal inmediatamente indica la presencia de una discontinuidad interna. La velocidad del pulso puede además ser determinado si la longitud del camino es conocida.

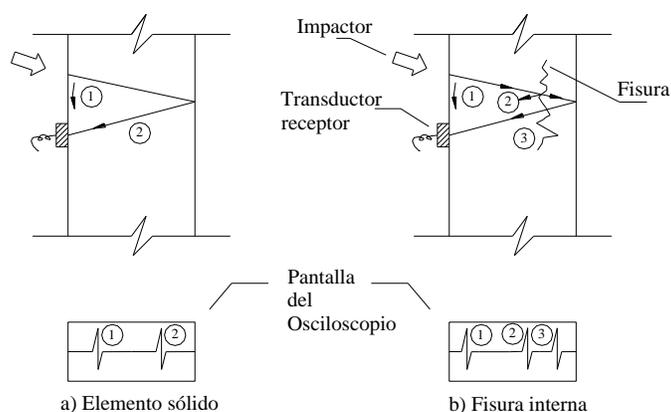


Figura 6.8 - Ensayo Ultrasonico, técnica del Eco-Pulso

6.2.2.5. EXAMEN PETROGRÁFICO

El análisis petrográfico del concreto debe ser hecho por un personal calificado con una debida instrucción y experiencia en la operación de equipos usados en el análisis y record e interpretación de los resultados obtenidos. El petrográfo debe hacer las consultas antes del muestreo que es tomado en campo y que deben ser obtenidos antes de la construcción, durante la construcción y los reportes de las condiciones descritos anteriormente.

Muestreo – Consiste en la toma de muestras de concreto que nos sirven para realizar los ensayos de laboratorio y análisis que presentan serios problemas de juicio en el orden de las muestras y que son verdaderamente representativas en las condiciones que son estudiadas. El estudio hecho con anterioridad debe proporcionar una información para la ubicación y el número de muestras requeridas. Las muestras más usadas para el examen petrográfico del concreto son las extracciones de corazones diamantinos (hablaremos de este ensayo más adelante) con un diámetro menor de 2 veces, y preferiblemente de 3 veces, el tamaño máximo del agregado grueso del concreto.

Si los agregados utilizados son de 6 pulg. (150 mm) la probeta tendrá un diámetro de 8 a 10 pulg. (200 a 250 mm) cuyo tamaño es satisfactorio para el estudio, pues es comúnmente tomarlo en práctica para evitar el alto costo y el manejo dificultoso, el tomar probetas de 12 a 18 pulg. (310 a 460 mm). El muestreo debe ser efectuado con una completa objetividad, para que la serie de muestras no incurran en cualquiera de los inusuales materiales defectuosos. Para el control de las probetas, los corazones o probetas deben ser tomados sin ninguna alteración o contaminación de los materiales para asegurar los ensayos de laboratorio y los análisis que son verdaderamente representativos. La probeta debe muestrearse por medio de otros recursos debido a que la probeta de concreto sufre alteraciones por ser muy pequeña, ósea utilizar recursos que no lo dañen. Podría utilizarse un martillo o martillo de aire pero puede inducir a fracturas internas o puede romper al concreto al momento de tomarlo, además sería dificultoso o imposible el poder describir adecuadamente la estructura al detalle. El muestreo debe incluir el concreto que se encuentra cerca de la superficie y el concreto que se encuentra interiormente, debido a que esto puede diferenciar sustancialmente el estudio de la fisuración, deterioro de la pasta de cemento, aumento de las reacciones cemento-agregado y otros factores. La muestra debe ser suficiente en tamaño y número que permita todo lo necesario para los ensayos de laboratorio. El examen petrográfico debe ser realizado en el concreto que no haya estado sujeto a ensayos de compresión o sometido a otros ensayos.

Inspección visual – La inspección visual consiste en la utilización de una lupa de mano y un microscopio estereoscópico, este puede proporcionar información muy valiosa cuando se aplica inicialmente en superficies exteriores, superficies fisuradas y con oquedades, fisuras frescas, y aún en la pasta de cemento y los agregados. De este examen los factores que pueden ser estudiados y descritos son los que veremos a continuación:

- Grados de hidratación del cemento.
- Relación A/C.
- Evaluación y cuantificación de cenizas volantes.
- Evaluación y cuantificación de microsílíce.
- Homogeneidad del mezclado.
- Defectos de la compactación.

- Identificación mineralógica y condición de los agregados
- Reacciones cemento-agregados pronunciadas
- Densidad de la pasta de cemento
- Homogeneidad del concreto
- Problemas de asentamiento y exudación del concreto fresco
- Profundidad y extensión de la carbonatación
- Ocurrencia y distribución de fisuras
- Características y distribución de oquedades
- Presencia de sustancia contaminantes, como pueden ser los casos de ataques por sulfatos, ácidos, cloruros, etc.

A parte del examen visual, puede haber otros más que pueden observar las partes notables del concreto, sedimentos secundarios, o partículas de agregado que están separadas y que pueden ser estudiadas con mayor detalle microscópicamente o químicamente, difracción por rayos X u otros tipos de análisis.

Microscopio petrográfico – La petrografía dentro de la sección permite a través de exámenes al concreto poder determinar mayores detalles la textura y estructuras que requieren de un urgente mantenimiento. Como es el caso de la probeta de concreto seccionada en que son guardadas en un pequeño plato de vidrio y presionándolo suave para posteriormente estudiar estas laminas, además pueden ser examinadas sobre un microscopio petrográfico de gran aumento superior a los 1000 diámetros, o con los lentes inmersos en un aceite que pueden tener cerca de 2000 diámetros. Del examen las secciones laminadas pueden ser estudiadas y descritas como sigue:

- La composición de agregados finos y gruesos
- Evidencia de la reacción cemento-agregado
- Proporción de las partículas de cemento sin hidratar
- Presencia de mixturas de minerales

El análisis microscópico del concreto sirvió además para observar las superficies de concreto y determinar el contenido de aire, cantidad de vacíos, proporciones volumétricas de los agregados y pasta de cemento. Los estudios tendrán mayor validez si se realizan de acuerdo a las normas ASTM C 457.

Otros métodos petrográficos – En este caso, los métodos petrográficos de otra manera como el microscopio, como la difracción de rayos X y el análisis de diferencia térmica, puede ser requerida para la identificación rápida de materiales de grano fino. Es un sistema de diagnóstico muy rápido para el estudio de la micro-estructura de la pasta hidratada y su relación con la durabilidad.

Parte de un microanálisis se hace sobre láminas delgadas de concreto, aproximadamente de 20 micras de espesor, como se muestra en la Foto 6.1 que desarrolla una sección tratada con una solución de acetato de uranio mostrando las zonas blanquecinas del gel reactivo del ataque álcali-sílice.

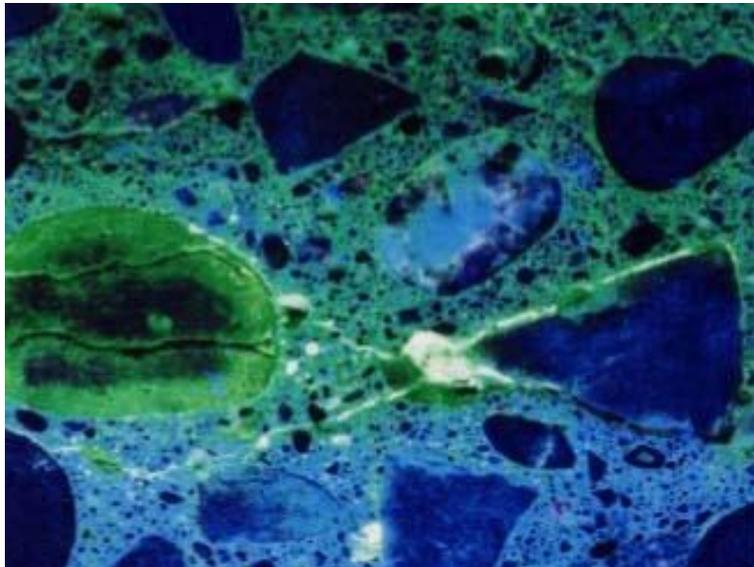


FOTO 6.1 Sección de concreto con una solución de acetato de uranio

6.2.2.6. MÉTODOS RADIOGRÁFICOS

La radiografía consiste en radiaciones para la obtención de fotografías del interior del concreto debido a un grupo de materiales densos de mayor radiación. De estas fotografías se puede determinar la ubicación del refuerzo, recubrimiento en el concreto, o la cantidad de grouting o lechada de los ductos del pos-tensado, etc.

Principios – Para la aplicación de los ensayos radiográficos se necesitará de una fuente de radiación que debe ser colocada en un lado del elemento que va a someterse al ensayo. Este método consiste en dejar pasar un haz de luz de radiación que será emitida a través del elemento, esto es atenuado para difundir el aumento o disminución, que depende de la densidad muchas veces del espesor del material que se ve transversalmente. La radiación surge del lado opuesto del golpe opuesto del film de una fotografía especial. (Fig.6.9). El film está expuesto en proporción a la intensidad que incide la radiación. Cuando el film es desarrollado, la visualización (una fotografía) del interior de la estructura del objeto es obtenido en dos dimensiones. La presencia de un material de alta densidad, como el refuerzo, se muestra en el film revelado como un área iluminada, y en el caso de una región con baja densidad, se observan vacíos que es mostrado en un área oscura.

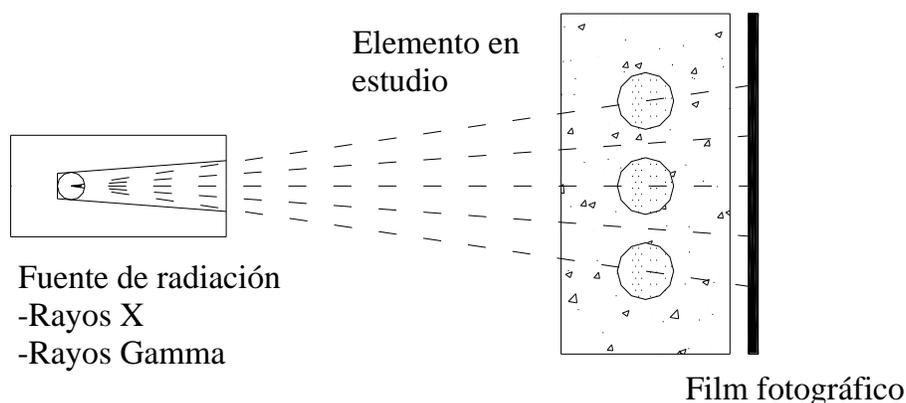


Figura 6.9 - Esquema del método radiográfico

El Instituto Británico de Normalización ha adoptado un ensayo estándar radiográfico del concreto (BS 1881: Parte 205). El estándar proporciona recomendaciones por investigadores considerando la evaluación de radiografías del concreto (Mitchell, 1991).

Instrumentación - En las radiografías de Rayos X, la radiación es producida por un tubo de rayo X (Mitchell, 1991). El poder penetrante de los rayos X depende de la operación de voltajes del tubo de rayo X. En la radiografía de rayos Gamma, un isótopo radioactivo es usado como la fuente de radiación. La selección de una fuente depende de la densidad y el espesor del objeto de ensayo y en el tiempo de exposición que puede ser tolerado por el elemento. La fuente más intensa es del cobalto-60 (^{60}Co), el cual puede ser usado para una penetración que pasa los 500 mm del concreto. Para elementos con espesores de 150 mm o menores, puede ser usados el Iridio-192 (^{192}Ir) o Cesio-137 (^{137}Ce) (Mitchell, 1991). La cinta del Film dependerá del espesor y densidad del elemento que servirá para el ensayo. En muchos campos de aplicación han sido usadas las fuentes de radioactividad debido a la gran penetración (radiación de alta energía) comparado con los rayos X. Un sistema conocido como "Escorpión II" desarrollado en Francia, usa un acelerador lineal que produce muy altas energías de rayos X que puede penetrar superando a 1 m del concreto. Este sistema desarrollado para la inspección de elementos de pre-tensado para establecer la condición y ubicación del cable del pre-tensado y el determinar la calidad del grouting o lechada en ductos del tendón (Mitchell, 1991).

Ventajas y Desventajas - Estos pueden satisfacer en la detección de fisuras en planos paralelos a la dirección de la radiación; pero estos son dificultosos para distinguir las fisuras en el plano perpendicular a la radiación. Los métodos radiográficos permiten observar la estructura interna de un elemento de concreto donde existen variaciones de densidad, aunque en ambos casos como las fuentes de rayos X y rayos Gamma pueden ser usados para las radiografías, el equipo de rayos X es comparativamente costoso y es dificultoso en la aplicación en campo. Debido a que el equipo de rayos Gamma, es menos costoso, más manejables y el traslado no es dificultoso, que generalmente es para el uso en campo. Sin embargo, el equipo de rayos X tiene muy pocas ventajas que puedan tomarse en cuenta como para ser usado. En cambio los rayos Gamma son emitidos continuamente de fuentes radioactivas y de buena protección que es requerido para la protección del personal.

Adicionalmente, el equipo de rayos X puede producir más energía de radiación que las fuentes radioactivas, el cual permite la inspección de elementos de gran espesor o el usarlo para tiempos de poca exposición.

6.2.2.7. MÉTODOS ESCLEROMETRICOS

6.2.2.7.1. TIPOS DE ESCLERÓMETROS

Los métodos esclerométricos constituyen ensayos elementales que proporcionan una idea de la resistencia del concreto, fundándose en la correlación existente entre dicha resistencia y el rechazo de un martillo, o la huella impresa por una bola al chocar contra la superficie de la pieza o elemento que se ensaya. Es decir, se estiman la resistencia a partir de la dureza superficial del concreto. Para realizar el ensayo existen varios tipos de aparatos, denominados "esclerómetros", entre los que podemos señalar los siguientes:

a) **El martillo Schmidt** – Este martillo mide la resistencia del concreto en función del rechazo de un martillo ligero, constituido por un pequeño cilindro macizo de acero, al hacerlo chocar con la superficie de la pieza o elemento. Debe obtenerse el rechazo medio de varias determinaciones, limpiando y alisando previamente la superficie que se ensaya. Puede resultar útil para determinar la marcha del endurecimiento del concreto, o para comparar la calidad entre distintas zonas de una misma obra, pero no para controlar la resistencia del concreto, debido a que la dispersión de las distintas determinaciones es bastante grande y, además, la parte ensayada afecta a una capa superficial de poco espesor. Los resultados que se obtienen vienen afectados por muchas variables, entre ellas: posición del martillo (horizontal, vertical o inclinada); estado de la superficie, etc. En manos expertas, el martillo de Schmidt es una herramienta útil; pero en manos inexpertas conduce a conclusiones erróneas.

b) **El martillo Frank-** Mide la resistencia del concreto por el diámetro de la huella que deja impresa una bola de acero sobre la que se da un golpe.

Para efectuar el ensayo se sigue la norma DIN 4.240, muy fácil de ejecutar; pero, como es el caso anterior, los resultados no tienen gran precisión, por lo sólo debe emplearse para obtener una idea de la calidad del concreto o de la marcha del endurecimiento del mismo.

c) **El esclerómetro Windsor CT.460** – De origen americano, y viene a ser un método más moderno que los anteriores. Consta de una pistola, con una carga explosiva, o cartucho, dispara una bala de 6.3 mm de calibre y 80 mm de longitud contra la superficie del concreto. Cuanto mayor es la resistencia, menor es la penetración. Clavado en el concreto, el proyectil asoma tanto más cuanto mayor es la resistencia. Unos gráficos, son facilitados por el fabricante que están en función de la dureza del agregado medido en la escala de Mohs, relacionan la longitud que emerge con la resistencia del material.

Los ensayos realizados por A.P.Keiller en los laboratorios de la Cement and Concrete Association muestran las diferentes relaciones entre longitudes y resistencias según el tipo de agregado utilizado. Curiosamente la dureza del agregado no parece ser el parámetro adecuado para expresar esa dependencia. No obstante, dentro del campo de calidades comprendidas entre 20 y 50 Mpa, los resultados conducen a una correlación prácticamente lineal y similar a la propuesta por el fabricante. Como es el caso del esclerómetro, el sistema permite detectar la diferencia entre las resistencias de dos concretos de similar composición, pero no los valores absolutos.

6.2.2.7.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS RESULTADOS

El empleo del aparato requiere una gran experiencia por parte del operador y su precisión, que en esa situación puede estimarse en líneas generales en $\pm 25\%$ si no se ha realizado una calibración directa, en el caso de que se hubiere hecho la calibración una desviación del $\pm 10\%$, esta desviación está relacionada a los siguientes factores:

a) El aparato es muy sensible a las variaciones locales del concreto relacionadas con la posición de las partículas de grava cercanas a la superficie. Por este motivo para cada lectura del esclerómetro suele elegirse una zona determinada del orden de 6 x 6 a 10 x 10 cm, en la cual se hace un cierto número de disparos, generalmente no menos de 9, sacándose la media y despreciando resultados según la dispersión que se encuentre.

b) Otros factores que intervienen sobre la precisión del método son el tipo y dosificación del cemento, la propia masa del elemento de concreto sobre el que se realizan las medidas, el tipo de encofrado y superficie y la compactación que haya sufrido el concreto. Todas estas variables solamente pueden ser tenidas en cuenta mediante un ensayo directo del esclerómetro con probetas moldeadas correspondientes a las condiciones determinadas en uso.

c) Las lecturas del esclerómetro aplicadas sobre un elemento de concreto en estado húmedo, son más bajas que cuando está en estado seco y ello naturalmente influye en el rebote producido. Este punto debe ser considerado cuidadosamente en el caso de que se establezca una calibración y en todo caso debe ser consignado en el parte de recolección de datos de la determinación de la resistencia.

d) Probablemente la variable con máxima influencia sobre el uso del esclerómetro es la carbonatación, como lo vimos anteriormente en el capítulo III, este es un fenómeno inevitable y ocurre en la superficie del concreto al combinarse al anhídrido carbónico del aire con la cal libre del cemento. Esto pueda que tenga una dureza superficial y el esclerómetro pueda reconocerlo como tal, pero en realidad no lo es, y en realidad es que tiene una resistencia más baja. Por lo tanto no debe hacerse este ensayo para concretos de más de 3 meses de edad, salvo que se realicen investigaciones especiales y determinen que la degradación no es debida a la carbonatación.

e) Análogamente el esclerómetro no debe aplicarse a concretos muy jóvenes salvo que se hayan obtenido correlaciones directas para su empleo.

Una probabilidad naturalmente de utilizar el esclerómetro en concretos de edad superior a 3 meses es la de pulir la superficie del concreto, una vez determinado el espesor de la capa de carbonatación para eliminar ésta.

6.2.2.7.3. LA ESCLEROMETRÍA SEGÚN NORMAS PERUANAS (NTP 339.181:2000)

Llamado también, método de ensayo para determinar el número de rebote del hormigón (concreto) endurecido (Esclerometría).

Para el estudio de este método de ensayo de esclerometría, podemos revisar la NTP 339.181-2000, que veremos a continuación.

Objeto – Esta Norma técnica establece la determinación de un número de rebote en el hormigón (concreto) endurecido usando un martillo de acero accionado por el resorte.

Campo de aplicación – Este PNTP se aplica para evaluar la uniformidad del concreto in-situ, para delinear regiones de una estructura de calidad pobre o concreto deteriorado y para estimar el desarrollo de la resistencia in-situ.

El uso de este método de ensayo para estimar la resistencia requiere del establecimiento de una correlación entre el esfuerzo y el número de rebote. La correlación se establecerá para una mezcla de concreto dada y un aparato dado. La correlación se establecerá sobre el rango de resistencias del concreto que sea de interés. Para estimar la resistencia durante la construcción, establecer la correlación realizando ensayos de número de rebote en probetas de concreto versus la resistencia última de las mismas probetas o de probetas compañeras. Para estimar la resistencia en una estructura existente, establecer la correlación de los números de rebote medidos en la estructura versus los esfuerzos de testigos diamantinos tomados de los emplazamientos correspondientes. Véase ACI 228.1 R para información adicional de cómo desarrollar la correlación y sobre el uso de las relaciones para estimar las resistencias en la estructura. Debido a la incertidumbre inherente en la estimación de la resistencia, este método de ensayo no se utiliza como base para la aceptación o rechazo del concreto.

Resumen del método – Un martillo de acero impacta, con una cantidad predeterminada de energía, sobre un émbolo de acero en contacto con la superficie de concreto y se mide la distancia que el martillo rebota.

Aparatos – Existen tres aparatos para realizar el ensayo de esclerometría:

- Martillo de rebote: Consistente en un martillo de acero, con resorte de carga, que al ser liberado impacta sobre un émbolo de acero en contacto con la superficie del concreto. La distancia de rebote del martillo de acero, luego del impacto, es medida sobre una escala lineal adherida al marco del instrumento.
- Piedra abrasiva: Consistente en carburo de silicio con textura de grano medio o un material equivalente.
- Yunque de ensayo: Aproximadamente de 150 mm (6 pulg.) de diámetro por 150 mm (6 pulg.) de altura de cilindro, fabricado en acero, con área de impacto de una dureza Brinell de 500 kg/mm² o Rockwell de 52 C. Provisto de una guía para centrar el martillo de rebote sobre el área de impacto y mantenerlo perpendicular a la superficie.



FOTO 6.2 Matillo de rebote (Martillo Schmidt con una bola de acero en su interior)

Área de prueba – Consiste en dos partes:

- Selección de la superficie e ensayo: Las estructuras de concreto a ser ensayadas serán de por lo menos 100 mm (4 pulg.) de espesor. Especímenes más pequeños deberán ser mantenidos rígidamente. Deberán evitarse las superficies de concreto que presenten descascaramiento o alta porosidad. El encofrado contra el que el concreto fue colocado deberá ser similar. Las superficies planas generalmente exhiben números de rebote más altos que otras formas de acabado. Si es posible, las losas estructurales deberán ser ensayadas en la parte inferior para evitar superficies terminadas.
- Preparación de la superficie de ensayo: El área de ensayo será de por lo menos 150 mm (6 pulg.) de diámetro. Las superficies de textura excesivamente suave o con mortero suelto, deberán ser pulidas con la piedra abrasiva descrita anteriormente, las superficies lisas no tendrán que ser pulidas.

El concreto no deberá compararse superficies a nivel del suelo con otros elementos de diferente nivel; el concreto a 0 °C (32 °F) o menos puede exhibir valores de rebote muy altos, el concreto sólo debe ensayarse después de que se ha descongelado (los martillos de rebote a –18°C ó 0°F pueden exhibir números de rebote reducidos en 2 ó 3); las temperaturas del propio martillo de rebote pueden afectar el número del rebote; para que las lecturas sean comparadas, la dirección de impacto, horizontal ascendente, descendente, etc., deberán ser las mismas o se aplicarán los factores de corrección a las lecturas. Los martillos del mismo diseño nominal pueden dar números de rebote que difieren de 1 a 3 unidades y por consiguiente, deberán hacerse ensayos con el mismo martillo para comparar resultados. Se dará mantenimiento y se verificarán los martillos cada 6 meses y siempre que haya razón para cuestionar su funcionamiento apropiado.

Procedimiento – Sostener el instrumento firmemente para que el émbolo esté perpendicular a la superficie de ensayo. Gradualmente empujar el instrumento hacia la superficie de ensayo hasta que el martillo impacte. Después del impacto, mantener presionando el instrumento y, si es necesario, oprimir el botón situado al costado del instrumento para trabar el émbolo en su posición retraída.

Leer el número del rebote en la escala y registrarlo, aproximándolo al entero. Tomar diez lecturas de cada área de ensayo. Los ensayos de impacto estarán separados por más de 25 mm (1 pulg.). Examinar la impresión hecha sobre la superficie después del impacto, y si el impacto aplasta o destroza la superficie (hueca con aire), anular la lectura y tomar otra lectura.



FOTO 6.3 Aplicación del martillo Schmidt sobre la superficie de concreto



FOTO 6.4 Aplicación del martillo Schmidt, además de la verificación y anotación del número de aplicaciones.

Cálculo – Descartar las lecturas que difieren del promedio de las 10 lecturas por más de 6 unidades y determinar el promedio de las lecturas restantes. Si más de dos lecturas difieren de este promedio por 6 unidades, desechar las lecturas y determinar los números del rebote en 10 nuevas ubicaciones dentro del área de ensayo.

Precisión y desviación – Para un simple espécimen, operador y equipo, la desviación estándar es 2.5 unidades (1s) como está definido en la ASTM E 177. Por consiguiente, el rango de 10 lecturas no deberá exceder de 12. La desviación de este método de ensayo no puede evaluarse, desde el número de rebote sólo puede determinarse en términos de este método de ensayo.

6.2.2.8. PRUEBAS DE CARGA

El objetivo de una prueba de carga es, generalmente, el de saber si la estructura se comporta correctamente y dentro del régimen elástico bajo la carga de servicio. En tal caso, la prueba es no destructiva y en ella no deben sobrepasarse los valores característicos de las cargas supuestas en el cálculo como máximas de utilización, ya que de otro modo se corre el riesgo de introducir lesiones permanentes en la estructura (fisuración o deformaciones no recuperables) Otras veces se efectúa la prueba de carga para conocer experimentalmente el margen de seguridad de una estructura, en cuyo caso es obligado llevar hasta rotura de algún elemento representativo de la misma. Naturalmente, este ensayo no tiene sentido más que cuando se repiten elementos idénticos o puede aislarse una zona de un conjunto homogéneo. Se recomienda por lo dicho que, en general, resulta arriesgado tratar de resolver, con una prueba de carga, el caso en que se desea saber si una estructura antigua de características desconocidas es capaz de admitir una carga de utilización superior a la de uso que viene recibiendo; y por ello debido al desconocimiento del grado de fragilidad de las piezas (distancia entre la aparición de signos apreciables y la rotura). La prueba de carga, por consiguiente, debe ser considerada como una comprobación adicional y no como una comprobación única (salvo en casos muy específicos), a pesar de su aparente evidencia como argumento definitivo de validez.

En general, las pruebas de carga de obras reales sólo pueden efectuarse sobre elementos que trabajen a flexión, no pudiéndose probar soportes u otros elementos comprimidos, por varias razones: magnitud excesiva de la carga necesaria, pequeñez, de las deformaciones bajo carga, carácter frágil de la rotura, etc.

En cuanto a la forma de realizar las pruebas, se utilizan casi siempre cargas repartidas; y la primera precaución consiste, precisamente, en materializar la carga de forma que resulte verdaderamente distribuida, sin formación de arcos de descarga (transmisión directa a los apoyos), que falsearán la prueba. Las balsas (depósitos) de agua son un procedimiento idóneo, que permite además regular cómodamente los sucesivos incrementos de carga. En cambio, los sacos de cemento, los sacos de arena (o arena simplemente) o similares sólo pueden emplearse si se colocan cuidadosamente y con suficiente separación entre ellos.

Las pruebas de carga deben hacerse únicamente cuando la parte de la estructura va a someterse a prueba y tenga como mínimo 56 días de edad. Si el inspector, el Proyectista y el Constructor están de acuerdo en ello, se podrá hacer el ensayo a una edad menor.

48 horas antes de aplicar la prueba la carga de prueba, se debe aplicar una carga que simule el efecto de aquella porción de las cargas muertas que aún no están actuando, debiendo permanecer aplicadas hasta que la prueba haya concluido.

¿Cómo es el procedimiento de carga de elementos a flexión?

Inmediatamente antes de aplicar la carga de prueba se tomarán lecturas iniciales.

La parte de la estructura seleccionada para aplicar la carga debe recibir una carga total, que incluya las cargas muertas que ya están actuando, equivalente a $0.8 (1.5D + 1.8L)$. La determinación de la carga viva (L) deberá incluir la reducción permitida por la Norma de Cargas E.020. La carga de prueba debe aplicarse con un mínimo de 4 incrementos aprox. iguales, sin ocasionar impacto a la estructura y de manera tal que no se produzca el efecto de arco en los materiales. Del mismo modo, es recomendable efectuar mediciones después de cada incremento de carga adicional de carga durante las 24 que siguen de la aplicación del último incremento de carga. Después de ello, la carga es removida y se efectúa una última medición 24 horas después

Para considerar que la estructura ha pasado la prueba de carga, ésta no deberá mostrar signos visibles de falla como fisuras, desprendimiento de concreto, deflexiones de tal magnitud que sean incompatibles con los requerimientos de seguridad de la estructura). Si la parte de la estructura sometida a prueba de carga no presenta evidencia visible de falla se considerará como una indicación de un comportamiento satisfactorio cualquiera de los dos criterios siguientes:

a) Si la deflexión máxima medida de una viga, piso o techo es menor de :

$$\Delta_{\text{máx}} \leq \frac{l_t^2}{50800h} \dots\dots\dots (6.1)$$

$$\Delta_{\text{Rmáx}} = \frac{\Delta_{\text{máx}}}{4} \dots\dots\dots (6.2)$$

Dónde: $\Delta_{\text{máx}}$: Máxima deflexión registrada.

L_t : Luz del elemento ensayado y si se trata de una losa armada en dos sentidos, la menor luz del paño. La luz se tomará igual a la menor entre la distancia a ejes de los apoyos y la luz entre apoyos más el peralte del elemento ensayado. Para un elemento en voladizo l_t será el doble de la distancia entre el apoyo del extremo del voladizo o volado.

h : Peralte del elemento ensayado.

$\Delta_{\text{Rmáx}}$: Deflexión residual igual a la diferencia entre la deflexión antes de aplicar la carga y la deflexión después de retirarla.

b) Si no se satisface (6.1) ó (6.2) el ensayo podrá repetirse pero, por lo menos, 72 horas después que la primera carga ha sido retirada. Se considera que la estructura pasa la prueba si:

$$\Delta_{\text{Rmáx.}} \leq \frac{\Delta_{\text{Fmáx.}}}{5} \dots\dots\dots (6.3)$$

Dónde: $\Delta_{Fm\acute{a}x}$: Deflexión máxima medida en la segunda prueba de carga respecto a la posición de la estructura al inicio del segundo ensayo.

Además de los requerimientos anteriores, la estructura no deberá presentar fisuración que dé indicios de una falla por corte inminente. En los elementos sin refuerzo transversal que presenten fisuras cuya proyección horizontal sea mayor que su peralte, se deberán efectuar evaluaciones adicionales para eliminar cualquier sospecha de una falla frágil por corte. Del mismo modo, las fisuras que se presenten en las zonas de anclaje o empalme del refuerzo a lo largo de la línea de éste, merecen especial atención. A todo lo largo de la prueba, deberá tomarse todas las precauciones necesarias para evitar accidentes, tales como colocación de apuntalamientos, plataformas, etc. Estos no deberán interferir con el ensayo ni alterar sus resultados.

6.2.3. MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN Y ENSAYO DE CORAZONES DIAMANTINOS (NTP 339.059 :2001)

6.2.3.1. CAMPO DE APLICACIÓN

Esta Norma Técnica Peruana establece los procedimientos normalizados para la obtención y ensayo de especímenes para la determinación de la resistencia a la compresión, tracción y flexión del concreto "in situ", y otros ensayos. Se dan los requisitos para el muestreo y preparación de la muestra, para asegurar que cumplen con los requerimientos dimensionales y que los especímenes consisten de concreto intacto y libre de fallas, tal como la estructura en particular lo permita. Generalmente, los especímenes de ensayo serán obtenidos cuando exista una duda acerca de la calidad del concreto colocado "in situ" debido a resultados bajos de resistencia durante la construcción o existan signos de daños en la resistencia de estructuras antiguas. No existe una relación universal entre la resistencia a la compresión de un corazón diamantino y la correspondiente resistencia a la compresión de una probeta cilíndrica normalizada. La relación es afectada por varios factores como el nivel de resistencia del concreto, la calidad histórica de la temperatura y humedad del sitio, y la ganancia de resistencia característica del concreto.

Históricamente, se ha asumido que la resistencia de los corazones diamantinos es generalmente el 85% de la correspondiente resistencia de la probeta cilíndrica normalizada, pero esto no es aplicable a todas las situaciones. El criterio de aceptación de la resistencia del corazón diamantino deberá ser establecido en el Reglamento Nacional de Construcciones (En la NTE 060 a los corazones diamantinos se les denomina testigos diamantinos).

6.2.3.2. APARATOS

- Taladro: Para obtener corazones cilíndricos, con broca tubular impregnada con fragmentos de diamante.
- Sierra: Para cortar especímenes de tamaño adecuado para el ensayo de flexión y cortar los extremos de los corazones diamantinos. La sierra debe tener extremos cortantes diamantinos o de carburo de silicio y debe ser capaz de cortar especímenes que cumplan con las prescripciones de dimensiones, sin excesivo calor ni daños.

6.2.3.3. MUESTREO

Las muestras de concreto endurecido para la preparación de los especímenes de pruebas de resistencia no deberán ser extraídas hasta que el concreto sea lo suficientemente resistente para soportar la remoción de muestras sin alterar la adherencia entre el mortero y el agregado grueso (véase nota1). Las muestras de concreto endurecido que demuestren defectos o que hayan sufrido daño en el proceso de remoción, no serán utilizadas en el ensayo de resistencia.

NOTA 1: No es posible especificar una edad mínima de cuando el concreto es lo suficientemente resistente como para mantenerse sin daño durante la extracción, debido a que la resistencia a una edad depende de la historia de curado y el grado de resistencia del concreto.

Si el tiempo lo permite, el concreto no deberá ser removido antes de 14 días de edad. Si esto no es posible, la remoción del concreto puede proceder si las superficies cortadas no presentan erosiones en el mortero y si las partículas de agregado grueso expuestas, están firmemente embebidas en el mortero. No deberán ser utilizados los especímenes que contengan el refuerzo embebido para la determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral, asimismo si el refuerzo estuviera embebido en la zona de tracción del espécimen, no se deberá utilizar en la determinación de la resistencia a la flexión.

Taladro diamantino: Un corazón diamantino tomado perpendicularmente de una losa, deberá ser ubicado, de ser posible, de tal manera que su eje esté perpendicular a la superficie de vaciado tal como fue colocado originalmente y no cerca de juntas formada por límites obvios de vaciado (juntas frías ni los extremos del elemento). Un espécimen tomado perpendicularmente a una superficie vertical, o perpendicularmente a una superficie dañada, de ser posible deberá ser tomado cerca de la mitad de la unidad de depósito y no cerca de juntas formadas por límites obvios de unidades de vaciado.

Extracción de muestras de losas: Para obtener un testigo diamantino de una losa, se deberá tener en cuenta que la losa elegida tenga las dimensiones suficientes como para asegurarse que se extraiga sin la inclusión de ninguna parte de concreto que haya sido rajado, astillado, socavado o dañado de alguna otra forma.

6.2.3.4. CORAZONES DIAMANTINOS

- a) Longitud de los corazones diamantinos extraídos de una estructura con el propósito de medir sus dimensiones estructurales deberán tener un diámetro de por lo menos 95 mm (3.75 pulg.). La longitud de dichos corazones se medirá de acuerdo a las normas ASTM C 174.

Para corazones que no tengan la finalidad fundamental el obtener dimensiones estructurales; medir la mayor y menor longitud sobre la superficie de corte a lo largo de líneas paralelas al eje del corazón diamantino. Registrar la longitud promedio con una aproximación de 5 mm (1/4 pulg.).

b) Corazones diamantinos para resistencia a la compresión

- **Espécimen de prueba:** El diámetro nominal del corazón diamantino para la determinación de la resistencia a compresión deberá ser por lo menos de 95 mm (3.75 pulg.). Corazones diamantinos con diámetros menores a 95 mm (3.75 pulg.) serán permitidos cuando es imposible obtener corazones diamantinos con ratios de longitud a diámetro ($L/D \geq 1$) para la evaluación de la resistencia a la compresión en casos distintos a compresión pura. Para concretos con un tamaño máximo nominal deberá ser preferentemente por lo menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso, y será por lo menos dos veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso. La longitud ideal del espécimen refrentado estará entre 1.9 y 2.1 veces el diámetro. No se ensayarán corazones diamantinos con una longitud menor al 95% de su diámetro antes del refrentado o una longitud menor a su diámetro después del refrentado.
- **Preparación de extremos:** Los extremos del corazón diamantino a ser ensayado en compresión deberán ser especialmente lisos, perpendiculares al eje longitudinal, y el mínimo diámetro que el cuerpo del espécimen. Si es necesario, cortar los extremos del espécimen hasta que se cumplan los siguientes requisitos:
 - Proyecciones, si existe alguna no deberá extenderse más allá de 5 mm (0.2 pulg.) encima de la superficie de los extremos.
 - La superficie de los extremos no deberán desviarse de la perpendicularidad con el eje longitudinal en más de 0.5° .
 - Los diámetros de los extremos no deberán desviarse más allá de 2.5 mm (0.1 pulg.) del diámetro promedio del espécimen
- **Condiciones de humedad:** los especímenes de prueba deberán ser ensayados en condiciones representativas de humedad de la obra o según los exija la autoridad responsable de la supervisión.

- Cálculos: Calcular la resistencia a la compresión de cada espécimen utilizando el área transversal calculada sobre la base del diámetro promedio del espécimen. Si el ratio longitud-diámetro (L/D) del espécimen es 1.75 o menos, corregir los resultados obtenidos y multiplicándolos por el factor de corrección correspondiente mostrando en la tabla 6.5

TABLA 6.5 – Factor de corrección por L/D

Ratio longitud /diámetro (L / D)	Factor de corrección de resistencia
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.0	0.87

Para valores de L/D intermedios, interpolar para la determinación del factor de corrección.

6.2.4. REVISIÓN DE PLANOS Y DATOS DE OBRA

Con el objeto de lograr una visión más completa del problema, es muy importante que se efectúe una revisión detallada de los planos y especificaciones del proyecto y comparar lo observado en obra, además ayudará el testimonio de las personas que intervinieron en la construcción. Deben de considerarse los detalles del diseño y planos de detalles de los refuerzos (planos de estructuras) para ser examinados y determinar si es que ocurre falla y donde se observan fisuras que pueden ser atribuidas a un inadecuado detallado del refuerzo. Los cálculos pueden indicar si el refuerzo proporciona una adecuada aplicación de las cargas. También se podrían observar en los planos, las condiciones de restricción y la presencia de contracción, expansión, y juntas de construcción que deben ser consideradas en los cálculos por esfuerzos de tensión inducidas. Para un mejor análisis debe hacerse una comparación entre el diseño de cargas y las cargas actuantes en la estructura.

6.3.0. SELECCIÓN Y PROCEDIMIENTOS DE REPARACIÓN.

Basados en cuidados, evaluación de las causas y de los daños, se deberá seleccionar el procedimiento a seguir en la reparación, el mismo que deberá tener presente uno o varios de los siguientes objetivos:

- a) Restaurar o incrementar la resistencia si fuera necesario
- b) Restaurar o incrementar la rigidez si fuera necesario
- c) Tener en cuenta el comportamiento durante la vida útil de la estructura
- d) Proporcionar rompe aguas o selladores impermeabilizantes
- e) Considerar la apariencia de los acabados en el caso de concreto expuesto
- f) Tener en cuenta la durabilidad esperada y/o
- g) Prevenir contra la corrosión del acero de refuerzo

Dependiendo de la naturaleza de los daños, se puede adoptar uno o más métodos de reparación. Por ejemplo, el esfuerzo de tracción puede ser restaurado inyectando en las fisuras un elemento epóxico; sin embargo, podría ser necesario aumentar la cantidad de refuerzo o usando postensado.

En el caso de concreto expuesto cuando la reparación de las fisuras deja señales inaceptables, podría darse el caso que se tenga que sustituir un sector bastante amplio de la superficie.

CAPÍTULO VII

REPARACIÓN DEL CONCRETO

7.1.0 EVALUACIÓN DE DAÑOS Y SELECCIÓN DEL MÉTODO DE REPARACIÓN

Para evaluar objetivamente los daños en una estructura es necesario determinar la causa que lo originó, que puede ser el resultado de un mal diseño, mano de obra deficiente, acción mecánica abrasiva, cavitación o erosión producida por efectos hidráulicos, deslave los agregados, ataque químico, reacciones químicas inherentes del concreto, exposición a agentes descongelantes, corrosión de elementos metálicos ahogados en el concreto o alguna otra exposición prolongada a un medio ambiente desfavorable (Las causas de fisuración en el concreto están discutidas en los capítulos III, IV y V). Las fisuras necesitan ser reparadas si estas reducen la resistencia, rigidez, o la durabilidad de las estructuras de concreto de un inaceptable nivel o estado de degradación. Las reparaciones pueden ser requeridas para mejorar la apariencia de la superficie del concreto. Las fisuras del concreto debido a que necesitan ser reparadas, están en función de la estructura que está seriamente perjudicada. En casos, como la fisuración de estructuras que retienen agua, la función de la estructura dará la necesidad de repararse, igual que su resistencia, rigidez, o apariencia que no se ve significativamente afectada. Las fisuras en pavimentos y losas en gran magnitud requieren reparación para prevenir el descascaramiento de los bordes, el traspase de agua en un menor grado, o la transmisión de cargas, etc. Independientemente de la causa, es necesario establecer la magnitud del daño y determinar si la mayor parte de la estructura tiene la suficiente calidad que nos permita hacer reparaciones duraderas. A partir de esta información se recoge el tipo y extensión de la reparación; es el paso más difícil, ya que se requiere un conocimiento completo de las condiciones por la exposición moderada de lo que desde un principio era un concreto de mala calidad, entonces su reemplazo por concreto de buena calidad debe proporcionar buenos resultados. Por el contrario, si el concreto dañado era de buena calidad, el problema es más complejo y para la reparación se requiere un concreto con excelentes cualidades o alterar las condiciones de exposición.

7.2.0 TIPOS DE REPARACIONES

7.2.1 REMOCIÓN DEL CONCRETO, PREPARACIÓN Y TÉCNICA DE REPARACIÓN

7.2.1.1 INTRODUCCIÓN Y CONSIDERACIONES GENERALES

Este capítulo trata de la remoción del recubrimiento del concreto existente con deterioro o degradación, la preparación de la superficie que va a recibir el nuevo material, preparación y reparación del refuerzo, además varios métodos que son utilizados para el colocado de materiales de reparación. El cuidado que se ejerce durante la remoción y preparación de las fases de un proyecto de reparación puede ser un factor muy importante en la determinación de la duración de la reparación, sin tener en cuenta el tipo del material o técnica usada para la reparación.

7.2.1.2 REMOCIÓN DEL CONCRETO

La reparación de un proyecto de rehabilitación usualmente involucrará la remoción del concreto deteriorado, dañado, o concreto defectuoso. Desafortunadamente, esta es una pequeña guía que es utilizada para proporcionar ayuda en la selección del uso de una mejor técnica de remoción. En muchos proyectos de reparación del concreto, las zonas de daño del concreto no están bien definidas. Existen muchas referencias que manifiestan que todo el concreto dañado o material deteriorado deba ser removido, pero esto no siempre es fácil, sobretodo el determinar tal material cuando ha sido removido demasiado. Se da una recomendación especial para el caso de continuar con la remoción del material hasta que las partículas de agregado se fracturen en vez de realizarse una remoción simple de la matriz de concreto. Sin embargo, en el caso de una disminución de esfuerzos, el agregado no puede fracturarse.

La remoción del concreto es usada para la destrucción del concreto que se ha visto afectado por medios agresivos o que pueden causar el daño del concreto que intenta permanecer en el lugar. En un proyecto importante de rehabilitación, donde existe una destrucción del concreto, se utilizó la remoción del concreto deteriorado, sobretodo encontrando una gran área de deslaminación que fue por consiguiente encontrada. Estas áreas estaban relativamente débiles y se identificaron usando un martillo y se encontró una cierta resonancia o un vacío o sonido hueco. En muchos casos, tales deslaminaciones pueden ser removidas antes de la colocación de los materiales de reemplazo.

Cuando el concreto es removido usando herramientas de impacto, se genera un potencial de resonancia pero en escala muy pequeña, además de cierto daño o fisuración en la superficie del concreto que sale del lugar. A menos que esta capa dañada sea removida, el reemplazo del material sufrirá y originará la aparición de una falla de adherencia.

7.2.1.2.1 CONSIDERACIONES GENERALES

La remoción del concreto concierne típicamente al deterioro y daño del material, que en este caso vendría ser el concreto. Sin embargo, algunos concretos sanos indican que puede ser removido para poder realizarse algunas modificaciones estructurales. La efectividad de varias técnicas de remoción puede diferir con el tipo de deterioro y para un concreto sano; algunas técnicas pueden ser más efectivas para concretos sanos, mientras otros pueden trabajar mejor en concretos con deterioros o dañados.

La selección de técnicas para la remoción del concreto es muy efectiva, segura, económica y el minimizar el daño del concreto degradado. La técnica de remoción puede ser elegida para que tenga un mayor efecto en la prolongación de la vida útil de la estructura que se encuentra fuera de servicio. Algunas técnicas permitirán en gran parte el trabajo de haber logrado sin remoción de la estructura una vida útil aceptable. Algunas técnicas de remoción pueden que no sean efectivas en todas las partes de la estructura. En algunos casos la combinación de técnicas de remoción puede ser usada para una remoción rápida y así limitar el daño del concreto restante. En los trabajos de campo puede haber variaciones en la técnica de remoción que puede ser apropiado para un caso específico.

7.2.1.2.2 CONTROL DE LAS OPERACIONES DE REMOCIÓN

Es esencial el evaluar las operaciones de remoción para limitar o restringir la extensión del daño del concreto. La evaluación de las superficies de concreto es usualmente lograda con la inspección visual y por su sonido. Sin embargo, el sonido no indica una micro-fisuración o daño cerca de la superficie. Solo los exámenes microscópicos o los ensayos de laboratorio pueden descubrir el daño cerca de la superficie. La evaluación de la superficie interior puede ser lograda usando uno de los siguientes métodos (estos pueden ser utilizados antes, durante, o después de la remoción del concreto):

- a) Se toma probetas para un examen visual, examen microscópico, ensayos de resistencia a la compresión, ensayos de resistencia a la rotura y tracción;
- b) Ensayo de velocidad de pulso;
- c) Ensayos de Eco-pulso.

7.2.1.2.3 CANTIDAD DE CONCRETO QUE VA A SER REMOVIDO

En muchos proyectos de reparaciones todo el concreto dañado y/o deteriorado debe ser removido. Sin embargo, el estimar la cantidad de concreto a ser removido antes de la reparación no es siempre un trabajo fácil, especialmente si la intención es sólo remover el concreto no dañado o sano. El sobrepasar los límites de remoción ha sido muy común. La poca exactitud estimada puede ser minimizada en su totalidad por las condiciones de servicio como posible culminación del tipo de trabajo de reparación que ha sido llevada a cabo. Cuando, necesidad, la condición de servicio es muy favorable y ventajosa en el trabajo de reparación, las cantidades estimadas deben incrementarse para considerarse algunos casos comprobables de deterioros continuados.

7.2.1.2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE REMOCIÓN DEL CONCRETO

Los métodos de remoción del concreto pueden estar categorizados de acuerdo a los procesos que actúan en el concreto. Estas categorías son: destrucción, corte, impacto, molienda y desgaste. Más adelante veremos con mayor detenimiento los métodos de remoción, las listas de las técnicas de remoción específica dentro de cada categoría, y además de proporcionar un sumario de informaciones adicionales de cada técnica.

7.2.1.2.5 MÉTODOS DESTRUCTIVOS

Los métodos de destrucción generalmente son empleados para una rápida expansión del gas que se encuentra confinada dentro de una serie de agujeros perforados para producir un control de las fracturas y remover el concreto posteriormente. El único método de destrucción mostrado en este reporte es la destrucción por explosivos. La destrucción por explosivos es considerada de más alto costo efectivo y los medios convenientes de la gran cantidad de concreto a remover. Este método generalmente involucra la perforación de agujeros, esto consiste en colocar un explosivo en cada agujero y la posterior detonación de los explosivos. En tal grado, de minimizar el daño o degradación del material que permanece después de la explosión, el control de la técnica de destrucción ha sido muy bien desarrollado en el estudio de reparaciones. Una de las técnicas más usadas, es la destrucción amortiguada, involucra una perforación de una línea de 3 pulgadas (75mm) de diámetro o de pequeños hoyos o la perforación de agujeros que van paralelos a la cara de remoción, el cargado de cada agujero se hace con cargas livianas de explosivo (usualmente colocando el cordón del detonante) que están distribuidas a lo largo de esta línea, el amortiguado de las cargas en cada agujero es total o se coloca un collar con arena húmeda alrededor y el detonante de explosivo con una capa de destrucción eléctrica. La distribución uniforme y la amortiguación de las cargas livianas producen una superficie relativamente sana con pequeñas aberturas. Este método puede generar cierta vibración en las estructuras, por eso que es bueno tener una adecuada selección de la cantidad de explosivos que se va utilizar para su posterior remoción y así no generar daños adicionales a las estructuras, es adicionalmente importante la manipulación de estos explosivos por personal calificado o experimentadas en el tema de remoción por explosión

7.2.1.2.6 MÉTODOS DE CORTE

Los métodos de corte generalmente son empleados con serruchos mecánicos de gran calor o jet con alta presión de agua que corta alrededor del perímetro de la sección del concreto que permitirá la remoción. El tamaño de las secciones estará libre de corte aquellas que permitan el transporte de equipos. Los métodos de corte involucran sierra de corte diamantina, soplete de arenado, de arco eléctrico y jets de alta presión de agua.

7.2.1.2.7 MÉTODOS DE IMPACTO

Los métodos de impacto son comúnmente usados en los sistemas de remoción. Estos generalmente emplean un golpe repetitivo de la superficie del concreto con herramientas de alta energía o de gran masa que fracturan y descostran al concreto. El experto debe ser cuidadoso en el uso de estos métodos y tener cuidado en el espesor parcial que va ser removido, pues puede producir microfisuración en la superficie del concreto restante o sano. La gran extensión de la microfisuración puede producirse también debajo del límite adherencia formando un plano debilitado. El comité ACI es generalmente incapaz de proporcionar guías para la previsión de los daños donde la adecuada transferencia de cargas es crítica en la reparación, los ensayos de adherencia son recomendable e estos casos. Existen varias técnicas por el método de impacto los cuales pueden ser el breaker sostenido de mano, breaker armado, los scabblers. Cada uno de estos tiene ciertas características muy particulares.

7.2.1.2.8 MÉTODOS DE FRESADO O MOLIENDA

Los métodos de fresado son comúnmente empleados para la remoción de una cantidad específica de concreto de grandes áreas bien pueden ser superficies verticales u horizontales. La profundidad de remoción puede variar a lo máximo en 1/8 pulg. (3 mm hasta 100 mm aprox.) Las operaciones de fresado usualmente permitidos en superficies sanas o libres de microfisuras.

Escarificador o fresador. Un escarificador es una herramienta de corte del concreto que es emplea debido a la acción rotatoria y masiva de la zona de corte que se encuentra dentro de la superficie del concreto. Esto es adicionalmente usado para remover los fragmentos de concreto sueltos (costras) de superficies recientemente destruidas y sirve también para la remoción del concreto que es fisurado y debilitado por un agente expansivo.

7.2.1.2.9 MÉTODO DE HIDRODEMOLICIÓN

Este método consiste en que puede ser tomado como una medida inicial para la remoción del concreto donde se desea preservar y limpiar el refuerzo de acero para reutilizarlo y además minimizar el daño que permanece en el lugar. La hidro-demolición puede utilizarse para la desintegración del concreto, arenas y pedazos de agregado grueso. Este proceso trabaja preferencialmente en concretos dañados o deteriorados. Debe tenerse cuidado en no picar losas esbeltas donde exista concreto dañado que ocupe todo su espesor en un área de reparación. Para la hidro-demolición se utilizan chorros de agua de alta presión de 10,000 psi. (70 MPa) se encuentran en rango de 30 a 40 gal/min (130 a 150 l/min). Con presiones que se incrementan desde 15,000 hasta 20,000 psi. (170 a 240 MPa) tiene la capacidad de fresar al concreto a una profundidad de 1/8 pulgada en casos severos (3 mm para aproximadamente 50 l/min).

7.2.1.2.9 MÉTODOS DE EXPLORACIÓN

Los métodos de exploración generalmente emplean fraccionadores hidráulicos con pulso de presión de agua o de expansión química usados en la perforación de agujeros que van a lo largo de una línea predeterminada que inducen en el plano de fisuras para remover el concreto. El patrón, el espaciamiento y la profundidad de los hoyos perforados afectan a la dirección y extensión de los planos de fisuras que se propaguen. Existen tres métodos de fraccionamiento, pueden ser los llamados fraccionador hidráulicos, los fraccionamientos de pulso de agua, y agentes expansivos.

- a. Fraccionador hidráulico. El fraccionador hidráulico consiste en un mecanismo de acuñado o calzadura que es usado antes del perforado del agujero para seccionar a los elementos de concreto. Este método tiene un potencial como una medida inicial de remoción de grandes volúmenes de concreto de estructuras de concreto masivo. Sin embargo, puede ser una medida secundaria de fraccionamiento y manipulación del concreto reforzado.

- b. Fraccionador por pulso de agua. Fraccionador por pulso con presión de agua requiere de agujero perforado para ser sellados con agua posteriormente. Un dispositivo, o dispositivos, que contiene una pequeña carga de explosivo que es colocada dentro de uno o más agujeros, y el explosivo es detonado. La explosión se crea por la pulsación de alta presión que es transmitida a través del agua en la estructura, y de las fisuras del concreto. Es una medida secundaria que se requiere para la remoción del concreto reforzado. Este método no trabajará si el concreto contiene gran cantidad de fisuras o deteriorado.

- c. Agentes expansivos. Los agentes expansivos son comercialmente disponibles sobre todo si el mezclado es adecuado con el agua que sufrirá un gran incremento en el volumen en un periodo corto de tiempo.

Debido a la colocación de agentes expansivos bajo un patrón determinado de una estructura de concreto, el concreto puede ser fraccionado para la remoción de una manera controlada. Esta técnica tiene un cierto potencial como una medida inicial de la remoción de grandes volúmenes de concreto. Este método es utilizable en agujeros o fisuras profundas. Puede ser una medida secundaria en la remoción o separación del concreto con el refuerzo. Este método tiene una gran ventaja es naturaleza no violenta para la reducción del concreto dañado.

7.2.1.2.10 MÉTODOS DE DESGASTE

Los métodos de desgaste remueven el concreto tratando de iniciar un medio abrasivo a altas velocidades que desgastan la superficie del concreto contaminada, además de preparar la superficie final por medio de una alta presión de agua.

- a. Arenado (sandblasting). El arenado es más comúnmente usado como método de limpieza del concreto y del refuerzo de acero en la industria de la construcción. En este proceso utiliza comúnmente la arena-sílice, o arena metálica como herramienta de abrasión inicial. Este proceso puede ser ejecutado por medio de 1 a 3 métodos, donde interviene como elemento principal la arena.

- b. Chorro de partículas (shotblasting). El equipo de chorro de partículas limpia o remueve el concreto por chorro de proyección metálica en la superficie del concreto que va a alta velocidad. Este equipo tiene la capacidad de remover una cierta cantidad de concreto sano o dañado. El chorro desgasta la superficie del concreto. Este método consiste en el rebote del chorro con el concreto pulverizado y colocado dentro de la máquina del chorro de partículas. Las partículas del concreto son esparcidas y depositadas dentro de un contenedor. El proceso del chorro de partículas se encuentra incluido dentro de la operación que es altamente eficiente y teniendo una daño en el medio ambiente aceptable.

El shotblasting o chorro de partículas de concreto, usan chorros de varias dimensiones. Este tamaño del chorro o shot depende del tamaño del elemento y su velocidad. El equipo de shotblasting ha evidenciado ser efectivo y altamente económico para remociones superiores a 3/4 pulg.(19 mm) de concreto. El shotblasting ha sido usado para remover valores superiores a 1.5 pulg.(38 mm) de concreto. Sin embargo, el costo por unidad cúbica se incrementa significativamente cuando se remueve concreto superiores a 3/4 pulg. (19 mm) de profundidad.

-
- c. Alta presión con chorro de agua (con abrasivos). La alta presión con chorro de agua con abrasivos es un sistema de limpieza que utilizan un flujo de agua a altas presiones de 1,500 a 5,000 psi. (de 10 a 35 MPa) conteniendo arenas abrasivas, óxido de aluminio. El equipo tiene la capacidad de remover sustancias dañinas o partículas foráneas. La abrasión por chorro de agua proporciona una limpieza de la superficie y eliminar las partículas en el aire, esto ocurre usualmente en el proceso normal del arenado. Sin embargo, el agua usada puede ser colectada y el abrasivo remover antes de que el agua descargue dentro del sistema de tuberías.

7.2.1.3 PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Uno de los pasos más importantes en la reparación o rehabilitación de una estructura de concreto es la preparación de la superficie que va a ser reparada. La preparación de la superficie involucra ciertos pasos que deben ser tomados después de la remoción del concreto dañado. La reparación solo será buena si se hace una buena preparación de la superficie, siendo indiferente de la naturaleza, sofisticación, o el material de reparación que muchas veces pueda ser costoso. Para el concreto reforzado, la reparación puede incluir propiamente dicha la preparación del refuerzo de acero en el orden de desarrollar adherencia con el concreto reemplazado y adicionalmente asegurar el comportamiento deseado en la estructura.

7.2.1.3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

La preparación de la superficie consiste en la etapa final, pues consiste en la preparación de la superficie del concreto que recibirá el material de reparación. La apropiada preparación de la superficie del concreto depende de las operaciones precedidas y el tipo de reparación que debe ser emprendida.

La selección de los métodos apropiados es extremadamente importante ya que tiene una gran influencia en el costo y desempeño de la reparación.

7.2.1.3.2 MÉTODOS PARA LA PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

Los típicos métodos de preparación de la superficie están descritos a continuación:

- a) Limpieza química. En muchos casos los métodos de limpieza química en la preparación de la superficie no son apropiados como materiales de la reparación del concreto. Sin embargo, podría utilizarse si se da una capa del elemento químico y se hace bajo de condiciones adecuadas, para la limpieza del concreto podría utilizarse detergentes, fosfato de trisodio, y varios limpiadores de concreto. Es importante la localización de agentes de limpieza para después remover los materiales contaminantes del concreto. Los solventes no deben ser usados para limpiar el concreto que se disolverá con el contaminante y transportarlo dentro del concreto.
- b) Utilización de ácidos. La utilización de ácidos para la superficie del concreto ha sido usada mucho para la remoción. El ácido removerá en gran medida la pasta del cemento para proporcionar una superficie áspera el cual mejorará la adherencia de los materiales de reemplazo. El comité ACI 515.1R brinda algunas recomendaciones respecto al uso de los ácidos sólo cuando no haya otro recurso alternativo en la preparación de la superficie que va a ser usada, y el comité ACI 503R no recomienda el uso de ácidos.
- c) Preparación mecánica. Esta técnica consiste en la remoción mecánica dentro de las capas de la superficie del concreto usando equipos como las herramientas de impacto (breakers, scabblers) molidor, y escarificador. Puede haber una variedad de superficies, esto dependiendo del equipo usado.

- d) Preparación abrasiva. Esta técnica consiste en la remoción dentro de las capas de la superficie del concreto utilizando equipos abrasivos como el arenado, shotblaster o chorro de partículas, o los chorros de alta presión de agua.

7.2.1.4 REPARACIÓN DEL REFUERZO

En el acero de refuerzo existe la causa más dañina, frecuente y la más conocida, como es la corrosión. Existen otras posibles causas de daño como pueden ser por incendio y ataques químicos. Se debe seguir una preparación básica y procedimientos de reparación que pueden ser usados para todas estas causas de daño en el refuerzo de acero. Después de determinar la causa de daño, es necesario exponer al acero, para evaluar su condición, y preparar las técnicas de reparación del refuerzo. Se deben seguir los pasos apropiados para la preparación del refuerzo y determinar un método reparación que ayude a brindarle una vida útil a largo plazo, en lugar de una solución temporal.

7.2.1.4.1 REMOCIÓN DEL CONCRETO QUE RODEA AL ACERO

El primer paso en la preparación del refuerzo o acero de pretensado es la reparación o limpieza que consiste, en la remoción del concreto que circunda el refuerzo. Se debe tener mucho cuidado en la práctica para asegurar que el refuerzo o el acero de pretensado tenga un mayor daño que debido al proceso de remoción del concreto. El breaker de impacto puede incrementar el daño del refuerzo o del acero del pretensado si el rompedor o breaker es usado sin ninguna consideración de la ubicación del refuerzo. Por esta razón, el pacómetro es un método muy efectivo en el reconocimiento del refuerzo (para determinar la ubicación y tamaño del refuerzo en el concreto) y verificar además que se debe tener una copia de los planos de estructuras que deben ser usados para determinar la complementariamente la ubicación del refuerzo. Una vez encontrada el área del concreto dañado ha de ser removido posteriormente, usando un pequeño martillo y un cincel para remover el concreto cercano del refuerzo. Se debe tener cuidado de no vibrar el refuerzo o por otra parte causar un daño en la adherencia del concreto adyacente al área a reparar.

-
- a) Cantidad de remoción. El concreto dañado, y débil es fácil de remover claro usando un cincel. Si las varillas de refuerzo se encuentran parcialmente expuestas después de remover el concreto dañado, puede no ser necesario una remoción adicional del concreto causando una exposición total de la varilla de refuerzo. Si durante el proceso de remoción, el refuerzo es expuesto y se determina que tiene una pérdida de óxido o es un producto de la corrosión o no tiene una buena adherencia alrededor del concreto, es recomendable remover el concreto en forma continua para crear una superficie limpia bajo el acero de refuerzo o espaciada a 1/4 pulg.(6 mm) o que alcance un tamaño máximo de agregado para colocar posteriormente el material a reparación en el espacio dejado por la remoción del concreto que rodea el refuerzo.
- b) Examinación del acero de refuerzo. Después del deterioro y la necesidad de remover el concreto dañado y la posterior colocación un concreto sano, el acero de refuerzo debe ser limpiado y examinado cuidadosamente para determinar si el acero de refuerzo es capaz de actuar como desea el diseñador. Si el refuerzo ha sido dañado por la corrosión (descostrado y picado), este puede ser reemplazado o cambiado bajo responsabilidad del ingeniero. En las especificaciones del proyecto se deben incluir criterios por la cual se toman decisiones que conciernen a la reparación o reemplazo que puede ser hecho durante el proyecto con la exposición del refuerzo.

7.2.1.4.2 LIMPIEZA DEL REFUERZO DE ACERO

Toda la superficie expuesta con refuerzo debe ser limpiada de todo el mortero adherido, óxido, aceite, u otras sustancias contaminantes. El grado de limpieza dependerá del procedimiento de reparación y material seleccionado.

En áreas limitadas, el cepillado con esponja de alambre o la utilización de otras herramientas de mano de limpieza pueden ser aceptables. En general, el arenado es el método preferido y el más adecuado.

7.2.1.4.3 REPARACIÓN DEL REFUERZO

Existen dos tipos de refuerzo que son usados en las estructuras de concreto. El refuerzo de acero y el acero de pretensado. Debido a la diferencia de mecanismo por el cual cumple cada tipo y el de proporcionar un refuerzo estructural, existen diferentes procedimientos de reparación que son necesarios para los dos casos. Para reparación del refuerzo, también depende de la condición de exposición del refuerzo. Para reforzar el acero, existen uno o dos alternativas de reparación: el reemplazo de las varillas deterioradas; o completar parcialmente las varillas deterioradas. Tales alternativas se usan estrictamente por la decisión que toma el ingeniero que está basado en los propósitos del refuerzo y la capacidad estructural requerida por el elemento de refuerzo.

7.2.2 MATERIALES DE REPARACIÓN

7.2.2.1 INTRODUCCIÓN

Este tema contiene descripciones de varias categorías de materiales que son adecuados para la reparación o rehabilitación de las estructuras de concreto. Las propiedades típicas, ventajas, desventajas o limitaciones, aplicaciones típicas, y estándares aplicables serán discutidos para cada material de reparación. Sin embargo, es una guía general que proporciona una selección de los materiales de reparación.

7.2.2.2 MATERIALES CEMENTOSOS

Para equilibrar las propiedades del concreto deben ser reparadas tan estrechamente como sea posible, concretos con cemento portland y morteros con otras composiciones cementosas que son frecuentemente mejores como elección de los materiales de reparación.

7.2.2.2.1 CONCRETO CONVENCIONAL

El concreto convencional está compuesto por cemento portland, agregados y agua. La mezcla que es usada frecuentemente es aquella incorporación de aire, pues en muchos casos acelera o retarda la hidratación, mejora la trabajabilidad, reduce los requerimientos de agua en la mezcla, incrementa la resistencia, o altera otras propiedades del concreto. Los materiales puzolánicos, como son las cenizas volantes, o el micro sílice, pueden ser usados junto con el cemento portland para economizar, o para proporcionar propiedades específicas como es la reducción del calor de hidratación inicial. Mejora el desarrollo de la resistencia a largo plazo, o incrementa la resistencia por la reacción álcali-agregado y el ataque por sulfatos.

Las proporciones del concreto pueden ser seleccionadas para proporcionar trabajabilidad, densidad, resistencia y la necesaria durabilidad para la aplicación particular (ACI 211.1) tratando de minimizar la fisuración por contracción, la reparación del concreto debe tener una cierta relación de agua-cemento siendo lo más baja posible y con un contenido de agregado grueso lo más alto posible. De acuerdo al informe del comité ACI 201.2R, una regular resistencia para la congelación del concreto pesado debe tener una relación agua-cemento que no exceda el 0.45 para secciones esbeltas y para otras estructuras 0.50. La mezcla, transporte, y colocación del concreto convencional debe seguir la guía del comité ACI 304R.

- a. Ventajas. El concreto convencional es fácilmente disponible, bien estudiado, económico, y relativamente fácil para producir, colocar o vaciar, brindarle acabado, y curarlo. Generalmente, pueden proporcionarse las mezclas de concreto para igualar las propiedades del concreto que se encuentra debajo; por lo tanto, el concreto convencional es aplicable ampliamente en el ramo de reparaciones.

El concreto convencional puede ser fácilmente colocado bajo el agua usando ciertas técnicas reconocidas y además debe tenerse precauciones que garantice la integridad del concreto colocado (ACI 304R). El concreto es típicamente colocado bajo el agua usando una manguera y utilización de una bomba.

-
- b. Limitaciones. El concreto convencional sin adiciones no debe ser usados en reparaciones en donde el medioambiente agresivo es causa del deterioro del concreto original y que no ha sido eliminado a menos que la vida en servicio sea aceptable. Por ejemplo, si en el caso de un concreto viejo sufre un deterioro, puede deberse a muchas causas como puede ser el caso de ataque de ácidos, ataque agresivo por agua, o incluso por abrasión-erosión, la reparación con el concreto convencional no puede ser exitosa a menos que la causa del deterioro sea removida o detectada. Cuando se usan capas de adhesivos, las propiedades de contracción del material de reparación son críticas ya que el nuevo material que se coloque es un material que se encuentra esencialmente expuesto en su totalidad a cambios climáticos o de temperatura y experimentará la conocida contracción. Se deben tomar toda consideración de las propiedades de contracción y procedimientos de curado que deben ser dirigidos o propuestos en las especificaciones de los procedimientos de reparación. El concreto que es mezclado, transportado, y colocado sobre condiciones de climas cálidos o de altas temperaturas, humedad baja o vientos fuertes, requieren medidas que deben ser tomadas para minimizar los efectos indeseables (ACI 305R). Sin embargo, estos requerimientos deben ser especiales para producir un concreto satisfactorio que soporte climas fríos (ACI 306R).
- c. Aplicaciones. El concreto convencional es mayormente usado en reparaciones que involucran secciones relativamente gruesas y que requieren grandes volúmenes de los materiales de reparación. Típicamente el concreto convencional es apropiado para utilizarlo parcial y totalmente en reparaciones de pulido sobre capas donde el espesor mínimo se encuentra cerca de 4 pulg. (100 mm) o el recubrimiento se extiende más allá del refuerzo. El concreto convencional es comúnmente usado para reparaciones en muros o placas, estribos de puentes, y estructuras hidráulicas (Mc Donald, 1987). El concreto convencional es particularmente conveniente para las reparaciones en ambientes marinos debido a la alta humedad típica en tales ambientes el potencial de contracción se minimiza.
-

- d. Normas. El ASTM C 94 brinda un listado de la fabricación y mezclado del concreto y la entrega al comprador de la mezcla fresca o en estado no endurecido. Las propiedades como la contracción y la adherencia no está incluido en estas especificaciones, y estos pueden ser especificados a parte en una consideración especial que tiene la reparación.

7.2.2.2.2 MORTERO CONVENCIONAL

El motero convencional es una mezcla de cemento portland, agregados finos y agua. La reducción del agua en la mezcla, los agentes expansivos y otros modificadores son usualmente usados con el mortero convencional para reducir la contracción.

- a. Ventajas. Las ventajas del mortero convencional son similares a las del concreto convencional. Adicionalmente, el mortero puede ser colocado en secciones esbeltas. Una gran variedad de morteros disponibles son los morteros precompactados. Estos son particularmente usados para reparaciones pequeñas.
- b. Limitaciones. Los morteros generalmente exhiben un incremento de la contracción por secado comparado con el concreto debido a la gran cantidad de volumen de agua, el alto contenido de la unidad de cemento y una alta relación agregado-pasta. El alto contenido de aire usualmente proporciona una adecuada durabilidad para la congelación y deshielo, además la resistencia al grado de salinidad; sin embargo, un alto contenido de aire reduce la resistencia.
- c. Aplicaciones. El mortero convencional puede ser usado en las mismas situaciones como el concreto convencional dondequiera que se requieran la reparación de secciones esbeltas.
- d. Normas. La norma ASTM C 387 cubre los temas de producción, propiedades, compactación, y ensayos de compactación, secado, materiales combinados para concretos y morteros. Se debe tener una especial consideración para las propiedades del concreto que no son cubiertas en estas especificaciones las cuales son importantes en los materiales de reparación como son la contracción y la durabilidad.

7.2.2.2.3 MORTERO COMPACTADO EN SECO

El mortero compactado en seco puede consistir en 1 parte de cemento, 2 ½ a 3 partes de arena, o materiales pre-compactados, y la adición de agua. El procedimiento de compactado consiste en que el mortero que se pegue siempre utilizando las manos como moldes en forma de bola presionándolo muy poco y así no exudará el agua pero no dejará la mano húmeda, así podemos darnos cuenta de su trabajabilidad o apto para colocarlo. El curado es crítico debido al poco contenido de agua inicial del mortero compactado en seco. El mortero pre-contraído es un mortero con bajo contenido de agua que ha sido mezclado y permitido utilizarlo dentro de 30 a 90 minutos antes de su utilización, un factor importante es la temperatura ambiente. El mortero pre-contraído puede ser usado para reparar áreas pequeñas por medio del procedimiento de apisonado o compactado. El remezclado es requerido después de un período determinado.

- a. Ventajas. Debido a la baja relación agua-cemento el compactado en seco exhibe muy poca contracción. Por lo tanto, la zona reparada permanece firme y de buena calidad con respecto a la durabilidad, resistencia e impermeabilidad. Si la reparación debe ser de igual color que el concreto que lo rodea, o sea una combinación de gris y blanco en ese caso puede ser usado el cemento portland. Normalmente cerca de un tercio de cemento blanco es lo adecuado, pero las proporciones más exactas puede ser sólo determinado por medio de ensayos.
- b. Limitaciones. El compactado en seco no puede ser bien preparado para el resane en zonas con poca depresión o el resane de áreas que requieren un llenado bajo el refuerzo expuesto, o el resane completo de fisuras extensas que puedan existir a través de las secciones de concreto. Sin un adecuado curado, el mortero compactado en seco durante la reparación puede estar sujeto a fallas.
- c. Aplicaciones. La mortero compactado en seco puede ser usado para el llenado de grandes o pequeñas fisuras, forma de fisuras muy juntas, o algunas fisuras que por su tamaño pueda permitir una adecuada compactación de la zona. Tales reparaciones pueden ser complicadas en superficies verticales y superficies altas. El compactado en seco puede ser también usado para el sellado de fisuras estrechas, además sirve para la reparación de fisuras inactivas; sin embargo, este método no es recomendable para el sellado o reparación de fisuras activas.
- d. Normas. Ninguna

7.2.2.2.4 FERROCEMENTO

El ferro cemento es un término para describir un tipo especial de concreto reforzado que difiere del reforzado convencional o concreto pre-tensado en el cual los elementos de refuerzo están dispersos o pueden estar agrupados (ACI 549R). El ferro cemento es comúnmente elaborado en morteros con cemento hidráulico reforzado con una malla de alambre de diámetro relativamente pequeño y espaciado a una cierta distancia, este concreto puede contener varias mallas una tras otra a distancias muy pequeñas. La malla puede ser hecha de acero o de otros materiales convenientes.

- a. Ventajas. El ferro cemento tiene resistencias muy alta de tensión con relación al peso de este y tiene un mejor comportamiento con la fisuración, en comparación con el concreto reforzado convencional.
- b. Aplicaciones. Ya que el encofrado no es requerido, el ferro cemento es especialmente conveniente para la reparación de estructuras con superficies curvadas como los cilindros, tanques de agua circulares, reservorios, etc.
- c. Limitaciones. El uso del ferro cemento en una situación de reparación simplemente se utilizará en forma limitada por la misma naturaleza de la reparación.
- d. Normas. Actualmente no existen normas para el ferro cemento. Pero existiendo información adicional en los informes del comité ACI 549R y 549.1R.

7.2.2.2.5 CONCRETO REFORZADO CON FIBRA

El concreto reforzado con fibra es un concreto convencional con fibras metálicas o poliméricas o en algunos casos ambos. Estas fibras incrementan la resistencia a la contracción plástica y fisuración relacionada al servicio. La fibra reforzada es usada en muchas aplicaciones pero no se proyecta como refuerzo primario o inicial.

El concreto reforzado con fibra ha sido usado en los métodos de reparación en forma convencional como adición del shotcrete. La información acerca del concreto reforzado con fibra o shotcrete puede ser obtenida en los informes de los comités ACI 544.3R, ACI 544.4R y ACI 506.1R. Existe muy poca información disponible respecto a las características de desempeño de concreto reforzado con fibras para utilizarlo como un sistema de reparación.

- a. Ventajas. Las fibras se pueden aumentar durante la producción del concreto o colocado posteriormente. Estas fibras pueden ser usadas para proporcionar refuerzo dentro de las capas que no están adheridas al incluir las varillas de refuerzo.
- b. Aplicaciones. El concreto reforzado con fibras ha sido utilizado en capas para pavimentos de concreto, estabilización de taludes, y reforzamiento de estructuras como son las bóvedas o cúpulas. Las estructuras de concreto reforzado han sido reparadas con shotcrete reforzado con fibra. Pueden utilizarse en áreas sujetas a choques o cargas de vibración donde la fisuración por contracción plástica es un problema o donde la resistencia a la destrucción es requerida, puede ser beneficioso en este caso el aumento de las fibras de refuerzo.
- c. Limitaciones. El aumento de fibras reduce el slump y puede causar problemas de trabajabilidad para aquellos trabajadores inexpertos o personas que tienen poca experiencia. Tener cuidado si existe una mancha rojiza en la fibra, que puede ocurrir en la superficie de la fibra del concreto reforzado debido a la corrosión.
El utilizar fibras metálicas, puede influenciar la actividad de corrosión cuando los resanes se colocan alrededor del refuerzo que anteriormente ha sido dañado o afectado por la corrosión y no haberlo previsto anteriormente. Para otras aplicaciones puede tener un gran efecto puesto que está sujeto a la permeabilidad que puede ser alta respecto al sistema de concreto convencional de igual espesor. El curado y protección del concreto reforzado con fibra debe ser similar al concreto reforzado convencionalmente.
- d. Normas. La norma ASTM C 1116 se refiere a los temas de la proporción de los materiales, dosificación, entrega, y ensayos de concreto reforzado con fibra y shotcrete.

7.2.2.2.6 GROUTS O LECHADA

Los grouts describen varias categorías con cemento hidráulico o químicas.

- Grouts de cemento. Los grouts de cemento son mezclas del cemento hidráulico, agregados, y la adición de agua a la mezcla para se produzca un amasado, fluido y de consistencia bombeable sin la segregación de los constituyentes. En la mezcla frecuentemente se incluye la lechada para acelerar o retardar el tiempo de fraguado, reduciendo la contracción, mejorando el bombeado o trabajabilidad, o mejorando la durabilidad del grout. Los fillers minerales pueden ser usados a razón de economizar en cantidades sustanciales de grout que puedan ser requeridas.
 - a. Ventajas. Los grouts de cemento son económicos, de fácil disponibilidad, de fácil instalación, y compatible con el concreto. Las mezclas pueden ser usadas para modificar el grout de cemento al encontrar trabajos específicos que requieran un costo relativamente bajo. Las mezclas que disminuyen la contracción se encuentran disponibles en el mercado.
 - b. Limitaciones. Los grouts de cemento pueden ser usados para reparación por inyección sólo donde el ancho de la abertura sea lo suficientemente aceptable y la sea aceptable la suspensión de las partículas sólidas en el grout. Normalmente el ancho mínimo de la fisura como punto de introducción del grout debe ser cerca de 1/8 pulg. (3 mm).
 - c. Aplicaciones. Las aplicaciones típicas del grout con cemento hidráulico pueden ser variables de acuerdo a lo pastoso del grout para adherirse al concreto viejo con el concreto nuevo y tratar de sellar las fisuras inactivas, o el sellado de la fisura alrededor o debajo de la estructura de concreto. Los grouts de cemento sin contracción pueden ser usado para la reparación del descascarado o agujereado del concreto o pueden utilizarse para sostener pernos de anclaje en el concreto endurecido fisurado.

- d. Normas. El ASTM C 881 describe dos componentes de los sistemas de adherentes como son las resinas epóxicas para la aplicación del concreto de cemento portland, los cuales son capaces de curar bajo condiciones de humedad y adherirse a superficies húmedas.
- Grouts químicos. Los grouts químicos consisten básicamente en soluciones químicas que reaccionan para formar un gel o un sólido precipitado como es el caso opuesto al grout de cemento que consiste en la suspensión de partículas en un fluido. La reacción en la solución puede involucrar solo los que componen la solución con otras sustancias, como puede ser el agua, encontrado en el uso del grout. La reacción causa una disminución en la fluidez y en la tendencia a endurecerse pudiendo sellarse la fisura o el inyectado del grout.
- a. Ventajas. Las ventajas del grout químico incluyen su aplicabilidad en condiciones de medio ambientes húmedos, teniendo además un gran plazo del tiempo de fraguado del gel, y teniendo una baja viscosidad. Las fisuras reducidas en el concreto como 0.002 pulg. (0.05 mm) han sido selladas con un grout químico. Los grouts químicos como son los epóxicos exhiben una excelente adherencia, secado de las capas interiores, y en algunos casos se pegará en un concreto húmedo. Estos grouts pueden restaurar la resistencia total de un elemento de concreto fisurado. El gel o grout químico en espuma, como son los acrylamides y el poliuretano, se usa particularmente para el control de la fuga de agua debida a fisuras y juntas. Algunos grouts gel puede ser formulado de tal manera tratar de que forme una pequeña viscosidad, ser de alguna manera más fluidas y poder facilitar su inyección en las aberturas o fisuras.
- b. Limitaciones. Los grouts químicos son más expansivos que el grout de cemento. Es por eso que se necesita una gran habilidad para poder tener resultados satisfactorios con el uso de grouts químicos.
- Los agentes adhesivos químicos, como son los epóxicos, tienen una vida útil relativa baja o tiempo de actividad bajo temperaturas climáticas altas.
-

El grout de gel no debe ser usado para restaurar resistencias en elemento estructurales. Muchos de los gel o grouts de espuma son soluciones de agua exhiben contracciones si se permite un secado bajo condiciones de servicio.

- c. Aplicaciones. Se utilizan para reparaciones de fisuras finas, o para prevenir la pérdida de humedad a través de fisuras, también sirven para restaurar la integridad de un elemento estructural, el grout químico es uno de los más frecuentemente usados para las reparaciones del concreto.
Algunos grouts, como los epóxicos son frecuentemente usados como agentes de adherencia.
- d. Normas. La norma ASTM C 881 nos habla de 2 componentes, los sistemas de adherencia como son las resinas epóxicas para la aplicación con cemento portland, los cuales son capaces de curar bajo condiciones húmedas y el adherirse en superficies húmedas.

7.2.2.2.7 CONCRETO DENSO CON BAJO SLUMP (LSDC)

El concreto denso con bajo slump (LSDC) es una forma especial del concreto convencional. Este generalmente tiene un cambio moderado en la cantidad de cemento, siendo aceptable una relación agua-cemento menor que 0.40 con un slump trabajable de 2 pulg. (50 mm) o menos. El LSDC generalmente aumenta su resistencia rápidamente y muy distinto al resto de concreto debido a la alta densidad y permeabilidad reducida.

- a. Ventajas. Las capas de LSDC consideran un espesor mínimo de 1 ½ pulg. (38 mm) así pueden proporcionar una vida útil mayor a 20 años desde su instalación. El costo del LSDC es relativamente bajo, y puede ser colocado usando un equipo convencional con ligeras modificaciones. LSDC proporciona una permeabilidad reducida a los cloruros de acuerdo a la norma ASTM C 1212.
- b. Limitaciones. La consolidación máxima del LSDC requiere un gran empeño por alcanzar una densidad óptima, o el uso de gran cantidad de agua (HRWRA) para mejorar la trabajabilidad del concreto y reducir el esfuerzo de compactación necesitado para proporcionar una adherencia del refuerzo de acero y las capas de concreto que se encuentran debajo.

Este concreto con una relación baja de agua-cemento generalmente requiere de por lo menos 7 días de un curado húmedo para obtener una adecuada hidratación. El LSDC permite una corrosión galvánica incluso con una relación agua-cemento de 0.32 y un recubrimiento de 1 pulg. (25mm) (Pfeifer, Landgren, y Zoob, 1987) Las fisuras por contracción por secado, dependen de ancho de fisuras y su profundidad, pueden incrementar la introducción de cloruros que resulta de la corrosión del refuerzo de acero en las capas de la losa del concreto (Babei y Hawkins, 1987).

- c. Aplicaciones. El LSDC es frecuentemente usado en capas o se utiliza en reparaciones de superficies desgastadas y fisuradas, se debe obtener una alta calidad (aceptable), resistente a la abrasión, y crear superficie de concreto durable.

- d. Normas. Ninguna.

7.2.2.2.8 CONCRETO CON AGREGADO PRECOLOCADO

El concreto con agregado pre-colocado es producido por el colocado del agregado grueso e inyección de un grout de arena con cemento portland (usualmente adicionado en la mezcla), o material resinoso para el sellado de la fisura. El concreto con agregado pre-colocado difiere del concreto convencional en el contenido pues este requiere un alto porcentaje de agregado grueso. Una guía para el mezclado y la colocación del concreto con agregado pre-colocado se encuentra en el informe del comité ACI 304R y ACI 304.1R.

- a. Ventajas. Debido al contacto entre las partículas del agregado grueso, se da una contracción por secado mucho menor que el concreto convencional. Debido al agregado que es precolocado y bombeado con grout con una sobre presión, la segregación no es un problema y en casi todas las capas de la fisura se sellarán con el mortero. Estos factores hacen que el concreto con agregado pre-colocado sea un material ideal para aplicarlo en zonas donde exista un congestionamiento de refuerzo u otros recubrimientos, o cuando exista un acceso dificultoso.

La habilidad del grout al desplazarse en el agua y las partículas de agregado durante la inyección que se hace con este material, es particularmente apropiado para la reparación bajo el agua (ACI 304R y ACI 304.1R). En construcciones bajo el agua, la alta velocidad de colocación genera un bajo costo en la reparación que ha sido alcanzado con el concreto de agregado pre-colocado comparado con los métodos convencionales de colocación (ACI 304R y ACI 304.1R).

- b. Limitaciones. El costo de encofrado para concreto con agregado precolocado es aproximadamente similar que el concreto convencional, sin embargo, se puede requerir un trabajo adicional en la instalación del encofrado debido a la necesidad de prevenir filtraciones. Debido al volumen de agua relativamente alto requieren de morteros cementosos bombeables, la permeabilidad debido al gas o vapor de una parte del mortero del concreto con agregado pre-colocado puede ser un poco mayor que el del concreto normal o convencional, el cual es un factor importante para considerar donde puede ser usado bajo medioambiente extremos. La inclusión de micro sílice reducir esta limitación, pero existe muy poca experiencia o documentación respecto a este caso. La construcción con concreto de agregado precolocado es especializada, además este material puede estar orientado en reparaciones que puede ser conducido o dirigido por un personal experimentado para este método constructivo.

- c. Aplicaciones. Es típico que el concreto con agregado pre-colocado es usado en proyectos de grandes reparaciones particularmente donde se necesite la colocación del concreto bajo el agua o cuando la colocación del concreto convencional pueda ser dificultosa. Estas aplicaciones son típicas en reparaciones de estructuras bajo el agua como es el caso de estanques, presas, puentes, estribos de puentes y cimentaciones. El concreto con agregado pre-colocado ha sido también usado en la reparación de vigas y columnas en plantas industriales, tanques de agua y otros elementos similares, como bien es el caso de reparaciones de cimentaciones de estructuras existentes.

- d. Normas. La norma ASTM C 937 describe muy bien el procedimiento para usar el grout en concretos con agregado pre-colocado. La norma ASTM C 938 describe los procedimientos del laboratorio para la selección de las proporciones en las mezclas del grout que se requieren en la producción del concreto con agregado pre-colocado.

7.2.2.2.9 CEMENTOS DE FRAGUADO RÁPIDO

Los materiales de cementos de fraguado rápido se caracterizan por tener poco tiempo de colocación. Algunas pueden exhibir o desarrollar resistencias iniciales con resistencias a la compresión que exceden los 1,000 psi. (6.9 MPa) dentro de las 3 horas. El cemento portland tipo III con acelerantes ha sido usado para el resanado de concreto a largo plazo y ha sido más ampliamente usada en la mayoría de los casos donde existan secciones de gran espesor (Transportation Research Board, 1977).

- a. Ventajas. El cemento de fraguado rápido proporciona un desarrollo de la resistencia acelerada, pues esta reparación permite que la edificación entre en servicio más rápidamente que en el caso de repararla con los materiales convencionales. Esta ventaja es muestra importante en las reparaciones de carreteras y puentes debido al tiempo reducido de protección, al bajo costo del control de tráfico, y de gran seguridad.
- b. Limitaciones. A pesar de los materiales de fraguado rápido será un concreto durable, algunas veces, debido a estos componentes, no pueden ser efectivos en medios ambientes específicos o en situaciones de servicio especiales. Algunos materiales de fraguado rápido obtienen desarrollos de la resistencia e incremento de la formación de la etringita. Si el nivel de expansión es alto y el tiempo para la obtención es máximo, la expansión es considerable, en este caso pueda ocurrir una disminución de la resistencia. El potencial de expansión resulta de la insuficiencia inicial del curado que sigue por el re-humedecimiento que debe ser reconocido.

Puede que algunos de estos materiales pueden contener algunos niveles muy altos, por cierto anormales de álcalis o aluminatos estos proporcionan una expansión relativa, se debe tener cuidado con exposiciones a sulfatos y agregados reactivos.

- c. Aplicaciones. Los cementos de fraguado rápido son especialmente útiles en situaciones de reparación rápida y donde exista retorno del tráfico, como es en la reparación de pavimentos, losas de puentes, y pistas de aterrizaje.

- d. Normas. La norma ASTM C 928 cubre lo concerniente, al secado, mortero cementoso o materiales de concreto de fraguado rápido para pavimentos de concretos con cementos hidráulicos y estructuras endurecidas. La norma ASTM C 928 no proporciona resistencia a la adherencia o requerimientos de durabilidad en el ciclo de congelación y deshielo. Sin embargo, se debe tener cuidado antes de utilizarlas bajo ciertas condiciones de exposición (exposición a sulfatos y la reactividad con álcalis) en este sentido la norma no cubre las especificaciones. Por lo tanto, se debe realizar ensayos adicionales y anticiparse a las temperaturas de aplicación para verificar si las propiedades cubiertas en las especificaciones son importantes para el proyecto. Los adelantos sustanciales en la elaboración de cementos de fraguado rápido han tenido lugar en años recientes. Como los materiales son ahora sin esfuerzo disponible para la dosificación y mezclado en grandes cantidades usando equipos estándares que incluyen camiones de mezclado de concreto.

7.2.2.2.10 SHOTCRETE

El shotcrete es una mezcla de cemento portland, incluyendo arena y agua "shot" significa lanzado en el sitio por aire comprimido. Adicionalmente a estos materiales el shotcrete puede también contener agregado grueso, fibras, y otras mezclas. La apropiada aplicación del shotcrete es un indicativo de una adecuada estructuración y material de reparación durable el cual es capaz de tener una excelente adherencia con el concreto existente o con otros materiales de construcción.

- a. **Ventajas.** Es útil en proyectos de reparación donde las secciones sean menores de 6 pulg. (150mm) de espesor y áreas superficiales pequeñas o grandes con contornos o formas irregulares, el shotcrete puede ser más económico que el concreto convencional debido a la reducción de los costos de encofrado.
El shotcrete puede ser aplicado normalmente pues tiene materiales que pueden ser mezclados y transportados exigentemente a lo largo de 100 pies con la debida ubicación del operador de la manguera en el lugar de llenado con el debido acceso restringido. El equipo mecánico debe estar en buenas condiciones para la colocación de shotcrete a distancia.

- b. **Limitaciones.** La aplicación sucesiva del shotcrete depende del entrenamiento, habilidad y experiencia del operador de la manguera. Para el operador de la manguera debe exigirse una demostración de su habilidad para el colocado por medio de un panel de ensayo que refleja las condiciones del lugar. Su desempeño debe ser evaluado y aprobado antes de que se le permita en el trabajo.
El polvo y el rebote exigen una especial atención en la aplicación de este método.

- c. **Aplicaciones.** El shotcrete debe usarse para reparar concretos dañados en puentes, edificios, túneles, presas y otras estructuras. La performance para la reparación por shotcrete debe ser generalmente buena. Sin embargo, en algunos casos puede existir un desempeño deficiente. Las mayores causas de una desempeño deficiente son la inadecuada preparación de la superficie existente y de la poca destreza. La reparación satisfactoria del shotcrete tiene que ver mucho con el tratamiento de la propia superficie y de la superficie existente para el cual el shotcrete debe ser aplicado posteriormente.

Normas. El ACI 506.2 proporciona especificaciones para la construcción con shotcrete.

El ASTM C 1116 trata de la proporción de los materiales, dosificación, entrega, y ensayos de concreto reforzado con fibra y shotcrete.

7.2.2.2.11 CONCRETO CON CONTRACCIÓN COMPENSADA

El concreto con contracción compensada es un concreto con un cemento expansivo el cual es usado para minimizar la fisuración debido a la contracción por secado. Los materiales básicos y métodos son similares a los necesarios para producir un concreto con cemento portland de alta calidad. Consecuentemente, las características del concreto con contracción compensada son en muchos casos, similares a la del concreto con cemento portland.

- a. **Ventajas.** Cuando la restricción es debido al refuerzo, el concreto con contracción compensada se expandirá con un aumento igual o ligeramente mayor que la contracción por secado anticipado. La subsiguiente contracción por secado se reducirá por esta deformación expansiva pero, de igual manera permanecerá una expansión residual en el concreto, de este modo se elimina la fisuración con contracción. Las juntas usadas para el control de fisuración por contracción pueden ser eliminadas tomando las normales provisiones, en los tapajuntas y en los mecanismos de transferencias de cargas, la eliminación de los tapajuntas no es recomendable.

- b. **Limitaciones.** A pesar de estas características son más similares al del concreto con cementos portland, los materiales, la selección de las proporciones, vaciado, y curado pueden contener suficiente expansión que el obtenido al compensarse debido a la contracción por secado. El criterio y prácticas necesarias para garantizar que ocurra una expansión en el tiempo y el aumento que demanda se desarrollan ampliamente en el informe del comité ACI 223.

Las provisiones deben ser hechas para permitir una expansión inicial del material para proporcionar una deformación positiva en la restricción del acero interior. Consecuentemente el concreto con contracción compensada no será efectivo en la unión de las capas del concreto con cemento portland debido a las capas inferiores que proporcionará demasiada la restricción externa.

- c. Aplicaciones. El concreto con contracción compensada ha sido usado para minimizar la fisuración causada por la contracción por secado en la reposición de losas de concreto, pavimentos, losas de puentes y otras estructuras. También, el concreto con contracción compensada ha sido usado para reducir las tendencias a deformación donde el concreto se ve expuesto sobre todo cuando se distingue el secado superficial y la contracción por carbonatación.

- d. Norma. La norma ASTM C 845 proporciona estándares para cementos hidráulicos expansivos e incluye los límites de resistencia, tiempo de fraguado y la expansión del cemento. La expansión del mortero y el concreto se determina usualmente de acuerdo con las normas ASTM C 806 y C 8878 respectivamente.

7.2.2.2.12 CONCRETO CON MICROSÍLICE

La micro sílice, es un producto que resulta de la fabricación de siliconas y la mezcla de ferro-siliconas, es un eficiente material puzolánico. Consiste en la adición de micro sílice con una gran disminución de agua en la mezcla y esta mezcla de concreto tendrá un incremento en la resistencia a la compresión, disminuyendo la permeabilidad, y de esta manera mejorará la durabilidad (ACI 234R). El micro sílice es adicionado al concreto en cualquiera de sus presentaciones en líquido o en polvo en cantidades de 5 al 15% por peso de cemento. La resistencia a la compresión será de 12,000 a 15,000 psi. (83 a 103 MPa) con la utilización de concretos con micro sílice.

- a. Ventajas. El interés inicial comercial en el micro sílice fue por los concretos de altas resistencia; sin embargo, este es adicionado al concreto actual en algunos casos este material reemplaza al cemento, las propiedades de este material hacen mejorar la calidad y el desempeño de la amplia gama de las aplicaciones.
Los concretos con micro sílice no requieren de cambios significativos en la transportación, vaciado o colocación, y las prácticas de compactación son asociadas con el concreto convencional.

- b. Limitaciones. Es típico, que se incremente en algunos casos la dosis de micro sílice, y esto hará que el concreto se más cohesivo, y de esta manera será más susceptible a la fisuración por contracción plástica. Sin embargo, la colocación y equipo de acabado han sido capaz de superar estas diferencias sin tener algunas dificultades significativas (Holanda, 1987). El concreto con micro sílice tiene una mínima o ninguna exudación de agua, el cual hace dificultoso el proporcionarle un acabado con un badilejo de acero, en el caso que sea necesario. La temperatura mínima para curado debe ser de 40°F (4°C). Así mismo, el curado húmedo se recomienda como mínimo durante 7 días.
- c. Aplicaciones. Las primeras y grandes aplicaciones del concreto con micro sílices en los Estados Unidos fueron para la reparación de estructuras hidráulicas sujetas a daños por abrasión-erosión (Holanda y Gutschow, 1987). La alta resistencia del concreto con micro sílice y la resistencia que resulta de la abrasión-erosión pueden ser una gran solución económica para problemas de erosión-abrasión, particularmente en algunas áreas donde el agregado no se encuentre disponible localmente no podría hacerse de otra manera con un concreto convencional. El concreto con vapores micro sílice ha sido usado ampliamente en las capas de estructuras de parqueo y losas de puentes para reducir el ingreso de cloruros dentro del concreto.
- d. Normas. La norma ASTM C 1240 recientemente ha realizado una publicación que cubre los temas de micro sílice.

7.2.2.2.13 MATERIALES ADHESIVOS

Los materiales adhesivos pueden ser usados para adherir los nuevos materiales de reparación o preparar una capa inferior de concreto existente. Los materiales adhesivos son de tres tipos: los basados en epóxicos, basados en látex y basados en cemento.

- a. Epóxicos. Los sistemas epóxicos son vistos en la norma ASTM C 881. Debe ser tomado con precaución cuando se utilicen estos materiales en climas cálidos.

Las altas temperaturas pueden causar un curado prematuro y la creación de una rotura de adherencia. Muchos materiales adhesivos de resinas epóxicas son creados bajo una barrera entre la capa inferior y el material de reparación. En ciertas condiciones esta barrera de humedad podría resultar deficiente para la reparación, donde la humedad se captura en el concreto directamente detrás de la barrera de humedad y posiblemente en el caso de congelamiento que ocurre en esta zona.

- b. **Látex.** Los sistemas de látex se refieren en la norma ASTM C 1059. Los agentes adhesivos del látex son clasificados como tipo I-redispersible y tipo II – no redispersible. Los agentes adhesivos (tipo I) pueden ser aplicados para adherir superficies que se encuentran bajo exposiciones críticas antes de colocar los materiales de reparación; sin embargo, la resistencia de adherencia es menor que la proporcionada por los agentes adhesivos de tipo II. Los agentes adhesivos tipo I no deben ser usados en áreas expuestas al agua, alta humedad, o aplicaciones estructurales. Los sistemas tipo II actúan como rompedores de adherencias una vez que se tiene un sobre revestimiento o un curado excesivo.

- c. **Cemento.** Los sistemas basados en cementos han sido usados por muchos años tiene como elemento principal al cemento portland puro o una combinación de cemento portland, agregados finos y fillers generalmente en proporciones de 1 a 1 por peso. El agua se adiciona en proporción a su uniformidad o de consistencia cremosa.

7.2.2.3 MATERIALES POLÍMEROS

Existe documentación del mejoramiento de las propiedades del concreto endurecido por medio de la adición de polímeros. Existen varias bibliografías y buenas referencias con respecto a los polímeros en el concreto y está incluido en el informe del comité ACI 548.1R. Este trabajo presenta información respecto a varios tipos de materiales polímeros, su almacenaje, manipulación y uso, así como las formulaciones en el concreto, equipo necesario, procedimientos de obra y aplicaciones.

Existen tres tipos básicos de materiales de concreto utilizando polímeros: concretos impregnados con polímeros (PIC), concreto modificado con polímeros (PMC) y concreto polímero (PC). Pero el más utilizado es el concreto con polímeros como lo veremos seguidamente

7.2.2.3.1 CONCRETO CON POLÍMEROS (PC)

El PC es un material compuesto en el cual el agregado es al mismo tiempo limitado en una matriz densa con un aglomerante que viene a ser el polímero. El compuesto no contiene cemento hidratado, a pesar de que puede ser usado el cemento portland como un agregado o un filler. El termino PC nunca debe pensarse como un producto simple, pero sí más bien como una familia de productos. El uso del PC en esta sección incluye también como mortero. El PC ha sido hecho con una variedad de resinas y monómeros incluyendo el poliéster, epóxicos, furan, vinilo, metacrilato de metil (MMA), y estireno (ACI 548.1R). Las resinas de poliéster son atractivas debido a su costo moderado, disponibilidad de una gran variedad de formulaciones, y el PC contienen propiedades moderadamente buenas. Las resinas de furan son de bajo costo, y de alta resistencia a los ataques químicos. Las resinas epóxicas son generalmente de costos muy elevados, pero pueden ofrecer ventajas como son la adhesión en superficies húmedas. Para mayores detalles respecto al uso de los epóxicos como componente del concreto se encuentra disponible en el ACI 503R. Las propiedades del PC son altamente dependientes del aumento del polímero usado, modificándose por el efecto de los agregados y los materiales filler. El PC en la mezcla exhibe varias ventajas:

- Curado rápido.
- Elevada tracción, flexión y resistencia a la compresión.
- Buena adherencia en la mayoría de las superficies.
- Buena durabilidad bajo los ciclos de congelación y deshielo.
- Buena impermeabilidad con respecto a soluciones agresivas disueltas en agua.
- Buena resistencia química.

- a. Ventajas. El PC puede proporcionar un curado rápido, alta resistencia del material de sellado que es apropiado para la reparación de estructuras de concreto con cemento portland. El PC es mezclado, colocado y compactado de la misma manera que el concreto convencional. En casos de que se dé una mezcla porosa debe solucionarse con un vibrado externo.

Una gran variedad de morteros de polímeros pre-compactados están disponibles para ser usados como morteros o adicionados para una mezcla de agregados seleccionados. Dependiendo del uso específico, los morteros pueden contener graduaciones variables de agregados para impartir propiedades únicas de la superficie o efectos estéticos para la estructura que va a ser reparada. También, los morteros de polímero son disponibles alisados y específicamente proponer sus aplicaciones en forma vertical y superior.

- b. Limitaciones. Los solventes orgánicos pueden utilizarse para limpiezas de equipos cuando se utilicen poliéster y epóxicos. Los sistemas volátiles como son el MMA se evaporan rápidamente y al limpiar no presentan problemas. Sin embargo, tales sistemas son potencialmente explosivos y se exige el tener cuidado con las chispas que pueden generarse además de realizar ensayos o pruebas de explosión.

Este debe ser reconocido por su curado rápido generalmente el menos tiempo para la colocación y operaciones de acabado. El tiempo de elaboración de estos materiales es variable y depende de la temperatura ambiente, este tiempo puede darse en menos de 15 minutos o más de una hora. Asimismo, las temperaturas altas y bajas del ambiente y las temperaturas del concreto pueden afectar significativamente el tiempo de curado y al desempeño del polímero.

Los coeficientes de expansión térmica del material polímero son variables de uno a otro producto y estos son significativamente altos que el concreto convencional. Las características de la contracción del PC pueden ser evaluadas estrechamente para evitar innecesariamente la fisuración por contracción. El módulo de elasticidad del PC puede ser significativamente bajo que el concreto convencional, especialmente a altas temperaturas. Debe tenerse cuidado en el uso de elementos de transporte cargas.

Las altas temperaturas pueden adversamente afectar las propiedades físicas del PC, causando el debilitamiento. Las temperaturas de servicio deben ser evaluadas antes de seleccionar los sistemas de PC a usarse. Los sistemas epóxicos pueden quemarse bajo temperaturas que exceden los 450°F (230°C) y pueden debilitarse significativamente a temperaturas bajas. Los usuarios deben tener presente que el PC tiene poca resistencia al fuego.

- c. Aplicaciones. Muchos materiales de resanado de PC son inicialmente diseñados para la reparación de estructuras de carreteras donde las condiciones de tráfico permitan la culminación del área de reparación por sólo algunas horas. Sin embargo, el PC no tiene un uso limitado y pueden ser formulados para una gran variedad de aplicaciones. El PC es usado en casos severos y se aplican en; 1) curado rápido, resanado en estructuras con gran resistencia y 2) se aplican en capas finas (3/16 a 3/4pulg.) (5 a 19 mm) para pisos y losas de puentes. Los morteros de polímeros han sido usados en una gran variedad de reparaciones de secciones esbeltas (resanado en capas). Los polímeros con alta elongación y bajo módulo de elasticidad son particularmente excelentes para las capas de puentes. Las capas de PC son especialmente buenas para usarlas en áreas donde el concreto está sujeto a ataques químicos.

- d. Normas. En el informe del comité ACI 503.4 muestra especificaciones para la reparación de concreto endurecido con cemento portland defectuoso con la utilización de morteros para el sellado con arena usando un aglomerante adhesivo como se encuentra definido en la norma del ASTM C 881. Esto incluye los requerimientos para el etiquetado de los adhesivos, almacenaje, manipulación, mezclado y aplicación, evaluación y preparación de las superficies, además de la inspección y control de calidad. La norma ASTM C 881 nos habla de 2 componentes, los sistemas de adherencia como son las resinas epóxicas para la aplicación con cemento portland, los cuales son capaces de curar bajo condiciones húmedas y el adherirse en superficies húmedas.

7.2.3 SISTEMAS DE PROTECCIÓN

7.2.3.1 TRATAMIENTO DE LAS SUPERFICIES

El tratamiento de las superficies para la reparación del concreto tiene el propósito de agruparlo dentro una clasificación general: sellado por penetración, sellado superficial, recubrimiento, membranas, y cubiertas.

7.2.3.1.1 USOS

El tratamiento de superficies incluye aplicaciones en elementos horizontales como verticales. Estas técnicas y materiales seleccionados pueden ser consistentes con la intención de uso. El objetivo es limitar la corrosión por el establecimiento de condiciones que reducen el agua libre en el concreto aun cuando se previene de la humedad o el ingreso de cloruros.

A pesar de que algunos resultados varían, los tratamientos de superficies han sido efectivos en los ensayos de laboratorio para el estudio de la corrosión retardada del refuerzo, en algunos casos se ha tenido varias aplicaciones con buenos resultados. Además la calidad de los materiales y la habilidad son esenciales en este estudio de la protección de las superficies del concreto.

7.2.3.1.2 PRECAUCIONES

Para asegurar una compatibilidad entre la propuesta de tratamiento, los materiales de reparación y las capas interiores del concreto existente. Se evita el encapsulamiento durante la aplicación del tratamiento de la superficie. Además se deben seguir las limitaciones y recomendaciones del fabricante del material de reparación.

7.2.3.1.3 PROPIEDADES

Las propiedades del tratamiento de las superficies, selección y la discusión se encuentran resumidos en la tabla 7.1. El tratamiento de superficies son generalmente clasificados para facilitar este trabajo, pero el listado del sumario y las características son basadas en algunos datos limitados de los ensayos de laboratorio y el campo de desempeño de formulaciones específicas de las propiedades del producto. Un producto específico debe ser seleccionado de acuerdo a su desempeño, su record y sus resultados de las normas o ensayos comparativos. Los estudios que se hagan deben ser medidos de acuerdo a su performance con respecto a la absorción de agua, durabilidad bajo climas extremos, resistencia a la corrosión del refuerzo, etc.

La clasificación del tratamiento de superficies es discutida y comúnmente usada en la reparación del concreto y en particular en la corrosión del refuerzo. En muchos casos no es posible su clasificación y su aplicación. Además existen muchos tipos de sistemas que pueden ser apropiadamente usados como complemento de la reparación del concreto. El costo del tratamiento de superficies varía enormemente, pues depende muchas veces del tipo de superficie. Puede obtenerse un costo adecuado, pero solo puede ser obtenido por el fabricante y el instalador para un proyecto en particular.

7.2.3.1.4 CONDICIONES DE INSTALACIÓN

En muchos casos el tratamiento de las superficies puede ser aplicado para limpiar, secar, y tratar de brindar al estrato o capa interior un estado saludable, bajo condiciones de temperatura y de humedad, además de darle una ventilación del espacio; como podría darse el caso de superficies lisas que requieren de cierta protección. Debido a estas condiciones predomina siempre, la dificultad y el costo para alcanzar las apropiadas condiciones de instalación que pueden influenciar en la selección de un sistema. Antes de la aplicación de varios tratamientos de superficies, la reparación de todo concreto puede ser completada y debe permitir el curado como mínimo durante 28 días. Es importante considerar la preparación de la superficie, puesto que depende muchas veces del método y el tipo de sistema protección.

Existen técnicas donde incluyen el fresado o escarificado, cepillado o molido, desgastado, arenado, limpieza con flama, aplicación de ácidos. Cady, Weyers y Wilson (1984) y Gaul (1984) discutieron acerca de las situaciones de la preparación de superficie y los métodos. Los restos de polvo resultan de la preparación de la superficie que debe ser removida antes de aplicar el tratamiento de la superficie.

7.2.3.1.5 CARACTERÍSTICAS DEL DESEMPEÑO

- a. Permeabilidad del agua. La resistencia de absorción del agua es factor crítico en el sistema de protección. La permeabilidad al agua es una medida de la cantidad de agua que puede pasar debido al tratamiento de la superficie sobre un periodo de tiempo.
- b. Permeabilidad al vapor. Pueda que el tratamiento de superficies pueda resistir al agua, pero estos deben permitir que el concreto se seque afuera, particularmente si se coloca sobre un concreto nuevo o reparado o dentro de las caras de calzaduras o en losas inclinadas. La transmisión del vapor por humedad depende de la cantidad de vapor de agua que puede pasar a debido al tratamiento de la superficie sobre un periodo de tiempo.
- c. Resistencia a la corrosión del refuerzo. Las características de la permeabilidad del agua y vapor que se describieron anteriormente son unas medidas indirectas de la resistencia del concreto a la corrosión del acero. La penetración química de soluciones salinas a través del concreto es probablemente la causa de la corrosión localizada en el acero de refuerzo. Una razón inicial para proporcionarle un tratamiento superficial que incrementa la resistencia a la corrosión del refuerzo al proporcionarle un ambiente menos corrosivo.

Existen diferentes estudios de sistemas de protección para resistir la corrosión como los hechos por Pfeifer y Scali (1981) y Pfeifer, Landgren, Zoob (1987).

d. Crack bridging – La penetración de la humedad a través de las fisuras pueden reducir el propósito del tratamiento de la superficie debido a la corrosión localizada en el refuerzo. La penetración y sellado no tiene mucho significado en la capilaridad de crack bridging, a pesar de la naturaleza hidrofóbica de la resina que puede prevenir el ingreso de humedad dentro de las fisuras reducidas. Los sistemas de membranas elastoméricas generalmente tienen un suficiente espesor y flexibilidad para conectar fisuras incluso si el ancho de las fisuras pueden variar. Las fisuras se podrían extender desde 10 a 15 mils. (0.25 a 0.375 mm) que deben ser perfiladas y selladas antes de la aplicación de la membrana. El ingreso y sellado de la superficie pueden ser usado con éxito junto con el perfilado y sellado o reparación de otras fisuras. Otras secciones de estas guías discuten las técnicas de reparaciones de las fisuras. Los datos de los estudios fueron conducidos inicialmente en muestras no fisuradas los cuales fueron cubiertos antes de exposiciones simuladas en climas del norte y en el sur de Los Estados Unidos.

e. Resistencia al desgaste. Los penetrantes no afectan a la resistencia al desgaste (una medida de las características de fricción) de la superficie del concreto. Debido a los penetrantes ubicados en la superficie o debajo, están sujetas al desgaste de igual extensión que la superficie del concreto. El sellado de la superficie y high build coatings pueden hacer que la superficie sea más resistente al desgaste, considerando los sistemas de membranas y capas que tienen un potencial de hacer más resistente al desgaste. Ver tabla 7.1.

Apariencia. Exceptuando los penetrantes, los mayores tratamientos de superficies modifican la apariencia del concreto. Estos pueden tener una cierta ventaja debido al contraste entre el concreto original y las reparaciones que pueden ser ocultas. El sellado de la mayoría de superficies es transparente, el cual resulta en una apariencia húmeda o apariencia brillante, a pesar de algunas que pueden ser pigmentadas. Los recubrimientos de high build están disponibles en una gran variedad de colores. Las membranas y la membrana de cobertura son usualmente de color gris o negro, pero algunos fabricantes ofrecen otros colores (los cuales pueden tener una tendencia decolorarse). La superficie porosa de una membrana de cobertura es difícil para mantenerla limpia.

TABLA 7.1 – Sumario de los tratamientos de superficies.

Tipos	Clasificación genérica	Condiciones de instalación	Características de durabilidad	Características del desempeño
Selladores	Aceite de linaza cocida Rociado aprox. 50°F (10°C) o superior	Limpiar, secar y superficie sana Resistencia pobre a la radiación ultravioleta (UV)	Mejorar la durabilidad para los ciclos de congelación-deshielo Se requiere aplicaciones frecuentes	Oscurece un poco el concreto No utilizarlos para fisuras en puentes
	Alkyl-alkoxy-silane Siloxanes	Superficie libre de un pre-tratamiento con rociado, cepillado, laminado o pasado con una escoba de goma	Mejorar la durabilidad para los ciclos de congelación-deshielo Reduce la penetración de sal Reduce el grado de corrosión	Mejora la resistencia a la absorción de agua y la corrosión del refuerzo No utilizarlos para fisuras en puentes

	Metacrilato con alto peso molecular	Limpieza, secado, y mantener superficie sana Rociado, cepillado, laminado o pasado con una escoba de goma	Resistencia variable de la radiación ultravioleta (UV) Evita la humedad debido a la penetración por la fisura	Sellado de fisuras
Recubrimientos	Epóxico Uretano o membrana de neopreno/sistema de cubierta de epóxico Sistema de cobertor impregnado con asfalto Uretano Membrana/sistema de cobertor de uretano	Limpieza, secado, y mantener superficie sana Rociado, cepillado, laminado o pasado con una escoba de goma Aprox.50°F (10°C) o superior Se requiere de ventilación Se requiere típicamente un nivel superficial	Generalmente mejora la durabilidad para los ciclos de congelación-deshielo Fair para una buena resistencia a la abrasión Resistencia variable de la radiación ultravioleta (UV)	Generalmente buena resistencia a la absorción de agua Desconocida resistencia a la corrosión del refuerzo Bridges small cracks

Capas superpuestas	Concreto		Limpieza, exploración, superficie rugosa	Mejorar la durabilidad para los ciclos de congelación-deshielo	Se puede adicionar por peso
	Concreto con polímero	con			Desconocida
	Concreto modificado con polímero	con	Aplicación manual o con maquina	Excelente resistencia a la abrasión	resistencia a la corrosión del refuerzo
			Generalmente cerca del congelado		Puede mejorar la capacidad estructural
			La ventilación puede ser requerida		

7.2.3.2 SELLADO DE JUNTAS

La función del sellado de las juntas en el concreto es la de minimizar el ingreso de líquidos, sólidos o gases, y el de proteger al concreto de algún tipo de daño. Ciertas aplicaciones tienen funciones secundarias como son el mejoramiento térmico y aislamiento acústico, humedecimiento bajo vibraciones, o prevenir el ingreso indeseable materias no deseada que se depositan en las hendiduras o fisuras (ACI 504R).

En los sistemas de protección de juntas se incluye el sellado de fisuras, juntas de contracción (control), juntas de expansión o dilatación, y juntas de construcción. Los tipos de juntas están discutidos a continuación.

7.2.3.2.1 TIPOS DE JUNTAS

- a. Fisuras. Las razones por la que ocurren las fisuraciones en el concreto, son debidas mayormente a la contracción, cambios térmicos, esfuerzos relacionados con problemas estructurales o disminución de la resistencia del concreto a largo plazo, etc.

Antes de seleccionar un sellado, se debe determinar la razón por la que se fisura el concreto. En algunos casos puede ser requerido una adherencia estructural en las fisuras, considerando otras situaciones, se puede evitar la fisuración que es causada por la restricción.

- b. Juntas de aislamiento – Las juntas de aislamiento deben usarse donde se requiera libertad completa entre el piso y los elementos contiguos del edificio, las junta de aislamiento deben usarse en las uniones con los muros (que no se requieran restricción lateral de la losa), columnas, bases de equipos, zapatas, u otros puntos de restricción como desagües, bocas de inspección, sumideros y escaleras.

Las juntas de aislamiento se forman insertando un rellenedor premoldeado de juntas entre el piso y elemento adyacente. El material de las juntas debe extenderse en toda la profundidad de la losa y no debe sobresalir encima de ella.

Donde el relleno de la junta esté inaceptablemente visible, o donde haya condiciones de humedad, o requisitos de higiene o control de polvo, se puede remover la parte superior del relleno premoldeado, calafateando la junta con un sello elastomérico. A continuación se indican dos métodos para producir una profundidad relativamente uniforme del sello de la junta:

1. Marque con una sierra ambas caras del relleno premoldeado a la profundidad a ser removido. Inserte el relleno marcado en la ubicación apropiada y quite la sección de la superficie después que el concreto haya endurecido usando un destornillador o una herramienta similar.
2. Corte una tira de madera de igual profundidad a la deseada para el sello de la junta. Clave La tira de madera al relleno premoldeado e instale el conjunto en la ubicación apropiada. Quite la tira de madera después de que el concreto haya endurecido.

Alternativamente se puede usar un rellenedor de junta premoldeado con su parte superior removible. Ver las Figuras 7.1a y 7.1.b para las juntas de aislamiento típicas alrededor de las columnas.

Las juntas de aislamiento para losas con concreto compensador de la contracción se deben tratarse como se recomienda en el ACI 223.

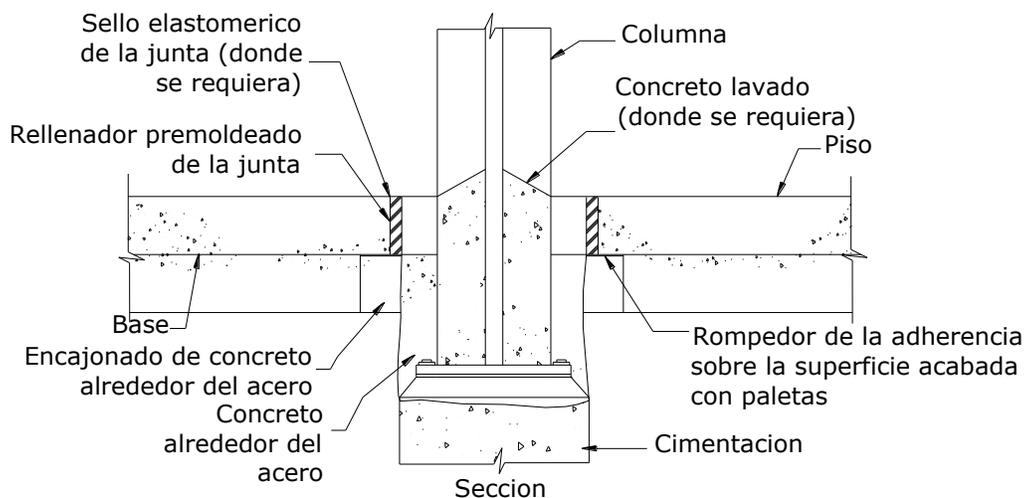


Figura 7.1.a - Juntas de aislamiento en columnas (vista de corte)

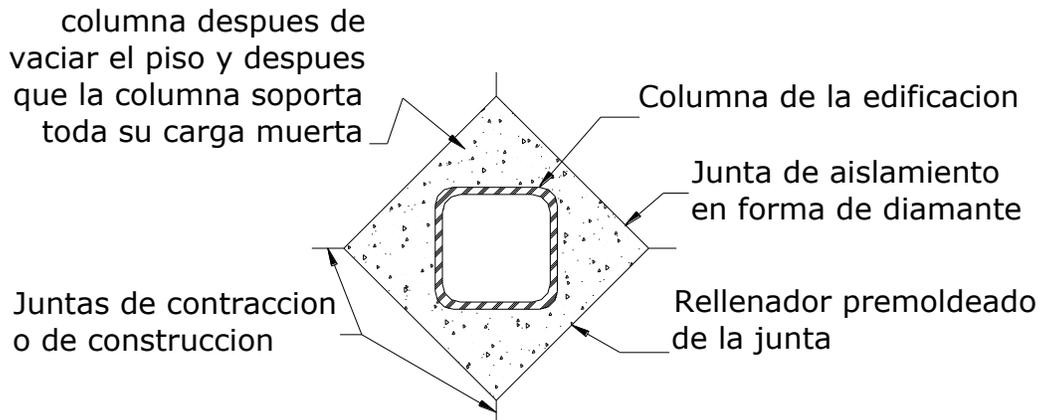


Figura 7.1.b - Junta de aislamiento en columnas (vista de planta) de la junta

- c. Juntas de construcción – Las juntas de construcción se colocan en una losa para definir la extensión de los vaciados individuales, generalmente en conformidad con una distribución predefinida de juntas.

Si el vaciado se va interrumpir un tiempo suficiente como para que se endurezca el concreto vaciado o vertido, se debe usar juntas de construcción. Si es posible, se deben localizar las juntas de construcción a 1.5 m ó más de cualquier otra junta a la que ellas son paralelas.

En áreas no sujetas a tráfico, una junta a tope es normalmente adecuada. En áreas sujetas a tráfico de ruedas duras y carga pesada, o ambas, se recomienda juntas con dowels (Fig.7.2). Una junta con llave se puede usar en áreas en las que se requiere alguna transferencia de carga.

Una junta con llave no proporcionará la misma transferencia de carga que una junta apropiadamente construida con dowels, debido a que el "macho" y la "hembra" de la junta con llave pierden contacto cuando la junta se abre debido a la retracción por fraguado.

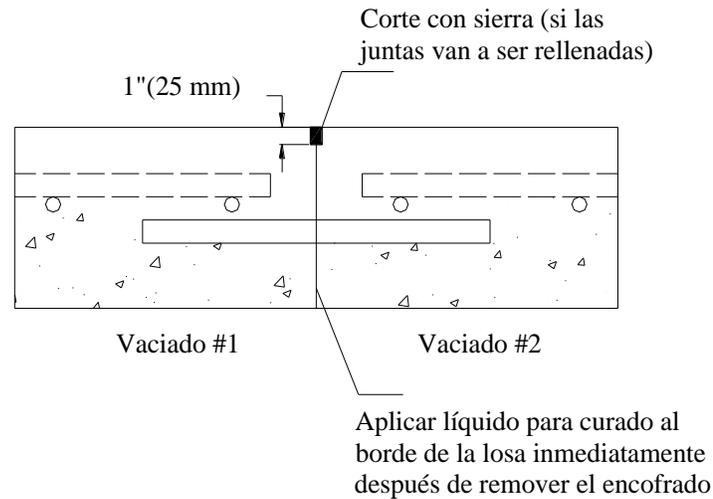


Figura 7.2 - Juntas de construcción con dowel

- d. Juntas de contracción – Las juntas de contracción se localizan normalmente en las líneas de columna, con juntas intermedias localizadas a espacios iguales entre líneas de columna, como se muestra en la Fig.7.3.

Los siguientes son los factores que se consideran normalmente al seleccionar el espaciamiento de las juntas de contracción:

- Método de diseño de la losa (ver ACI 306R).
- Espesor de losa.
- Tipo, cantidad, y posición del refuerzo.
- Potencial de contracción del concreto (tipo y cantidad del cemento; tamaño, cantidad y calidad del agregado; relación agua/material cementante; tipo de aditivos; y temperatura del concreto).
- Fricción en la base.
- Restricciones a la losa del piso.
- Esquema de cimentación, racks, pozos, base de equipos, trincheras, y otras discontinuidades similares del piso.
- Factores medioambientales como temperatura, viento, y humedad.
- Métodos y calidad de curado del concreto.

En el caso de losas planas de concreto, no reforzadas, el espaciamiento debe ser de 24 a 36 veces el espesor de la losa, con un máximo de 5.5 m entre juntas generalmente ha producido resultados aceptables. Se debe esperar algún agrietamiento al azar; un nivel razonable de fisuración podría ser de 0 a 3% del panel de losa de piso, formado por el aserrado de las juntas, durante el proceso de construcción o una combinación de ambos.

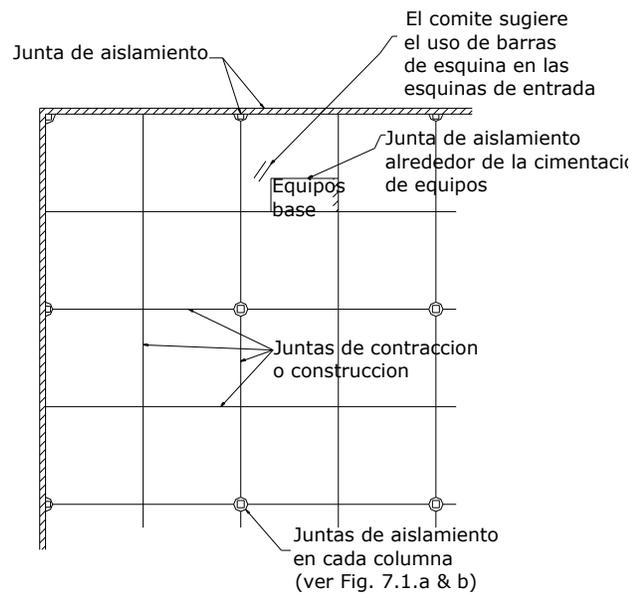


Figura 7.3 - Ubicación de juntas

En losas nominalmente reforzadas con cuantías de 0.2% de acero o menos, ubicado dentro de las 2 pulg. (50 mm) de la superficie de la losa, se puede aumentar un poco el espaciamiento de las juntas pero la incidencia de la fisuración y del alabeo aumentará. Sin embargo, si el refuerzo está apropiadamente dimensionado y localizado, los anchos de las fisuras deben mantenerse dentro de límites aceptables.

- e. Juntas aserradas – Las juntas de contracción en pisos industriales y comerciales son formadas aserrando una hendidura continua en la losa para formar un plano debilitado debajo del cual se formará la fisura.

- f. Juntas de expansión (dilatación) – Estas están diseñadas para prevenir el aplastamiento y deformación (incluido el desplazamiento, pandeo, alabeo) de los límites de elementos estructurales de concreto que de otro modo puedan ocurrir debido a la transmisión de fuerzas de compresión que pueden desarrollarse debido a la expansión, de las cargas aplicadas, o la diferencial de movimientos que pueden surgir de la configuración de la estructura o del asentamiento (ACI 504R). Las juntas de expansión son hechas para proporcionar un espacio entre las secciones adyacentes de las unidades estructurarles, además estas juntas permiten el movimiento cuando es probable que la expansión sea mayor que la contracción. La distancia recomendable que deben tener las juntas de expansión debe ser de 4 veces la distancia entre las juntas de contracción.

72.3.2.2 SELLADO DE JUNTAS

Los métodos de sellado de juntas incluyen las técnicas de inyección, perfilado y rellenado, pegado y colocación de los selladores pre-moldeados, o para la apropiada instalación de sistemas de protección de la superficie (como las membranas elastoméricas).

Donde existan condiciones húmedas, o requisitos de higiene o de control de polvo, o donde el elemento está expuesto ambientes agresivos, de tráfico de vehículos pequeños y ruedas de metal tales como los montacargas, se deben rellenar y proteger las juntas de contracción y construcción con un epóxico semrígido que le dé un soporte adecuado a los bordes de la junta y que tenga suficiente resistencia al desgaste. Las juntas de construcción deben aserrarse hasta 1" (25 mm) de profundidad antes de rellenarse. Las juntas de aislamiento normalmente se sellan con un sello elastomérico. Las juntas deben ser tan estrechas como sea posible, con tal de que puedan llenarse apropiadamente.

Para el relleno o sellado de las juntas podrían utilizarse varios materiales como pueden ser: dos componentes semirígidos de resinas epóxicas, polisulfidas y uretanos que pueden ser usados para rellenar las juntas donde el filo de la junta necesita soportar la acción del tráfico.

Estos son los únicos materiales confiables que pueden proporcionar el apoyo de los bordes de concreto y prevenir la avería de la junta. Dos componentes de resinas epóxicas son deseables porque el curado es independiente de las condiciones del sitio de trabajo. Tales materiales de la junta deben ser 100% sólidos y tienen una mínima de orilla a un endurecimiento del 80 moderado de acuerdo con ASTM D2240.

Los sellados elastoméricos son útiles para algunas condiciones. Estos no deben usarse donde esté sujeto a tráfico de pequeñas rodaduras. Estos pueden instalarse rápidamente, ellos no requieren curado y escogido propiamente pueden mantener una firmeza de juntas que están sujetos abrirse y cerrarse. Ver ACI 504R para más información sobre el sellado elastomérico preformado.

El ACI 504R adicionalmente discute diferentes técnicas y materiales para el sellado de juntas y el ACI 503.1 discute los materiales epóxicos.

CONCLUSIONES

DURABILIDAD DEL CONCRETO

CONGELACIÓN Y DESHIELO

- El Perú es uno de los países con mayor número de climas, y esto trae consigo diferentes tipo de temperaturas, así que es necesario tomar en cuenta cuando existen temperaturas o condiciones ambientales por debajo de 0°C, pues es ese estado que se produce el congelamiento del agua contenida en los poros capilares del concreto, haciendo que se expanda hasta un 9% e induciendo esfuerzos internos de tracción que puedan provocar su fisuración inmediata o fatiga, esto al repetirse varias veces el ciclo congelación y deshielo. Mejor dicho el agua que se encuentra internamente se hincha y causa esfuerzos de tracción y posteriormente causa la fisuración en el concreto.
- El proceso de congelación del concreto se da en dos fenómenos principales como son: el congelamiento de la pasta, que consiste en la congelación de los álcalis formando cristales de hielo al caer la temperatura a 0°C, estos a su vez se transmiten por los capilares de la pasta, aumentando su volumen. El congelamiento de los agregados interviene también en el proceso de congelación del concreto puesto que el agua interna absorbida por los agregados aumenta su volumen y se incrementará mientras más poroso sea el agregado.
- Para que un concreto llegue a la resistencia final a tiempo se debe buscar sistemas de protección al concreto para que se encuentre en un sistema adiabático y obtener temperatura de por lo menos 5° a 13°C dependiendo del espesor el concreto. Además para poder controlar el efecto de congelación y deshielo en el concreto; el espaciamiento máximo entre las partículas de aire incorporado debe ser de 0.2 mm y las partículas deben ser de un diámetro de 0.16 mm a 0.25 mm.

ATAQUES AL CONCRETO

- **ATAQUES POR ÁCIDOS**

• Un ataque efectivo de ácidos sobre el concreto se presenta para soluciones con valores de pH entre 3 y 6, la velocidad del ataque progresa proporcionalmente a la raíz cuadrada del tiempo. Este proceso podría considerarse degradante cuando se inicia con la destrucción de la capa de carbonatos existentes en la superficie del concreto, que se formó durante la fragua por la acción del bióxido de carbono (CO₂) del aire o del agua sobre la cal hidratada (hidróxido de calcio). El ataque de ácidos se puede detectar por su porosidad y coloración blanquecina de la superficie de concreto. El ataque por ácidos o por otras sustancias químicas pueden incrementarse o ayudar a la degradación del concreto si existen temperatura altas, alta permeabilidad, un tipo de cemento no adecuado (para este caso se recomienda el cemento tipo II y IP), alta absorción, mala compactación del concreto, humedades relativas variables, curado deficiente, etc.

- **ATAQUES POR AGUA**

El agua pura o llamada agua blanda ataca al concreto por disolución de la pasta de cemento al actuar sobre el hidróxido de calcio libre, además al disolverse este continúa descomponiendo los silicatos de calcio, aluminatos y ferritos del cemento hidratado. Podemos detectar el ataque por la aparición en la superficie del concreto, eflorescencias blancas a manera de costras.

Las aguas casi puras podrían volverse ácidas debido a su contenido de ácido carbónico derivado del bióxido de carbono, estas aguas ligeramente ácidas con un pH de 3.5 a 5 puede afectar a la resistencia del concreto en 20 □ 7% y pueden llegar a deteriorar la superficie del concreto hasta 0.6 cm.

Las aguas de desagües generan un gas hidrógeno sulfurado (H_2S) como resultante de la acción oxidante de las bacterias anaeróbicas sobre los compuestos de azufre inorgánicos u orgánicos presentes en el desagüe, este H_2S tiene acción por encima del líquido, debido a la oxidación de las bacterias aeróbicas generando ácido sulfúrico, el cual ataca al concreto de manera evidente en la línea de agua produciendo un revestimiento escamoso de color amarillento y a veces puede ocurrir un desprendimiento del agregado fino y grueso. El ataque por aguas de desagües puede darse por varios factores como son: la temperatura elevada, concentración de líquidos, aumento de la población bacteriana y el ambiente húmedo que lo rodea.

- ATAQUE POR GASES

El anhídrido carbónico (bióxido de carbono) toma contacto con un concreto fresco o recién colocado además este ataca a los componentes del concreto, la superficie expuesta podría ser seriamente afectada variando la magnitud y profundidad del gas, temperatura ambiente, humedad relativa. La superficie afectada puede tornarse blanda y pulvulenta. El anhídrido sulfuroso en combinación con el agua forma el ácido sulfuroso (H_2SO_3), y este ácido gradualmente reacciona con el oxígeno del aire para producir el ácido sulfúrico (H_2SO_4). El ácido sulfuroso y el ácido sulfúrico corroen al concreto.

- ATAQUE POR BASES

Las soluciones básicas en concentraciones mayores al 20% corroe el concreto debido a la disolución de los silicatos y aluminatos formados por la hidratación del cemento portland. Pueden soportar el ataque de soluciones básicas aquellos cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico (menores al 12%).

- **ATAQUE POR SULFATOS**

Los sulfatos de calcio, sodio, potasio y magnesio en solución, son responsables de algunos de los más destructivos ataques al concreto. Estos sulfatos reaccionan con el aluminato tricálcico y la cal libre del cemento para formar el sulfoaluminato, con gran aumento de volumen produciendo expansión y fisuración del concreto. El sulfoaluminato de calcio (etringita) que se forma en el ataque, es una sal doble de baja solubilidad, la cual tiene un alto contenido de agua de cristalización lo que permite experimentar un gran aumento de volumen el cual origina presiones, fisuración y destrucción del concreto.

Es importante considerar varios factores para que el concreto se vea afectado por los sulfatos, como pueden ser: la exposición a suelos con soluciones de sulfatos, estar expuesto a un ambiente marino, oscilaciones de la napa freática con soluciones de sulfatos, exposición a climas cálidos. Además las estructuras con mayor relación superficie/volumen sufren un ataque más rápido. La reacción de los sulfatos con el concreto tiene una manifestación típica como es el hinchamiento, mayor porosidad, y fisuras, además de mostrar un color blanquecino. Estos efectos se pueden reducir con la utilización de cementos tipo V(5% de aluminato tricálcico como máx.) para exposiciones fuertes, el tipo II (máx. 8% de C3A) y IP (puzolanas 15% al 30% por peso de cemento) para exposiciones moderadas.

- **ATAQUE POR CLORUROS**

Los cloruros se hallan normalmente en zonas cerca al mar, en el agua marina, ciertos suelos, aguas subterráneas, aguas contaminadas de manera natural o artificial, además pueden provenir de los agregados, agua de mezcla y aditivos del concreto. En estas zonas podemos encontrar varios tipos de cloruros, el cloruro de magnesio, cloruro de aluminio, cloruro de potasio, cloruro de sodio. Pero en realidad estos tienen una acción insignificante sobre el concreto desde el punto de vista de la agresión química directa, pero tiene una participación en el mecanismo de corrosión de metales embebidos en el concreto.

- REACCIÓN ÁLCALI-AGREGADO

La reacción álcali-agregado crea cierto deterioro en el concreto originándose una reacción entre agregados reactivos (sílice) y los óxidos de sodio y potasio del cemento (álcalis). La reacción se inicia en la superficie del agregado y se produce en la inter fase con la pasta de cemento, formando un gel que absorbe y se dilata, creando presiones internas que llevan a la rotura del material.

Existen tres tipos de reacción, los llamados reacción álcali-sílice, cemento-agregado y álcali-rocas carbonatadas. El mecanismo de ataque de la reacción álcali-sílice se resume en el ataque de los hidróxidos alcalinos (derivados de los álcalis) sobre los minerales silicosos del agregado, formando un gel de álcalis y silicatos, donde se produce una expansión de los agregados absorbiendo agua y aumentando su volumen confinada a la pasta de cemento, creando fisuras y ruptura del concreto; podría considerarse un agregado reactivo aquel que tiene un incremento de longitud entre 0.05% a 0.10% (3 a 6 meses) a temperaturas de 38°C.

La reacción cemento-agregado es una reacción especial del álcali-sílice, puesto que el patrón de fisuración es similar al anterior (fisuración en forma de mapa), este tipo de reacción se da a pesar de disminuir el contenido de álcalis a 0.17% en el cemento, la diferencia con la reacción anterior es que en esta reacción se presentan agregados "arenosos gravosos" y presentan composición diversas y diferentes tendencias expansivas.

La reacción álcali-rocas carbonatadas se produce por los álcalis del cemento que actúan sobre ciertos agregados calcáreos de grano fino que contienen arcillas reactivas y expansivas, estos agregados llamados rocas dolomíticas carbonatadas tienen una reactividad expansiva y se caracterizan por la absorción considerable de agua con posterior hinchazón Este fenómeno se presenta de preferencia cuando el concreto está sometido a atmósfera húmeda, cuyo patrón de fisuración es el denominado "efecto de mecha".

- **CORROSIÓN**

La corrosión es un fenómeno que ataca al concreto como también al acero de refuerzo, uno de los agentes que tienen una gran importancia es el agua, que con grandes cantidades de cloruros y sulfatos disueltos producen ataques químicos al concreto y electroquímicos al acero de refuerzo. El concreto además de sufrir daños por el agua también se ve afectado por un proceso químico que resulta de la combinación del anhídrido carbónico (CO₂) existente en pequeñas cantidades del aire con el hidróxido de calcio del cemento hidratado para formar el carbonato de calcio, a este proceso se le llama "carbonatación" este reduce la alcalinidad del concreto, este cumple un papel muy importante puesto este protege al acero de la corrosión y al disminuir quedará más expuesto a la corrosión. La corrosión de la armadura de acero embebida en el concreto consisten en la oxidación destructiva debido al medio que lo rodea y esto hace que de cómo resultado una celda electroquímica, la cual consiste en estos elementos principales: el ánodo (ocurre la oxidación), cátodo (ocurre reducción o fisuración), conductor metálico (barra de acero), la corriente (flujo de electrones), electrolito (concreto donde se genera la corriente por el flujo de iones en un medio acuoso). La corrosión del acero puede dividirse en dos tipos: la corrosión directa, que ocurre después de la pasivación del concreto por acción conjunta de la humedad y oxígeno produciendo óxido de hierro que genera presiones con aumento de volumen produciendo fisuras en el concreto. Otro tipo de corrosión es la galvánica que es de naturaleza electroquímica ocurriendo flujo de electricidad esto debido a la presencia de cloruros (300 p.p.m) en el concreto.

- **ABRASIÓN**

La abrasión no ocasiona problemas estructurales, sin embargo puede traer consecuencias en el comportamiento bajo condiciones de servicio o indirectamente propiciando el ataque de algún otro enemigo del concreto como puede ser la corrosión, el ataque de sulfatos, etc. Los factores que influyen en la resistencia a la abrasión del concreto pueden ser: la resistencia a la compresión, propiedades y características de los agregados, métodos de acabado, las técnicas constructivas, curado, diseño de mezcla.

CAMBIOS VOLUMÉTRICOS Y FISURACIÓN DEL CONCRETO

CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN ESTADO PLÁSTICO

- **ASENTAMIENTO PLÁSTICO**

El asentamiento del concreto en estado plástico, es debido a la exudación del concreto (ascenso del agua y aire a la superficie en las tres primeras horas), este es un fenómeno inherente al concreto que no se puede evitar pero si se puede reducir, por medio de la reducción de la relación a/c, con un control riguroso de los retardadores, empleo de agentes de ventilación, y un recubrimiento como mínimo de 5 cm. Bajo condiciones de humedad, frío y sin viento el agua exudada se ve en la superficie; en climas cálidos, secos y con viento, el agua exudada se evapora rápidamente creando un asentamiento mucho mayor, pero la restricción de encofrados, varillas de acero, agregados restringen el libre asentamiento formando vacíos y/o fisuras adyacentes al elemento restrictor.

- **CONTRACCIÓN O RETRACCIÓN PLÁSTICA**

La contracción o retracción plástica se produce entre la primera hora y las seis horas a partir de la colocación, y esto sucede cuando la evaporación del agua exudada es más rápida que la velocidad de acudida del agua de la masa interna a la superficie, frenada por la acción capilar en los poros del concreto; es una situación típica durante vaciados en climas secos y calurosos, solo puede reducirse con las mismas medidas que el asentamiento plástico. La retracción se ve influenciada por varios factores como la presencia de finos en el concreto que aumenta apreciablemente la retracción (los finos de los agregados, mayor finura del cemento, adición de inertes en el cemento), el aumento del agua (aumento de la relación a/c), la retracción aumenta cuando disminuye el espesor del elemento, además en el caso del concreto armado el refuerzo disminuye la retracción.

La retracción es una deformación impuesta que provoca esfuerzos de tracción (estos esfuerzos son debidos a la restricción que es ocasionada por la masa interior o la restricción por elementos en sus extremos) y por consiguiente la formación de fisuras. La fisuración por contracción plástica tiene más ocurrencia en las superficies de pisos y losas o de cualquier otro elemento de área superficial grande. Generalmente las fisuras son largas, pueden alcanzar entre 1m y 2m y muchas veces pueden llegar a tener 100mm de profundidad o atravesar al elemento.

CAMBIOS VOLUMÉTRICOS EN ESTADO ENDURECIDO

- **CONTRACCIÓN POR SECADO**

Los fenómenos de contracción por secado están referidos básicamente, cuando el concreto se seca, se contrae o encoge, y cuando se vuelve a mojar, se expande. Los cambios del contenido de humedad de la pasta de cemento son los que ocasionan la contracción o expansión del concreto. Si la contracción del concreto es causada por el secado y pudiera realizarse sin ninguna restricción, el concreto no se fisuraría. Sin embargo el concreto es una estructura que está siempre sujeto a algún tipo de restricción, ya sea por la cimentación, por otro elemento de la estructura o por el acero de refuerzo. Esta combinación de contracción y restricción desarrolla en el concreto, esfuerzos de tracción. Los esfuerzos de tracción del concreto es el 10% del esfuerzo de compresión o sea en concretos de 350 Kg/cm² el concreto soporta 35 Kg/cm² de esfuerzos de tracción, pero en la contracción por secado los esfuerzos de tracción son mayores. La contracción por secado depende de varios de factores como son: el contenido de yeso en el cemento que produce mayor contracción; el agregado que tiene una mayor rigidez, mayor módulo de elasticidad, mayor densidad, mayor módulo de fineza o mayor tamaño máximo proporcionarán menor contracción por secado; el contenido del agua en la mezcla es un condicionante de la contracción, pues al aumentar la cantidad de agua se incrementará la contracción.

- EFECTOS TÉRMICOS

Las diferencias de temperatura dentro de una estructura de concreto es debido muchas veces a la hidratación del cemento o cambios en las condiciones ambientales o de ambos, estos gradientes de temperatura producen cambios volumétricos del concreto, además cuando se encuentra restringido se producen esfuerzos de tracción que el concreto no soporta, en tal caso el concreto se fisurará. El concreto endurecido tiene un coeficiente de dilatación térmica y es el que condiciona la capacidad de deformación por temperatura, esta rige que cada °C de gradiente térmico induce un esfuerzo del orden de 2 kg/cm². Por lo tanto, para concretos normales del orden de 200 kg/cm² de resistencia en compresión, ocasiona un gradiente térmico de alrededor de 10°C y origina fisuraciones si las condiciones de borde restringen las deformaciones, ocasionando esfuerzos que superan la capacidad resistente en tracción del concreto.

El concreto que tiene mayores dificultades es el llamado "masivo" que en términos generales incluye a las estructuras con relación V/S muy grande. En este caso se generan temperaturas internas que tienden a elevarse durante un curado inicial, esto es debido al calor liberado y la hidratación del cemento portland. El tipo de cemento tiene una influencia primordial en el incremento de temperatura por el calor de hidratación. Por otro lado, la temperatura de colocación así como la temperatura ambiente tienen mucha trascendencia en el ascenso de la temperatura y el tiempo en que llega a su valor máximo. La fisuración del concreto se puede controlar si se toman las medidas preventivas en cuanto a las temperaturas internas, temperaturas ambientales, el grado de restricción, contenido de cemento con bajo calor de hidratación, el tipo de vaciado, etc.

EVALUACIÓN DE LA FISURACIÓN DEL CONCRETO

La evaluación de las estructuras de concreto se debe realizar antes de todo proyecto de reparación, además es importantísima puesto que podemos determinar la degradación de las estructuras de concreto, el potencial de durabilidad, grado de corrosión, agentes nocivos, determinar patrones de fisuración, etc.

La evaluación del concreto se pueden dividir en procedimientos que bien podrían hacerse en conjunto o por separado, esto depende del tipo y grado de daño de la estructura, y son los siguientes: determinación de la ubicación y extensión de las fisuras, inspección visual, ensayos no destructivos, ensayos destructivos, revisión de planos y datos de obra, selección y procedimientos de reparación.

REPARACIÓN DEL CONCRETO

EVALUACIÓN DE DAÑOS Y SELECCIÓN DEL MÉTODO DE REPARACIÓN

Para evaluar los daños de una estructura de concreto, se debe buscar la causa que originó su degradación, fisuración, daño. Las causas más comunes de daño en el concreto son debidas a problemas de durabilidad y cambios volumétricos. Independientemente de la causa, es necesario establecer la magnitud del daño y determinar si la mayor parte de la estructura tiene la suficiente calidad que nos permita hacer reparaciones duraderas. A partir de esta información se recoge el tipo y extensión de la reparación.

TIPOS DE REPARACIONES

- **REMOCIÓN DEL CONCRETO, PREPARACIÓN Y TÉCNICA DE REPARACIÓN**

REMOCIÓN DEL CONCRETO

La reparación de todo proyecto de rehabilitación involucrará la remoción del concreto deteriorado, dañado, o concreto defectuoso; además en la remoción se incluye el retiro de concreto sano debido a algunos cambios estructurales o de servicio.

La remoción se debe tomar con cuidado puesto que se debe determinar bien las zonas de remoción y reemplazo del concreto, además es necesario que se aplique esta técnica por personal calificado.

PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE

La preparación de la superficie es uno de los pasos finales y más importantes en la reparación o rehabilitación de una estructura, pues consiste en la preparación de la superficie del concreto que recibirá el material de reemplazo, una apropiada reparación depende de las operaciones precedidas y el tipo de reparación que va a ser emprendida. En la preparación de la superficie de concreto se utilizan en algunos casos ácidos que en ciertas proporciones podrían causar daño, así que es recomendable utilizarlo en lo mínimo, tratando de utilizar existen otros métodos de preparación de superficies. En el acero de refuerzo existe la causa más dañina como es la corrosión, pero también podríamos considerar otras como el caso de incendios y ataques químicos. Para poder realizar la rehabilitación y reparación del refuerzo es muy importante el encontrar la causa que originó el daño, puesto que así podremos tomar las medidas de prevención y determinar un método de reparación y brindarle una mayor vida útil.

- **MATERIALES DE REPARACIÓN**

La importancia de todo proyecto de reparación es la colocación del material de reparación o de reemplazo que viene a ser la etapa final de este proyecto, además la colocación del tipo de material de reparación depende mucho del origen del daño o la causa que originó las fisuras o la degradación del concreto. Basándonos en esto podemos saber qué tipo de material vamos a utilizar para compensar el daño o de alguna manera tomar las previsiones del caso, así con este nuevo material debemos darle a la estructura de concreto una mayor vida útil.

Los materiales de reparación se dividen básicamente en dos grupos, los llamados materiales cementosos y los polímeros, los materiales cementosos están basados muchas veces en el cemento portland, con algunas modificaciones o adiciones de ciertos aditivos que le dan al concreto un mejor desempeño bajo condiciones extremas de exposición. Los materiales polímeros son materiales alternativos que están basados en materiales cementosos con adiciones químicas de resinas y monómeros. Los polímeros tratan de ser con el concreto un elemento integral y capaz de soportar aquellas condiciones a la que estuvo expuesto.

- SISTEMAS DE PROTECCIÓN

Los sistemas de protección forman parte de la etapa de previsión y mantenimiento de las estructuras de concreto frente a condiciones degradantes. La protección del concreto puede complementarse con el tratamiento de superficies y sellado de juntas. El tratamiento de superficies puede ser aplicado para limpiar, secar, tratar, proteger y brindar a la superficie un estado saludable, bajo condiciones extremas. Los tratamientos superficiales del concreto dependen de la exposición que sufre el concreto así que el tratamiento debe cumplir con ciertos requisitos: impermeabilidad al vapor, impermeabilidad al agua, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, etc.

El sellado de juntas en el concreto tiene como función de prevenir o de minimizar el ingreso de líquidos, sólidos, gases, y el de proteger de algún tipo de daño. El sellado cumple ciertas funciones secundarias como es el mejoramiento térmico, aislamiento acústico, prevenir el ingreso de materiales en la junta, etc. El sellado de las juntas debe cumplir con los requisitos que manda el tipo de junta. Además el sellador depende del tipo de tráfico, de exposición, condiciones de tempera

RECOMENDACIONES

- Las evaluaciones de las estructuras de concreto se debe realizar antes de todo proyecto de reparación, además determinar la degradación de las estructuras de concreto, el potencial de corrosión, el grado de ataque de agentes nocivos, etc.
- La reparación de todo proyecto de rehabilitación involucrará la remoción del concreto deteriorado, dañado o concreto defectuoso; además en la remoción se incluye el retiro de concreto sano debido a algunos cambios estructurales o de servicio.
- La reparación o rehabilitación de una estructura incluye la preparación de la superficie de concreto (recibirá el material de reemplazo), la reparación del refuerzo, los sistemas de protección de las superficies, selección y colocación del material de reparación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI (Capitulo Peruano) – ASOCEM
"Nueva Norma de Aditivos", Boletín Técnico CEMENTO N° 83 del 2010
2. ACI (Capitulo Peruano)
"Evaluación y Reparación de Estructuras", Lima – Diciembre 2016
3. ACI (Capitulo Peruano)
"Ponencias del Congreso Nacional de Estructuras y Construcción", Lima – Diciembre 2015
4. ACI 201.2R-92
"Guide to Durable Concrete" Reported by ACI Committee 201, reapproved 1997
"Compensating Concrete" Reported by ACI Committee 223, Detroit, Michigan 1998
5. ACI 224R-89
"Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures" Reported by ACI Committee 224, Detroit, Michigan 1989
6. ACI 224R-89
"Control of Cracking in Concrete Structures" Reported by ACI Committee 224, Detroit, Michigan 1989
7. ACI 228.2R-98
"Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures" Reported by ACI Committee 228, June 1998
8. ACI 546R-96
"Concrete Repair Guide" Reported by Committee 546, October 2006
9. ACI-PERÚ
"Cimentaciones de Concreto Armado en Edificaciones" Diciembre, 2010

10. ACI-PERÚ
"Diseño y construcción de pavimentos y pisos de concreto" Cuarta edición –Mayo 2011
11. ACI-PERÚ
Revista "Concrete International" N°1, Enero 2001
12. ACI-PERÚ
Revista "Concrete International" N°3, Marzo 2001
13. ACI-PERÚ
Revista "Concrete International" N°18, Agosto 2010
14. ACI-PERÚ
Revista "Concrete International" N°20, Setiembre 2010
15. ACI-PERU
Revista "Concreto al día" No 24 diciembre 1995
16. ASOCEM (Boletín Técnico N°12)
"Resistencia y durabilidad de los agregados" 1996
17. ASOCEM (Boletín Técnico N°46)
"Ataque químico al concreto". 2001
18. ASOCEM (Boletín Técnico N°97)
"Medidas de prevención para la alteración del concreto".2009
19. ASOCEM (Boletín Técnico N°48)
"Ataque de agentes biológicos al concreto" 2013
20. ASOCEM
"Modificación de los requerimientos normativos de los concretos expuestos a sulfatos"
MTC-2012

21. AVILA SOTELO, María Salomé
"Durabilidad del Concreto" Lima – Perú 2007
 22. BIONDI SHAW, Ana, Ing. - SENCICO
"Tecnología del Concreto" Curso Residente de Obras de Edificaciones, Febrero 2011
 23. BLANCO BLASCO, Antonio, Ing. – CIP
"Estructuración y Diseño de Edificaciones de Concreto Armado" 2009
 24. BRACAMONTE JIMÉNEZ, Raúl
"Reparaciones sólidas a bajo costo" IMCYC, 2010
 25. BRASIE, W. C., Ing. & SIMPSON, D. W.
Revista "El Ingeniero Civil" N°80 Setiembre – Octubre, 2002
 26. CABEZAS PACHECO, Fernando
"Análisis y diseño estructural de un centro comercial" Lima, 2008
 27. CALAVERA RUIZ, José, Dr. Ing.
"Patología de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado", Tomo I, INTEMAC,
Madrid – Enero 2016
 28. CALAVERA RUIZ, José, Dr. Ing.
"Patología de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado", Tomo II, INTEMAC,
Madrid – Enero 2012
 29. CEMENTOS "EL SOL"
"Especificaciones, características, recomendaciones de los diferentes tipos de
cementos" Noviembre 2015.
 30. CEMENTOS "PACASMAYO"
"Tipos de cementos, requisitos físicos y químicos según las normas peruanas"
Noviembre 2001.
-

31. CHAKRABARTI, S.C. , SHARMA, K.N.y MITTAL Abba
"Resistencia residual en el concreto después de su exposición a temperaturas elevadas"
Revista Concreto al Día N°24 ACI-PERÚ Diciembre 1995

32. COLAN SUBAUSTE, José
"Técnicas de Reforzamiento y Reparación de Edificaciones de Concreto Armado que sufren Degradaciones de Origen Físico y Químico" Lima 1986

33. COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ
"Ingeniería Civil" - Revista Técnica del Capítulo de Ing. Civil, Año 5, N°20, 21,22 – 2000

34. CONCRETE CONSTRUCTION-THE ABERDEEN GROUP
"¿Cuál es la varilla de refuerzo más resistente a la corrosión? IMCYC, Febrero 2000-
México

35. COTTIER CAVIEDES, Juan Luis, Ing.
Revista "El Ingeniero Civil" N°76 Enero – Febrero, 1992

36. CURSO DE ACTUALIZACIÓN (ACI-PERÚ)
"Tecnología del concreto para proyectistas, constructores y supervisores de obras"
Octubre 2001.

37. DÁVALOS FLORES, Jessica
"Diseño, construcción y mantenimiento de pozos"

38. DEL RIO KUROIWA, Carmen
"Tema de Tesis en el Área de Concreto Armado" Lima- Perú 1993

39. FIFTH CAMMET-ACI INTERNATIONAL
"Conference on Durability of Concrete" Barcelona, Spain 2000

40. GONZALES DE LA COTERA S., Manuel, Ing. (ASOCEM)
"Requerimientos del cemento en los reglamentos de construcción.

41. HARMSEN, Teodoro, MAYORCA, J. Paola
"Diseño de Estructuras de Concreto Armado", PUCP, Lima 2000
42. HERMMAN, Kurt
"Colado del concreto a altas temperaturas" IMCYC, Abril 2001-México
43. HUSNI, Raúl, Ing. - ACI (Capítulo Peruano)
"Calidad de las Estructuras de Concreto", Lima – Diciembre 2000
44. ICOCHEA B., Guillermo, Ing.
Revista "El Ingeniero Civil" N°81 Noviembre – Diciembre, 1992
45. IMCYC
"Uso de los aditivos reductores de contracción" Junio 2000
46. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC)
"Control de Agrietamiento de Estructuras de Concreto",
47. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC)
"Durabilidad del Concreto"
48. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC)
"Problemas en el Concreto: Causas y Soluciones",
49. JIMÉNEZ MONTOYA, P., GARCIA M., A., MORAN CABRE, F.
"Hormigón Armado"(13ava Edición Tomo I), Editorial Gustavo Gil S.A., Barcelona 1994
50. MERRITT, Frederick S.
"Manual del Ingeniero Civil" Volumen I, Editorial Mc Graw Hill, México 1984
51. MONTANI, Rick
"La carbonatación, enemigo olvidado del concreto" IMCYC, Diciembre 2000-México

52. NEVILLE, Adam
"La cuestión de la durabilidad: Hoy podemos hacer un buen concreto" IMCYC Revista
Marzo 2001.
53. NEVILLE, Adam -ACI (Capítulo Peruano)
"Mantenimiento y Durabilidad de las Estructuras", Lima 2001
54. NILSON, Arthur H., WINTER, George
"Diseño de Estructuras de Concreto" 11va. Edición Mc. Graw Hill, México 1994.
55. Normas Alemanas (ZTV-Riss93).3 (DafStb).4-7 y Seminario del TFB
"Relleno de fisuras en obras de concreto armado" IMCYC, Marzo 2000-México
56. NTP 339.059 : 2001 (INDECOPI)
"Hormigón (Concreto). Método para la obtención y ensayo de corazones diamantinos y vigas cortadas de hormigón (concreto)"
57. NTP 339.181 : 2001 (INDECOPI)
"Hormigón (Concreto). Método de ensayo para determinar el número de rebote del hormigón (concreto)"
58. OLARTE NAVARRO, Jorge
"Criterios para Reparación y reforzamiento de Edificios Existentes de Concreto Armado",
Lima 1990
59. OSHIRO HIGA, Fernando, Ing.
"Edificios de Concreto Armado" (Cálculo Estructural Antisísmico), Editorial Althaus, Lima
2000
60. PAÉZ, Alfredo
"Hormigón Armado" Tomo I y II, Editorial Reverté S.A.-Barcelona 1986.
-

61. PASQUEL CARBAJAL, Enrique, Ing.
"Tópicos de Tecnología del Concreto" 2da Edición, Ediciones del Colegio de Ingenieros del Perú – Lima, Nov. 1998

62. PAUL, Jay H.
"Cómo prolongar la vida de las reparaciones de concreto" IMCYC, Noviembre 2000.

63. REGLAMENTO NACIONAL DE CONSTRUCCIONES
Cámara Peruana de Construcción, Décimo sexta edición, Diciembre 1997.

64. RICE, Paul F., HOFFMAN, Edward S.
"Diseño Estructural con Normas de ACI", Editorial Limusa 1991

65. RIVVA LÓPEZ, Enrique - ACI (Capítulo Peruano)
"Naturaleza y Materiales del Concreto", Lima – Diciembre 2000

66. TORRES ACOSTA, Andrés A., Dr.
"Durabilidad del concreto expuesto a ambiente marino. Parte I : Periodo de la iniciación de la corrosión" IMCYC, Junio 2000- México

67. URIBE AFIF, Roberto (XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Monterrey, Nuevo León. México)
"Concreto Durable, el inicio del cambio" IMCYC, Febrero 2000-México

68. ZEGARRA C., Luis, Ing. – ACI
"Juntas en la Construcción", Lima 2001

ANEXOS