



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGON

"DURABILIDAD DEL CONCRETO PARA  
ESTRUCTURAS EN INSTALACIONES PETROLERAS"

293358

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**I N G E N I E R O C I V I L**

P R E S E N T A :

**JOSE ANDRES LUNA INIGUEZ**



ASESOR DE TESIS: ING. JOSE MARIO AVALOS HERNANDEZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN

DIRECCIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

JOSÉ ANDRÉS LUNA IÑIGUEZ  
P R E S E N T E.

En contestación a la solicitud de fecha 24 de noviembre del año próximo pasado, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. JOSÉ MARIO ÁVALOS HERNÁNDEZ pueda dirigirle el trabajo de tesis denominado, "DURABILIDAD DEL CONCRETO PARA ESTRUCTURAS EN INSTALACIONES PETROLERAS" con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México, 16 de enero del 2004  
EL DIRECTOR

M en R.I. CARLOS EDUARDO LEVY VÁZQUEZ



- C p Secretaría Académica.
- C p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Civil.
- C p Asesor de Tesis.

CELV/AIR/RCC'IIa.

### **A mis padres:**

José Luna Hernández

Por apoyarme y estar siempre cuando te necesite, cuando mas difícil las cosas se ponian tu estabas ahí dándome ánimos, amigo mio, que cuando mas lo necesito me escuchas, viejo lindo que me has dado mucho.

Gracias papá.

Magdalena Iñiguez Zurita

Gracias madre, por que gran parte de lo que ahora soy tu lo construiste, aunque estemos lejos sabes que te tengo en mi mente

### **A mis abuelos y tíos.**

Galo Iñiguez y Eufracia Zurita

Porque siempre que estuve con ustedes me brindaron el cariño y el apoyo que yo necesite, porque no solo han sido mis abuelos si no mas que eso. Gracias.

Felimon Iñiguez y Guadalupe Campomanes

Gracias por que sin lo que me enseñaron no lo hubiera logrado, por su apoyo y su cariño, que me brindaron desinteresadamente siempre que podían y aun cuando los tiempos eran adversos, sepan que son bien correspondidos.

Juan Iñiguez y Reina Luna

Por todo su cariño, por su apoyo cuando mas los necesite en un momento de mi carrera, en el que necesite ayuda.

### **A mis hermanos**

Manuel, Guille, Sandra, Eli, Reina, Marina, Francisco, Roberto, Jesús, Joel, Abraham, Manuel A.

*" A cada uno de ustedes gracias por creer en mí "*

### **A mis asesores**

M. en Ing. Mario Carlos Flores Ramírez

Por su ayuda y guía en este tema, por ser la persona indicada, ayudándome, orientándome y por darme un poco de su tiempo.

Ing. José Mario Ávalos Hernández.

Por brindarme su apoyo para llevar cabo este proyecto, dándome parte de su tiempo y su experiencia.

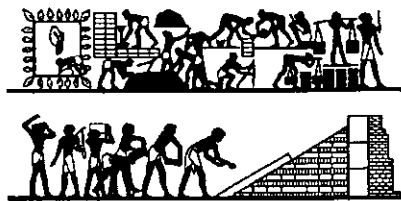
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	4
<b>CAPÍTULO 1. DURABILIDAD</b>	
1.0. DURABILIDAD.	8
1.1. GENERALIDADES.	8
1.2. ATAQUE DE SUSTANCIAS QUÍMICAS AGRESIVAS.	10
1.2.1. ATAQUE DE SULFATOS.	12
1.2.2. AGUA DE MAR .	13
1.2.3. ATAQUE DE ÁCIDOS.	16
1.2.3.1. ÁCIDOS INORGÁNICOS.	16
1.2.3.2. ACIDO ORGÁNICOS.	17
1.2.4. EL ATAQUE POR AGUAS PURAS.	18
1.3. ABRASIÓN Y EROSIÓN.	19
1.3.1. ABRASIÓN.	19
1.3.2. EROSIÓN.	20
1.4. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.	23
1.4.1. MECANISMO DE LA CORROSIÓN EN EL ACERO.	23
1.4.2. CONDICIONES NECESARIAS PARA LA CORROSIÓN.	25
1.5. REACCIONES QUÍMICAS DE LOS AGREGADOS.	28
1.5.1. CONDICIONES PARA EL DESARROLLO DE LAS REACCIONES ÁLCALI AGREGADO.	29
1.5.2. TIPOS DE REACCIÓN.	30
1.6. CONGELACIÓN Y DESHIELO.	33
1.6.1. CICLOS DE CONGELACIÓN Y DESHIELO.	33
1.6.2. MECANISMO DE CONGELACIÓN.	33
1.6.3. EL EMPLEO DE SALES DESCONGELANTES.	35
REFERENCIAS .	37
<b>CAPÍTULO 2. EXPOSICIÓN AMBIENTAL.</b>	
2.0. CONDICIONES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO.	39
2.1. CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS.	39
2.1.1. EL CLIMA NACIONAL.	39
2.2. CONCRETO EN CLIMA FRÍO.	42
2.3. CONCRETO EN CLIMA CÁLIDO.	47
2.4. CONCRETO EN CONTACTO CON MEDIOS AGRESIVOS.	52
2.5. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.	53
2.6. REACCIONES ÁLCALI AGREGADO .	56

REFERENCIAS .....	64
<b>CAPÍTULO 3. INSTALACIONES PETROLERAS.</b>	
3.0 INDUSTRIA PETROLERA .....	66
3.1 HIDROCARBUROS – PROCESOS .....	67
3.1.1 PETRÓLEO. ....	67
3.1.2 GAS. ....	67
3.1.3 REFINACIÓN. ....	70
3.1.4 PETROQUÍMICOS BÁSICOS Y AZUFRE. ....	70
3.2 EMISIONES Y DESCARGAS. ....	70
3.3 DETERIORO DEL CONCRETO. ....	72
3.3.1 TIPOS DE DETERIORO ENCONTRADOS EN LAS INSTALACIONES. ....	73
3.3.2 ACIDOS. ....	74
3.3.3 AZUFRE. ....	75
3.3.4 BIÓXIDO DE CARBONO. ....	76
3.3.5 CLORUROS. ....	77
3.3.6 AGRIETAMIENTO. ....	79
REFERENCIAS. ....	81
<b>CAPÍTULO 4. CONCRETO DURABLE.</b>	
4. CONCRETO DURABLE. ....	84
4.1. CONDICIONES DE EXPOSICIÓN. ....	84
4.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA. ....	84
4.1.2. CARÁCTER DEL LUGAR. ....	86
4.1.3. MEDIO DE CONTACTO. ....	87
4.2. CONDICIONES DE SERVICIO. ....	88
4.2.1. ATAQUE QUÍMICO. ....	88
4.2.2. ATAQUE POR SULFATOS. ....	90
4.2.3. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO. ....	91
4.2.3.1. MEDIDAS DE PROTECCIÓN. ....	92
4.2.4. CARBONATACIÓN. ....	94
4.2.5. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN. ....	94
4.2.6. REACCIONES DELETÉREAS DE LOS AGREGADOS. ....	96
4.2.7. COMO PREVENIR LAS FISURAS. ....	97
4.3. RECOMENDACIONES ADICIONALES. ....	98
REFERENCIAS. ....	101
<b>CONCLUSIONES.</b> .....	102

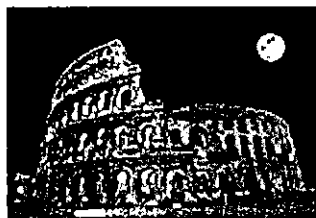


## INTRODUCCIÓN.

El concreto es uno de los materiales más nobles, ya que puede moldearse en cualquier forma, esta compuesto de materiales naturales, con algunas excepciones en las que se le agrega algún aditivo para modificar alguna de sus propiedades, por lo que se puede llamar un material ecológico. Ha sido utilizado desde antes de nuestra era, los egipcios utilizaban una mezcla de yeso, y ladrillos de adobe para la construcción de sus ciudades y pirámides.



Los romanos fueron los primeros que utilizaron el concreto hidráulico, mezclando ceniza, siendo esta el cementante, y que hasta la fecha se tiene algunas muestras de ello como el Coliseo y el Partenón. El concreto también fue utilizado en la pared de la defensa que abarca Roma, en muchos caminos y los acueductos que todavía existen hoy. Los Romanos utilizaron muchas técnicas innovadoras para manejar el peso del concreto. Para aligerar el peso de estructuras enormes, encajonaron a menudo tarros de barro vacíos en las paredes. También utilizaron barras de metal como refuerzos en el concreto cuando fueron construidos techos estrechos sobre callejones.



En 1774 John Smeaton había encontrado que al combinar la cal viva con otros materiales creaba un material extremadamente duro que se podría utilizar para unir juntos otros materiales. Él utilizó este conocimiento para construir la primera estructura de concreto desde la Roma antigua. John Smeaton, uno de los grandes ingenieros del siglo dieciocho, logró un triunfo al construir el faro de Eddystone en Inglaterra.

Si bien el concreto es uno de los materiales que nos han acompañado desde hace mucho tiempo, en la actualidad es uno de los más importantes.

En la gran mayoría de la infraestructura del país encontramos al concreto como uno de los materiales más utilizados, por sus diversas cualidades, este trabajo presenta un ejemplo de ello. Las instalaciones petroleras son de gran importancia debido al papel que desempeña en la economía de nuestro país, por lo tanto, se requiere que estas instalaciones se mantengan en óptimas condiciones para su correcto desempeño y que la durabilidad de estas sea acorde con lo que fueron diseñadas. Las estructuras de concreto existentes en estas instalaciones se encuentran afectadas por diversos agentes, lo cual degrada al concreto reduciendo su durabilidad. La durabilidad del concreto está



relacionada directamente con su capacidad para resistir diversos ataques físicos y químicos que pueden variar en su mecanismo de acción.

Es muy común en la mayoría de los diseñadores de estructuras de concreto en México que no están actualizados en la tecnología del concreto, dar demasiado énfasis el criterio estructural, sin considerar las condiciones ambientales que son las que fundamentalmente influyen en la durabilidad de las estructuras de concreto. No resulta factible seguir diseñando solo por resistencia del concreto a compresión. Al no tomarse en cuenta las condiciones ambientales adversas, la estructura resulta de baja durabilidad y las consecuencias pueden ser desastrosas, implicando grandes pérdidas económicas.

En el presente trabajo de investigación documental pretende determinar las causas del deterioro de las estructuras de concreto reforzado en las instalaciones petroleras terrestres y marinas, así como dar recomendaciones para la obtención de un concreto durable.

El presente trabajo de tesis consta de cuatro capítulos, como sigue:

- Capítulo I: Durabilidad. En el cual se define el concepto de durabilidad en el concreto, de acuerdo a varias fuentes tanto nacionales como internacionales, definiendo las características más importantes que deben tomarse en cuenta para la durabilidad del concreto.
- Capítulo II: Exposición ambiental. Es una breve descripción de las zonas agresivas para el concreto en el territorio nacional, determinación de climas, de suelos agresivos para el concreto y de algunas características de la durabilidad.
- Capítulo III: Instalaciones Petroleras. En este se presenta una descripción del medio en instalaciones petroleras, así como la descripción de los agentes agresivos más importantes presentes en las instalaciones.
- Capítulo IV: Concreto Durable. Sugerencias para la obtención de concreto durable en las instalaciones petroleras, utilización de agregados, sugerencias en el proceso constructivo.

**DURABILIDAD**

## 1. DURABILIDAD

### 1.1. GENERALIDADES

Durante mucho tiempo el parámetro para la evaluación del concreto en estado endurecido había sido la resistencia a compresión, lo cual a traído que los costos de reparación del concreto sean importantes. En la gran mayoría de las estructuras dañadas han cumplido con las especificaciones en cuanto a la resistencia a la compresión. Lo cual demuestra que la resistencia a la compresión no es el único requisito que se deberá tomar en cuenta para el diseño de los concretos.

También durante muchos años se pensaba que el concreto era un material que conservaba sus características durante toda su vida útil. Además de que se creía que los agregados resultaban inertes para la mezcla de concreto, es decir, que los agregados no reaccionaban con los demás componentes de la mezcla de concreto. Sin embargo esto no resulta así.

Tradicionalmente el único requisito que se le pide a los agregados es que cumplan con su granulometría y que esta se encuentre dentro de las curvas especificadas en las normas de calidad. Sin embargo en ocasiones se tiene agregados que cumplen con este requisito pero que en ocasiones tienen picos en su granulometría, eso puede provocar que se tengan concretos que en estado fresco tengan ciertas características que contribuyan a la segregación y al sangrado y en estado endurecido a ser altamente permeables.

Es por tanto que los concretos no solo se deben diseñar para soportar una carga determinada, sino también para soportar las condiciones a las que se expondrá la estructura, siendo de tal calidad o características los materiales que lo conforman de tal manera que brinden durabilidad a la estructura.

Ahora bien, la Durabilidad de las estructuras de concreto es la capacidad para resistir las condiciones de exposición a las que es sometida, a los ataques químicos y físicos o a cualquier otro proceso de deterioración.<sup>1</sup> El concreto durable deberá mantener las características con las que fue diseñado originalmente, su calidad de servicio al estar expuesto a su medio ambiente. La durabilidad de las estructuras de concreto, es una propiedad que varía con el tiempo y depende mucho de las características microfísicas y químicas, más que de la resistencia mecánica a la compresión del concreto.

Una durabilidad inadecuada se manifiesta inmediatamente, por el deterioro físico y químico de la estructura de concreto.

La tabla 1 Tomada de la referencia (2), muestra las vidas probables para algunas construcciones. Sin embargo, una gran cantidad de edificios, puentes e infraestructuras marítimas que no han cumplido con esta vida útil.

Estructura	Vida útil probable requerida (años)
Viviendas unifamiliares	100
Bloques de Apartamento	100
Bloques de oficinas	50
Fábrica	40
Almacenes	80
Puentes de carretera	100
Puentes de Ferrocarril	80
Puertos	200
Iglesias	500

Tabla 1. Vida útil requerida de diferentes estructuras

Muchas estructuras deben ser estudiadas para evaluar su seguridad al cabo de periodos tan cortos como 25 años y deben ser sometidas a procesos de rehabilitación costosos.

De la experiencia basada en los estudios de durabilidad, patología y rehabilitación, nos podemos dar cuenta que gran parte de estos problemas, pudieron resolverse en el proceso de diseño y construcción, mediante la especificación de detalles y procedimientos lógicos que no implican necesariamente un incremento en costo.

Para cuidar que el concreto tenga una durabilidad adecuada es necesario tomar en cuenta las condiciones a las que va estar trabajando, así como el ataque de las sustancias con las que tendrá que estar en contacto, los desgastes por el uso a los que se someterá, el deterioro de los materiales que proteja, las reacciones diversas que se realizan en la mezcla, la calidad de sus componentes, además de la condiciones climáticas del medio en que se desplante.

## 1.2. ATAQUE DE SUSTANCIAS QUÍMICAS AGRESIVAS

Los factores por los que el concreto resiste el ataque de sustancias químicas depende de la permeabilidad y de la distribución y tamaño de los poros.

Hoy en día el ataque de sustancias químicas en las estructuras provoca que muchas tengan que ser reparadas y otras tengan que demolerse, lo que supone un elevado desembolso económico en cualquier de los dos casos.

Es real que existen concretos desde la época de los romanos y que fueron fabricados con puzolanas y que aun en nuestros días existen muchos de ellos intactos y con unas características mecánicas sorprendentes, es cierto también, que existen estructuras de concreto de menos de 50 años que ya tienen que ser demolidas a consecuencia de los ataques tan agresivos que se han producido sobre ellos, por las reacciones de los álcalis del cemento y de los agregados reactivos o por corrosión del armado, todo acelerado por la presencia del ataque de una sustancia.

El conocimiento de las condiciones, ambientales y de servicio, a las que va a estar sometido el concreto son fundamentales con vista a su diseño, pues dependiendo de ellas, habrá que elegir el tipo de cemento, agregado, granulometría, relación agua/cemento a emplear, así como el grado de consolidación, curado y protección que habrá de darle y que son factores totalmente fundamentales con vista a obtener concretos durables y que no presenten problemas patológicos. Sin embargo, la triste realidad es que unas veces por ignorancia y otras por descuido, en muchas ocasiones, el concreto que se hace no es el idóneo para el medio en el que tiene que trabajar o desarrollar su función y por lo tanto este concreto será débil, enfermo y presentará una vida útil más corta.

La corrosión del concreto por agentes químicos suele ser el que mayores daños ocasiona en las estructuras y frecuentemente se presenta mayores dificultades a la hora de aplicar alguna reparación.

La durabilidad de un concreto se puede medir por la velocidad con la que el mismo se descompone como resultado de acciones químicas.

En la mayor parte de los casos, el ataque de los agentes agresivos químicos reaccionan con el cemento, de aquí la importancia de elegir el cemento adecuado al medio con el que vaya a estar en contacto el concreto y en el menor de los casos la reacción se producirá en el agregado.

Un factor fundamental en el desarrollo de los procesos corrosivos es la presencia de agua, bien en forma líquida o de vapor, si ésta no existe, no se produce disolución de los componentes agresivos y por tanto, no habrá reacción química; así, un concreto totalmente seco no será dañado por los

agentes agresivos químicos aunque este en contacto directo con ellos. El agua es, por lo tanto, el elemento fundamental de toda reacción del proceso de deterioro por sustancias agresivas.

Otra condición para que haya reacciones que produzcan daño es que la sustancia agresiva sea transportada hasta tomar contacto con la sustancia con la que tiene que reaccionar. El contacto entre ambas sustancias puede ser interrumpido en mayor o menor grado por la creación de sustancias pasivantes formadas en la reacción.

La velocidad e las sustancias agresivas hacia las reactivas depende de la temperatura debido a que mayor temperatura las reacciones suelen acelerarse.

Una reacción química que en sí no es nociva para el concreto es la carbonatación del hidróxido de calcio procedente de la hidratación del cemento, sin embargo, esta reacción produce indirectamente una elevación del riesgo de corrosión del armado debido a la pérdida de alcalinidad del concreto.

Las diferentes acciones de tipo químico que se producen en el concreto son:

Ataque por sulfatos, cloruros, carbonatos o otros.

Ataque por ácidos

Ataque por aceites, grasas, combustibles, líquidos alimenticios

Reacciones ácido-álcalis

Reacción en agregados con sulfatos susceptibles a oxidarse

Otras

La mayor parte de las agresiones que sufre el concreto procede de agentes químicos situados en el exterior del mismo y que le atacan de fuera hacia dentro como ocurre en el caso de concretos de cimentación, muros de sostenimiento de tierras, tuberías, etc., que están en contacto con terrenos que contienen estos agentes agresivos, simplemente, en el caso de estructuras que están situadas en un ambiente industrial o urbano con altas tasas de contaminación ambiental, o en suelos industriales en los que se produce derrames de líquidos agresivos como ocurre en la industria.

En otros casos la reacción química agresiva se produce entre componentes del propio concreto como ocurre en el caso de los álcalis del cemento y ciertos agregados reactivos.

### 1.2.1. ATAQUE DE SULFATOS

De los aniones que componen las sales son los sulfatos los agentes más agresivos al concreto dando lugar a componentes expansivos que destruyen el concreto.

Los sulfatos ( $SO_4$ ) son componentes químicos presentes en suelos y agua, los cuales atacan al concreto. El agua de mar contiene cantidades altas de sulfatos, generalmente en el orden de tres mil partes por millón (3 mg/l). El contenido de sulfatos en suelos varía ampliamente, pudiéndose encontrar contenidos en el orden de 0.1 a 2 por ciento en peso o mayores.<sup>2</sup>

El mecanismo de ataque se inicia con la difusión de los sulfatos a través de los poros del concreto, esta difusión depende principalmente de la permeabilidad del material.

Una vez dentro del concreto, los sulfatos pueden reaccionar con el hidróxido de calcio formado durante la hidratación de los componentes del cemento, produciéndose sulfato de calcio (yeso), que es un compuesto expansivo.

El ataque de sulfatos (sulfato de sodio, potasio, calcio y magnesio) al concreto provoca pérdida de resistencia y agrietamiento en las estructuras, reduciendo su periodo de vida útil e incrementándose los costos de mantenimiento y pone en riesgo la integridad de la estructura de concreto. A continuación, en la tabla 2 se muestra los diferentes grados de ataque de los sulfatos.

Grado de ataque	% en peso de $SO_4$ en suelos	Ppm de $SO_4$ en muestras de agua
Despreciable	0.00-0.10	0.0-150
Moderado	0.10-0.20	150-1,500
Severo	0.20-2.0	1,500-10,000
Muy severo	2.0 o más	Mayor a 10,000

Tabla 1.2. Grados de ataque de los sulfatos al concreto<sup>2</sup>

En la magnitud del ataque por las aguas sulfatadas, al igual que ocurre con otros químicos agresivos en disolución, el que el agua estancada o en movimiento tiene mucha importancia ya que el poder de lavado del cemento es mayor cuando esta en movimiento; así ocurre igualmente en suelos cohesivos en los que el movimiento del agua es lento por lo tanto, la intensidad del ataque es menor que en el caso de suelos arenosos.

Las aguas estancadas que contienen más del 0.5 % de  $\text{SO}_4$  son peligrosas, al igual que lo son las renovadas continuamente (las que están en movimiento) que contienen más del 0.1 % de  $\text{SO}_4$ .

El agua de mar posee sulfatos de calcio, magnesio y sodio, entre otros, que reaccionan con el aluminato tricálcico y cloruros que solubilizan la cal, pero el ataque es menos intenso que el de una agua que sólo contuviese la misma cantidad de sulfatos que la de mar debido a que los cloruros presentes atenúan la acción de los sulfatos al crear cloro aluminato (sal de Friedell) no expansivo.

La disolución de los hidróxidos de calcio y magnesio en presencia del sal (cloruro de sodio) se hace cuatro veces superior que agua dulce; sin embargo, el hidróxido de magnesio forma una película protectora que hace disminuir el grado de agresividad del agua de mar.

### 1.2.2. AGUA DE MAR

Con respecto a las estructuras que están en contacto con el agua de mar hay que considerar tres zonas importantes:

a.- Una zona totalmente sumergida en la que los procesos corrosivos son de naturaleza química.

b.- Una zona de oscilación de nivel de agua en la que intervienen, junto con las acciones de tipo químico otras de naturaleza física en las que cabe distinguir: desecaciones, heladas, etc. Esta zona es peligrosa debido a que cuando el nivel de agua es elevado el concreto se satura y cuando el nivel baja se produce una desecación cristalizando las sales en los poros. Al subir de nivel el agua vuelve a llenar los poros y aumenta la concentración de sales en ellos. A veces, a este fenómeno de concentración de sales se le suma el de la expansión de los cristales formados dando lugar a la creación de tensiones internas que ayudan a destruir el concreto. Por otro lado la saturación produce entumecimiento y la desecación origina contracción lo que agrava la situación. Aunado a todo lo anterior esta zona al igual que la de evaporación están expuestas al efecto erosivo de las olas que a veces arrastran arenas con lo cual agravan el fenómeno destructivo.<sup>3</sup>

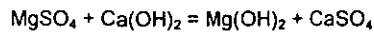
c.- Una zona de evaporación situada en cima de la zona de oscilación de nivel y la cual el agua asciende por capilaridad. En esta zona la evaporación del agua agresiva se produce de forma continua debido a su contacto con el aire. La concentración de las sales aumenta dando como resultado expansiones. Los sulfatos de magnesio y de sodio son más peligrosos desde el punto de vista que generan más expansión que el sulfato cálcico.



La velocidad de la evaporación depende de las características del aire y de su velocidad, porosidad del concreto, tipo de acabado de la superficie del concreto, distancia entre las zonas de evaporación y la humedad, además de las propiedades del agua agresiva. Los efectos de las aguas libres, así como de las del subsuelo, dependen de los iones y de la concentración de estos mismos que posean dichas aguas, del contenido de los mismos y de la temperatura.<sup>4</sup>

Hay que tener presente también que las acciones mecánicas de erosión sobre el concreto pueden aumentar la intensidad del ataque debido a que se produce una eliminación de los productos solubles, aumentando y renovando las superficies que están en contacto con el medio agresivo químico.

Cuando existe sulfato de magnesio éste actúa sobre la cal para transformarse en sulfato de calcio según:



Este sulfato reacciona con el aluminato tricálcico para formar la etringita expansiva.

La acción de los cloruros sobre los concretos también es peligrosa debido a que suelen dar lugar a la formación de cloruro de calcio soluble como puede verse en la acción, por ejemplo, del cloruro de magnesio:



La agresividad de los iones de cloro sobre el concreto depende mucho de los cationes a los que estén unidos. Muchos cloruros, incluso en pequeñas cantidades.

La salmuera es una disolución concentrada de cloruro de sodio o sal común. Esta disolución no ataca a un buen concreto a temperatura ambiente, aunque a largo plazo puede presentarse problemas especialmente si el concreto está armado y los cloruros penetran por los poros del mismo. A veces se produce la cristalización de las sales dentro de los poros creando tensiones importantes que pueden dañar al concreto.

Por otro lado, la presencia de iones de cloro en cantidades superiores a 6 g/l, pueden ser muy peligrosas en el caso de concretos armados por los efectos que pueden tener sobre la corrosión de las armaduras.

Aunque como se ha indicado anteriormente los cloruros frenan el ataque de los sulfatos cuando se encuentran juntos en disolución.

Los nitratos, son solubles en el agua y reaccionan con los componentes del cemento dando lugar a sales que se lixivian con facilidad. La mayoría de los nitratos pueden considerarse como medianamente agresivos con excepción del nitrato amónico que es altamente agresivo.

Los sulfatos dan lugar a ataques ligeros pero, si por oxidación se transforma en radical sulfato, su poder agresivo se incrementa de una forma notable.

Los fosfatos no producen daños sobre el concreto, lo cual no resta para que este deba protegerse de algunos fosfatos que poseen carácter ácido.

Los carbonatos, en general, no dañan al concreto ya que forman sales insolubles.

El catión de magnesio actúa con facilidad en las reacciones de intercambio favoreciendo la corrosión del concreto, si está en cantidad suficiente puede reemplazar al calcio produciendo daños importantes en el concreto. La formación del hidróxido de magnesio cristalino (brucita), puede ser beneficiosa, porque este hidróxido insoluble sella los poros impidiendo y retardando otras acciones corrosivas. La acción corrosiva del sulfato se ve muy incrementada por la presencia de iones de magnesio haciendo que las soluciones de sulfato de magnesio sirva para marcar un índice del comportamiento de un concreto frente a los ataques por sulfatos. Ver tabla 1.3.

criterio	Grado de severidad		
	ligero	moderado	alto
Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), mg/l.	15-30	30-60	>100
Magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ), mg/l.	300-1000	1000-3000	>3000
PH	6.5 - 5.5	5.5 - 4.5	<4.5

Tabla 1.3. Grado de severidad de magnesio y amonio (cationes) y PH(ácidos).

Prácticamente toda la sal que contiene catión de amonio es muy soluble. Las reacciones de intercambio con la cal dan lugar a la formación de amoniaco en forma de gas, los nitratos, cloruros, sulfatos, sulfuros de amonio, son perjudiciales para el concreto, especialmente los nitratos de amonio. Si las soluciones son débilmente agresivas el empleo de cemento de bajo contenido en cal puede solucionar el problema. Si, por el contrario, son fuertemente agresivas habrá que proceder a proteger al concreto o emplear cementos aluminosos. Ver tabla 1.3.

Estos cationes de amonio se encuentran en muchos fertilizantes como los superfosfatos, nitratos, sulfatos, estas sales atacan al concreto especialmente si la temperatura es cálida y existe alta humedad.<sup>5</sup>

### 1.2.3. ATAQUE DE ÁCIDOS

La acción de los ácidos sobre el concreto se traduce en la transformación de los compuestos de calcio como: hidróxido de calcio, silicato y aluminato cálcico hidratado, en forma rápida en sales de calcio.

La pasta de cemento hidratada tiene un carácter alcalino, producido fundamentalmente por  $\text{Ca(OH)}_2$  o portlandita (hidróxido de calcio) generada en la hidratación de los silicatos, se comprende fácilmente que tiene que ser atacada por los ácidos dando las sales correspondientes, que en la mayoría de los casos son solubles y por lo tanto, se eliminan del concreto haciendo a éste cada vez mas poroso (produciendo oquedades) y con mayor superficie expuesta al ataque. Excluyendo entre estos a los ácidos oxálico y fosfórico que no producen sales solubles en el agua y por lo tanto no son eliminables. Por otro lado, los ácidos también atacan a los agregados calizos.<sup>6</sup>

El grado de ataque de los ácidos dependerá de su Ph o potencial de hidrógeno que presente la solución del ácido. Así, de acuerdo a su Ph podemos decir que los ácidos de Ph 6.5 y 5.5 son débilmente agresivos, los de Ph de 5.5 y 4.5 son fuertemente agresivos y los menores de 4.5 son altamente agresivos. Ver tabla 1.3.

Aparte del Ph la velocidad de reacción dependerá de la solubilidad de las sales cálcicas que resulten de las reacciones. Entre menos solubles sean estas sales más fuerte será el efecto pasivante de las sales precipitadas.

Si las sales producidas son solubles la velocidad de reacción dependerá de la velocidad en que las sales sean disueltas y si el elemento de concreto esta en un recinto estanco donde no se eliminen las sales su vida será mayor que si lo esta en un medio fluido.

Desde el punto de vista de su naturaleza podemos considerar a los ácidos inorgánicos y a los orgánicos.

#### 1.2.3.1. ÁCIDOS INORGÁNICOS

La quema de muchos combustibles da como producto gases sulfurosos  $\text{SO}_2$  que con la humedad del ambiente forman ácido sulfúrico.

Las aguas que drenan de las minas y de actividades industriales pueden contener o formar ácidos que ataquen al concreto. O como en el caso de determinadas piritas que al oxidarse forman sulfatos que atacan al concreto.

Las aguas de montaña suelen ser muy puras pero por lo general llevan disuelto  $\text{CO}_2$ , por tanto, contiene un grado de acidez y puede atacar al concreto aunque la mayoría de las veces superficialmente. Las zonas de industrias y las urbanas suelen tener  $\text{CO}_2$  y ácido sulfuroso que al pasar en presencia de bacterias a ácido sulfúrico puede atacar al concreto enérgicamente.

Entre los ácidos inorgánicos se pueden considerar como peligrosos son:

*Acido sulfúrico y el ácido sulfuroso, que producen sulfato cálcico y por tanto etringita,*

El *ácido clorhídrico, ácido nítrico, ácido sulfúrico y ácido carbónico*, que generan sales solubles que se eliminan por lixiviación.

El *ácido brómico y el ácido crómico* menos frecuentes pero actúan atacando también al concreto.

El *ácido fosfórico* reacciona con el *hidróxido cálcico* dando lugar a una capa de *fosfato* insoluble que protege al concreto de otros ataques y el *ácido fluorhídrico* que da fluoruro cálcico insoluble y que actúa cerrando los poros del concreto.

### 1.2.3.2. ACIDO ORGÁNICOS

Entre los ácidos orgánicos se puede considerar por su carácter agresivo:

El *ácido acético* que encuentra en los vinos y vinagres y que con el hidróxido de cálcico da lugar a la formación de acetato cálcico.

El *ácido láctico* que se encuentra en los residuos de la industrias lácticas y que dan lugar a la formación de lactatos solubles.

El *ácido oxálico* que forma oxalatos insolubles que protegen al concreto cerrando sus poros por lo que se emplea como protector superficial.

El *ácido tánico* es débil y poco agresivo.

El *ácido húmico* es ácido débil que se encuentra en las zonas pantanosas y que puede perjudicar el concreto en su fraguado y endurecimiento si éste este se mezcla con aguas que lo contengan.

#### 1.2.4. EL ATAQUE POR AGUAS PURAS

Las aguas puras son las que tienen gran capacidad de disolución, fruto de su bajo contenido en cal, en sales disueltas y baja alcalinidad siendo su agresividad dependiente de la pureza que posean esta agua. Un ejemplo de estas son las aguas de deshielo o las blandas.

Suele suceder que además de ser aguas blandas sean aguas ácidas ya que muchas veces contienen disueltos ácidos como el anhídrido carbónico o sulfuroso, por lo que su poder corrosivo se ve incrementado.

El agua desmineralizada, destilada o procedente de deshielo tienen el poder de disolver la cal. Esta agua ataca disolviendo el hidróxido de cálcico del concreto haciéndolo cada vez más poroso, permeable y menos resistente y a su vez se reduce la reserva alcalina del mismo.

Si el agua se mantiene en constante renovación el concreto se verá en un ataque más intenso.

Los concretos muy compactos y hechos con cementos puzolánicos, fijan la cal, muestran un mejor comportamiento frente a este ataque, y mejor que los poco compactos y hechos con cemento portland los cuales son ricos en silicatos tricálcicos que liberan mucha cal.

#### 1.2.5. Otros Químicos Agresivos

El hidróxido sódico, no es reaccionable con el concreto, pero cuando se encuentra en concentraciones superiores de 10% y la temperatura es elevada puede producir la desagregación del concreto.

El hipoclorito cálcico, aun siendo de carácter básico, si se encuentra en concentraciones elevadas y si el concreto es muy poroso puede ser atacado por este.

Los jugos de las frutas, ya que contienen ácidos orgánicos, pueden atacar al concreto dependiendo del grado y naturaleza del ácido que contengan. Lo mismo sucede con el azúcar, que ataca al concreto más agresivamente en cuanto más penetra a la masa.

La leche no es peligrosa pero si los derivados ácidos de ella, por el ácido láctico que contienen, es por eso que se debe proteger el concreto, en especial los de los suelos donde se producen derrames.

Los aceites y grasas que provienen del petróleo no contienen ácidos y por lo cual, no son agresivos, pero dada su poder de penetración suelen filtrarse en el concreto y restan adherencia a los agregados con la pasta por lo cual, a resistencia mecánica del concreto se ve disminuida. Además el

petróleo en estado natural llega a tener altos contenidos de sulfatos, azufre que llega a ser muy corrosivo en el concreto.

Las aguas residuales industriales suelen tener agentes agresivos, aunque su agresividad dependerá de los componentes de las mismas y de la concentración, por lo que es necesario analizar el tipo de agua antes de recomendar el tipo de tubería que conducirá esta agua o el tipo de recubrimiento a utilizar si es el caso de tuberías de concreto.

La urea que se utiliza mucho en la industria de fertilizantes, ataca más físicamente al concreto, con la formación de sus cristales en los poros del concreto.

El alcohol metílico y el alcohol etílico son agresivos en el concreto. La glicerina y el glicol son moderadamente agresivos, provocando la formación de sales soluble de cal.

Los aldehidos no son agresivos, pero la disolución de formaldehidos provoca la formación de ácido fórmico que es moderadamente agresivo.

### 1.3. ABRASIÓN Y EROSIÓN

El comité ACI 116 a considerado que la abrasión es el desgaste producido por acciones de frotamiento y fricción en tanto que la erosión corresponde a fenómenos de desintegración causados por gases, líquidos o sólidos en movimiento. Por lo que se considera por separado la abrasión que sería de un carácter mecánico y la erosión por movimiento de fluidos.<sup>7</sup>

#### 1.3.1. ABRASIÓN. (RESISTENCIA A LA ABRASIÓN)

El fenómeno de la abrasión se presenta en el concreto como un desgaste, producido por el rozamiento de la superficie. Como se presenta en los pisos de instalaciones industriales por la acción del tráfico, el impacto o deslizamiento de materiales sueltos, etc., lo cual produce un desgaste del concreto, dejando una superficie suave, deslizante y en muchas ocasiones la destrucción del concreto.

La resistencia del concreto a la abrasión es la capacidad que tiene este para soportar el desgaste que se produce en la fricción o frotamiento. Cabe mencionar que la resistencia al desgaste de un concreto está relacionada con la resistencia a la compresión del mismo. Cuando se trata de abrasión por rozamiento, como puede ser el caso de pavimentos industriales, la resistencia al desgaste de los

agregados tiene una influencia superior que la resistencia a la compresión del mismo concreto, pero si se trata de acciones de percusiones de objetos pequeños o de partículas, la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados toma un papel más importante.<sup>6</sup>

De acuerdo a grado de deterioro se tiene que:

En pavimentos y pisos de concreto expuestos a la circulación de vehículos todo tipo con ruedas de hule, vehículos ligeros con ruedas metálicas y personas, utilización de superficies como área de maniobras ligeras en industrias; tienen un grado de abrasión mediano o ligero.

En el caso de pavimentos sometidos al tránsito de vehículos pesados, equipados con cadenas antiderrapantes, y en plataformas que son para tránsito de carga pesada como en zonas de carga y descarga en los puertos.; estos tienen un grado de abrasión enérgico.

Y en el caso de pavimentos destinados para maniobras pesadas, en donde se requiere de vehículos provistos de orugas, o donde se manejen cargas pesadas y se tengan que arrastrar dichas cargas, como es el caso de los patios de aserraderos; aquí el grado de abrasión es muy severo.

Para conseguir que un concreto sea durable el cual está sometido a condiciones fuertes de abrasión, como en el caso de los pavimentos de instalaciones industriales, suele emplearse capas superficiales de mortero especial en los cuales se emplean agregados de coridón, bauxita e incluso metálicos, algunas veces cuando aparte de estar expuestos a la abrasión son también atacados por agentes químicos la protección más recomendable suele ser el empleo de mezclas de resinas sintéticas en capas que suelen tener un espesor de 3 a 5 mm.

### 1.3.2. EROSIÓN

La diferencia entre la erosión y la abrasión es que la erosión está en el deterioro provocado por la acción de un fluido y por la desintegración del concreto. Pero esto no es general ya que en ocasiones las acciones abrasivas son capaces de desintegrar el concreto, de igual forma, algunas veces las erosiones generadas por fluidos se inician con el desgaste de la superficie que se produce por la acción abrasiva de las partículas que son arrastradas por el fluido. De tal forma que la abrasión mecánica sea considerada para pisos y pavimento y la erosión hidráulica en el caso de las estructuras en las cuales se encuentren en contacto con fluidos en movimiento.<sup>9</sup>

Si bien la erosión por abrasión se debe al efecto de desgaste que se produce por los arrastres de distintos materiales en el agua, y por la erosión que se produce por el efecto de cavitación.

Los efectos producidos en la superficie del concreto por acción de la erosión hidráulica, no son muy diferentes a la abrasión mecánica en un piso o pavimento. Es decir, la primera suele consistir en el desgaste de la superficie del concreto (en la capa de la pasta del cemento) lo cual deja expuesto el agregado grueso; a partir de aquí la rapidez del deterioro dependerá de la calidad de los agregados, además de la interacción de los agregados con la pasta y la intensidad de la erosión o abrasión, las cuales están definidas por la cantidad, tamaño y abrasividad de los cuerpos arrastrados por el flujo y también por el régimen, gasto y velocidad de éste.

Por lo tanto, se entiende que la capacidad para resistir las acciones abrasivas y erosivas de carácter hidráulica, depende también de los factores que determinan la resistencia a la abrasión mecánica como son: la relación agua/cemento, las características de los agregados y de las prácticas constructivas.

La relación agua cemento influye en la capacidad de la capa superficial de pasta de cemento de concreto y en la relación de la pasta con los agregados.<sup>5</sup> Así entre mayor sea la relación agua cemento en la pasta mayor será la pérdida por abrasión.

Las características de los agregados que más influye en la erosión por abrasión hidráulica del concreto son: la granulometría, en particular el contenido de finos indeseables (los menores a 75 micras), la forma y textura superficial de las partículas y la resistencia al desgaste de las rocas que las constituyen. Los finos menores a 75 micras son indeseables ya que estos incrementan el requerimiento de agua en la mezcla y los cambios volumétricos en el concreto, pero también debido a su reducido tamaño que son del mismo orden que los granos del cemento, estos se incorporan a la pasta y degradan la calidad en todos sentidos. En la norma ASTM C 33/ NOM C-111 establecen límites para el contenido máximo permisible de estos finos indeseables en la arena, las cuales son más estrictas cuando el concreto estará destinado a estar expuesto a la abrasión.<sup>10</sup>

Por otro lado la textura y la forma de los agregados gruesos son muy importantes para el comportamiento del concreto expuesto a la erosión. Comparando dos casos extremos, siendo en los dos casos rocas de buena calidad, un agregado natural que posee formas redondeadas y su textura es lisa presentan más resistentes al desgaste pero con muy poca adherencia, en cambio los agregados deficientemente triturados y cuyos fragmentos son muy angulosos y ásperos tiene más adherencia con la pasta pero son menos resistentes a los efectos erosivos y abrasivos. Por lo tanto se necesita optimizar, es decir, los agregados más favorables serían los de formas cúbicas y superficies ligeramente ásperas. Por lo tanto para concretos en los que los efectos erosivos estarán presentes se recomienda el uso de agregados gruesos con un adecuado procedimiento de trituración y si son agregados naturales de forma redondeada, se recomienda hacerlos pasar por un proceso parcial de trituración, de tal forma que se tenga un agregado mixto.



Las practicas constructivas, como se vio en la parte de abrasión, suele ser una de las causas del deterioro por erosión. Para obtener un a correcta resistencia a la erosión se recomienda cuidar que no ocurra un excesivo asentamiento y sangrado en el concreto fresco, también se deberá dar el terminada adecuado para las condiciones de exposición a las que se someterá y también dar un curado adecuado al concreto y durante el tiempo que sea posible.

Ahora bien, la erosión por cavitación es definida por el ACI 116 como "una picadura ocasionada por la súbita irrupción del aire en un espacio que se encuentra a menor presión que la atmosférica, es decir el colapso de las burbujas de vapor en el flujo del agua, que es forman en áreas de baja presión". El ACI 210 R-87, dice que las burbujas se forman en los cambios bruscos de pendiente de la superficie del concreto que dan servicio en contacto con el flujo de agua en alta velocidad, ya que estos cambios bruscos provocan que el flujo se desprege de la superficie, formando vacíos, o baja presión. De tal modo que el daño por cavitación se produce aguas debajo de la zona de baja presión como se ve en la figura siguiente.

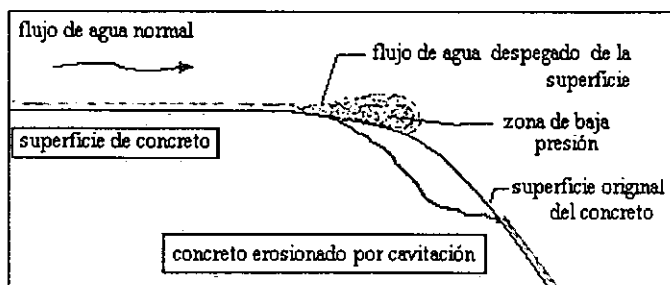


Fig. 1.1. Fenómeno de erosión por cavitación.

Existen más características de la superficie de concreto que provoca cavitación.

Como ya se ha mencionado los cambios de pendiente con o sin curva, provocan cavitación, estos cambios de pendiente son derivados de un diseño hidráulico inadecuado para las condiciones en las que estará trabajando la estructura, sumándole a esto las especificaciones deficientes. Otra causa, son la irregularidades de las superficie, ya que las protuberancias y depresiones que están fuera de la tolerancia de las especificaciones y no cumplen con los requisitos geométricos. También las superficies que son muy irregulares y ásperas suelen causar cavitación, dicha irregularidad de la superficie es causada por la abrasión de los sólidos que son arrastrados por el flujo del agua.

## 1.4. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

A nivel macroscópico el concreto armado puede ser considerado como un material compuesto constituido por dos fases, concreto y acero, entre las cuales existe, además, una interfase perfectamente definida, a través de la cual se vinculan por medio de la adherencia, otorgando así integridad a esta unión.

Las propiedades características del concreto armado son el resultado de la suma de las características de sus componentes. Por ejemplo, la pequeña resistencia a la tracción y lo frágil que resulta ser el concreto simple se compensan por la elevada resistencia a tracción y la ductilidad propias del acero.

Desde un punto de vista mecánico, ésta complementación de estos materiales es posible gracias a la buena adherencia entre ambos, y se favorece por la similitud de sus coeficientes de dilatación térmica.

Viéndolo desde un punto de su lado químico, el concreto, como único material exterior, contiene y protege a las armaduras contra la corrosión, dando así la durabilidad del compuesto.

### 1.4.1. MECANISMO DE LA CORROSIÓN EN EL ACERO.

En el hormigón armado aunque se trata de un mismo material (hierro), no habría diferencia de potencial por distinta naturaleza o composición del electrodo. No obstante, esto no es así, ya que las diferencias granulares del metal o bien diferencias de tensión mecánica pueden provocar diferencias de potencial.

La medición directa de esta diferencia de potencial es prácticamente imposible por lo que, en la práctica, resulta mucho más sencillo formar una pila o celda galvánica con dos electrodos y medir la diferencia de potencial entre ambos.

Suponiendo un trozo de hierro sumergido en un electrolito, representado por el agua de poros presente en la pasta de cemento hidratada, con una diferencia de potencial a lo largo de la barra. Los electrones circularán desde la zona de mayor potencial (ánodo), hacia la de menor (cátodo). Sin embargo, para ello será preciso además, que el circuito pueda cerrarse



Fig. 1.2. Acero expuesto por acción de proceso corrosivos

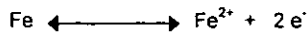


Fig. 1.3. Acero expuesto por acción de proceso corrosivos.

internamente a través del electrolito, lo que se logrará si esos electrones pueden consumirse por alguna reacción del cátodo.

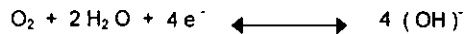
#### *Reacción Anódica*

En el ánodo se produce la disolución del hierro Fe (corrosión). Mientras los cationes  $Fe^{2+}$  pasan a la solución de poros del concreto, los electrones recorren la armadura hasta llegar al cátodo:

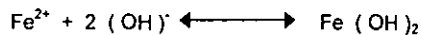


#### *Reacción catódica*

Los electrones generados en la reacción anódica son capturados por los constituyentes del electrolito y se combinan con el oxígeno y el agua para formar iones oxhidrilo:



Los iones  $OH^{-}$  viajan a través del electrolito y se combinan con los iones  $Fe^{2+}$  para formar hidróxido ferroso.



Como el hidróxido ferroso es prácticamente insoluble precipita y retira los iones  $Fe^{2+}$  y  $(OH)^{-}$  del electrolito, por lo que las reacciones anódica y catódica se desequilibran y actúan hacia la derecha.

La formación del  $Fe (OH)_2$  requiere movilidad de los iones en el electrolito para que estos entren en contacto y reaccionen. Los iones  $Fe^{2+}$  por ser de menor radio, se difunden más rápidamente que los iones  $(OH)^{-}$  que son de menor tamaño.

Además, solamente un ion  $Fe^{2+}$  debe migrar hacia el cátodo por cada dos iones  $(OH)^{-}$  que deberán ir hacia el ánodo.

Por eso la corrosión (disolución) se produce en el ánodo mientras que los productos de ésta (herrumbre) se depositan en el cátodo.

La transformación de hierro metálico en herrumbre es acompañada por un importante aumento de volumen que depende del estado de oxidación del metal, el cual, a su vez, es función, entre otros factores, de la disponibilidad de oxígeno y del pH de la solución.

Este aumento de volumen provoca fuerzas expansivas que pueden dar lugar a la aparición de fisuras importantes y desprendimientos del concreto de recubrimiento.

Se cree que para existir daños severos en el concreto armado debido a la corrosión tiene que haber la presencia de fisuras o grietas, lo cual no es cierto. El acero puede presentar corrosión aun si el concreto no esta agrietado, cuando este se encuentra en condiciones de exposición severa y si el recubrimiento es insuficiente.

El agrietamiento que va hasta la parte interior de la superficie, contribuye a la corrosión, ya que permite una mayor entrada a la humedad, al aire y a los contaminantes.

Los agrietamientos estrechos que van en sentido perpendicular a la dirección del acero del armado, por lo general no provocan corrosión seria, solo si las condiciones de exposición son serias, ya que en el caso de presentarse corrosión sería de extensión corta y superficial. En cambio las grietas mas anchas y que van paralelas al material embebido en el concreto pueden proporcionar más contacto entre el acero y los elementos corrosivos (cloruros, agua, aire, etc.) por lo que la corrosión es acelerada.

#### 1.4.2. CONDICIONES NECESARIAS PARA LA CORROSIÓN

##### Diferencia de potencial

En función de la fuente de potencial eléctrico que causa el flujo de corriente en el circuito encontramos tres tipos de celdas o pilas:

- **Pilas de composición:** Las celdas o pilas de composición, o sea las formadas por dos metales diferentes, habitualmente no se presentan en el concreto armado, salvo cuando hay otro metal embebido en él, por ejemplo magnesio, aluminio o cobre. Los dos primeros poseen potenciales de oxidación más altos que el hierro, razón por la cual, de existir un contacto con las barras, se comportarían en forma anódica, obligando al hierro a actuar como cátodo. De éste modo, serían ellos y no el acero los que sufrirían la corrosión. Lo contrario ocurriría con el cobre.
- **Celdas de tensión:** Las celdas por tensión se presentan cuando un mismo metal contiene regiones sometidas a diferentes esfuerzos locales. En general, la presencia local de tensiones mecánicas residuales en la superficie del metal puede dar carácter anódico a esas zonas con relación al resto.

- Celadas de concentración: Se desarrollan debido a las diferencias de composición del electrolito (concreto). En el caso de concreto armado, pueden deberse a diferencias en la aireación, concentración de cloruros, en la alcalinidad Ph, distinto acceso de bióxido de carbono CO<sub>2</sub>, etc..

Es necesaria la conexión eléctrica directa entre ánodo y cátodo a través de un conductor ajeno al electrolito. En el caso del concreto armado ese conductor son las barras de acero.

Los electrodos pueden pertenecer a la misma barra, o también se puede lograr la conexión a través de puntos de contacto por ejemplo mediante los estribos y los amarres.

### Porosidad

El concreto debido a su constitución el concreto tiene muchos poros que permiten que agentes líquidos y gaseosos penetren en él. La porosidad depende de la calidad con que fue elaborado el concreto, la cual depende de la forma fue diseñado, de su mezclado, transporte y colocación y curado, es decir, que un concreto de baja permeabilidad dependerá de su diseño y practicas constructivas, así como de los componentes de la mezcla.

### Humedad en el concreto:

La presencia de humedad en el concreto no sólo es necesaria para producir la reacción catódica, sino también es esencial para dar la conductividad eléctrica al concreto, de modo que éste actúe como un electrolito y a través de él se cierre el circuito electroquímico.

### Acceso de oxígeno al cátodo:

Al igual que la humedad, la presencia de oxígeno a nivel de la interfase acero concreto es necesaria para producir la reacción catódica que impulsa la corrosión. El acceso de oxígeno dependerá, de su presencia en el medio que rodea al concreto y de la impermeabilidad de éste en el recubrimiento.

La impermeabilidad específica del concreto de recubrimiento al oxígeno, depende de la calidad de éste, es decir, de su relación a/c, del curado, de su espesor y del contenido de humedad del concreto.

En ambientes permanentemente secos ( relación de humedad < 60 % ) el riesgo de corrosión es bajo, aún cuando el concreto esté carbonatado, dado que el proceso electrolítico está impedido (elevada resistividad de concreto). En el caso de concretos con elevados contenidos de cloruros, el proceso

corrosivo es posible debido al efecto higroscópico de los cloruros, que aumentan el contenido de agua en el concreto.

En concretos permanentemente saturados en agua el riesgo de corrosión es bajo debido a la carencia de oxígeno en el ambiente, aún cuando esté fuertemente contaminado con cloruros. Un ejemplo de lo anterior se da en estructuras construidas en el mar a altas profundidades las cuales aun que estén en contacto con un medio con contenidos de cloruros altos, por la falta de oxígeno la estructura no sufre ningún daño severo por corrosión.

Si el elemento estructural está sólo parcialmente saturado o sumergido, se debe tener en cuenta además el posible riesgo de que distintas zonas de superficie del acero actúen en forma anódica y catódica (celdas de concentración).

Falla de la película protectora:

El acero embebido en el concreto está protegido contra la corrosión por pasivación. Esto significa que sobre la superficie del acero se forma una delgada capa de óxido de hierro, firmemente adherida a la superficie del mismo.

Esta película impide la disolución de hierro, imposibilitando así la ulterior corrosión de las armaduras.

Si la solución de poros del concreto se encuentra libre de iones cloruros, la estabilidad de la capa protectora se encuentra garantizada mientras el pH de la solución sea superior a 11.5.

Otro aspecto importante es la calidad del concreto en el recubrimiento definida en términos de espesor y permeabilidad.

Además de todo lo expuesto anteriormente, la deterioración del concreto puede darse por el ataque de ácidos, por ciclos de congelamiento y deshielo, etc., lo cual provocaría que el concreto se encuentre agrietado o debilitado, de tal manera que no podría brindar la protección suficiente a los materiales embebidos en el.

Además del acero existen diferentes materiales que sufren los efectos de la corrosión cuando se encuentran ahogados en el concreto como son:

Aluminio. Si el concreto contiene acero en contacto con el aluminio, o si existen cloruros en concentraciones elevadas o si el cemento contiene un alto contenido de álcalis, se generan las condiciones para que el aluminio sea corroído. También si el área de acero es mayor en comparación el área de aluminio, particularmente en presencia de cloruros, se aumenta la corrosión del aluminio.

Plomo. Al ahogar plomo en concreto fresco puede ser atacado por el hidróxido de calcio presente en el concreto y destruirse al poco tiempo. Y si esta en contacto con el acero el ataque puede ser más rápido. Por lo que se recomienda recubrimientos de material bituminoso plástico, o algún otro material que no sea afectado por el concreto fresco.

Cobre. Este metal se corroe en presencia de amoníaco y de nitratos, lo cual al corroerse provoca agrietamientos, o si el concreto contiene acero que esta en contacto con el, siendo el acero el que se corroa. (por diferencia de potenciación).

Otros metales como el cromo, níquel, plata y estaño en sus aleaciones, suelen tener resistencia a la corrosión, pero en algunos casos esta resistencia puede verse disminuida por la presencia de cloruros solubles de agua de mar o por sales descongelantes.

### 1.5. REACCIONES QUÍMICAS DE LOS AGREGADOS

El deterioro prematuro del concreto en la mayoría de los casos se debe a acciones de origen externo como es el ataque de sulfatos, congelación y deshielo, intemperismo, ataque químico, etc., pero también hay acciones que son de origen interno, ya sea por la inadecuada calidad de los componentes o por su incompatibilidad de estos para su funcionamiento en la masa de concreto.

El deterioro por acciones externas suele manifestarse en la estructura mientras que los deterioros por causa internas se localizará en todo el concreto afectado. Por lo que, una estructura afectada por causas externas suele rehabilitarse, restaurando la zona que ha sido afectada y si es posible eliminando el agente, que causa el deterioro, o sus efectos. En el caso de las estructuras donde la causa de deterioro es interior, no suele tener compostura definitiva y solo se le pueden dar remedios temporales que atenúen parcialmente los efectos alargando un poco la vida útil.

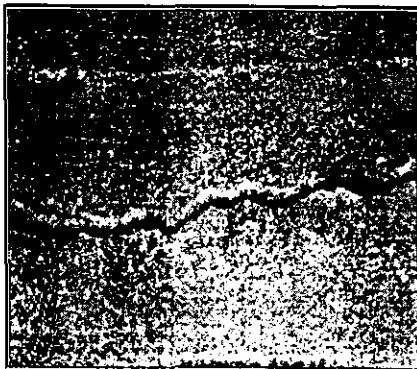


Fig. 1.4. Agrietamiento causado por una reacción álcali de los agregados

El deterioro por causas internas suele no ser tan frecuente en comparación con el causado por las externas, pero suele ser el que tiene las repercusiones más importantes, tanto técnicas como económicas, ya que frecuentemente significa la inhabilitación total de las estructuras, en un periodo relativamente reducido.

Una de las causas del deterioro prematuro de origen interno en las estructuras son las reacciones que se producen entre algunas rocas y minerales que constituyen a los agregados, y los álcalis que se generan en la pasta de cemento hidratado. Esto se da cuando estos componentes del concreto poseen ciertas características que los hace inconciliables para permanecer en contacto continuo y permanente.

Los efectos de las reacciones álcali agregados se manifiesta por un aumento de volumen la cual se traduce en tensiones internas capaces de agrietar el concreto y con el tiempo el deterioro significativo de la estructura.

### 1.5.1. CONDICIONES PARA EL DESARROLLO DE LAS REACCIONES ÁLCALI AGREGADO

Las condiciones para que se produzcan las reacciones álcali-agregado son:

1. Los agregados deberán contener rocas y minerales que reaccionen con los álcalis, y encontrarse en cantidades que sean desfavorables de acuerdo con su naturaleza. (más del 0.6%, expresado como óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )).
2. El concreto deberá contener una cantidad suficiente de álcalis para que genere una reacción deletérea con los agregados.
3. Las condiciones de servicio de la estructura deberán de ser tales que se encuentre un alto contenido de humedad en el concreto, ya sea en forma permanente o alternada, es decir, con periodos de secado y periodos de humedad.

De acuerdo a estas condiciones se puede ver en el siguiente cuadro los grados de riesgo de que produzca una reacción álcali agregado en el concreto:

Condición		Alto Riesgo	Mediano Riesgo	Bajo Riesgo	Sin Riesgo
1	Contenido de agregados que reaccionen con álcalis	Reactivos	*	*	*
		Inocuos			*
2	Álcalis suficientes para reaccionar deletéreamente	Altos álcalis	*	*	*
		Bajos álcalis			*
3	Condiciones de servicio de la estructura	Húmedo	*	*	*
		Seco		*	*

Tabla 1.4. Clasificación de condiciones de riesgo de álcali



De acuerdo a la tabla anterior solo en el caso de que los agregados no tengan minerales o rocas que reaccionen con los álcalis del cemento hidratado, solo en este caso se no existirá riesgo de deterioro por reacciones álcali-agregado, es decir, solo en el caso de que los agregados sean inocuos. De aquí radica la importancia de determinar si un agregado es inocuo o reactivo.

La reacción álcali-agregado se debe principalmente a dos elementos:

- Los álcalis (óxido de sodio y de potasio) y normalmente se deben al cemento portland.
- Y algunas rocas y minerales que a veces se encuentran en los agregados.

A estos dos podríamos sumarle un tercero que sería la humedad, que vendría a ser un agente excitador en la reacción. Aunque en realidad la humedad es inevitable en edades tempranas del concreto, pero no es así posteriormente. También dependerá de las condiciones de exposición a la que se encontrará la estructura..

#### 1.5.2. TIPOS DE REACCIÓN

Se sabe que existen varias rocas y minerales que reaccionan con los álcalis y que pueden producir expansiones que deterioran el concreto paulatinamente y sin que se pueda hacer algo por evitarlo. Existen determinadas características entre estas rocas y minerales que permite clasificarlas en tres grupos principales, los cuales dan origen a tres tipos de reacciones del tipo álcali-agregado.

Entre la reacción álcali - sílice y la álcali - silicato no parece haber gran diferencia, solo que la primera reacciona con mayor rapidez que la segunda debido a que los minerales reactivos (silicatos poliformicos) están más compactos en la matriz. Por lo cual suelen emplearse las mismas pruebas para clasificar el tipo de reacción, solo que sería recomendable extender el período de prueba para emitir el juicio definitivo de la reactividad con base en las expansiones registradas, hasta 12 meses en vez de los 6 meses que se usan para las rocas que contienen sílice. Es decir, cuando se tenga la certeza de que se trata de agregado a capases de generar reacciones deletéreas.

En la pasta de cemento en un estado húmedo, los poros son ocupados por una solución que es de carácter básico, es decir, que tiene un ph alto, en este caso mayor de 12, lo cual se debe a la cantidad de hidróxidos tanto de potasio como de sodio ( KOH y NaOH), que son metales llamados alcalinos.

Dicha solución de poro es uno de los elementos por lo cual se genera las reacciones álcali-agregado, al reaccionar con las rocas y minerales, de las que se derivan las diferentes reacciones (álcali-silice,

álcali-caarbonato, álcali-silicato). Pero, para que la reacción genere una expansión que deterioren al concreto se necesita que la solución de poro presente un grado de alcalinidad, el cual se define por el contenido de hidróxidos alcalinos, y que exceda un cierto nivel de riesgo el cual varía por la forma de la reacción.

Por lo general los hidróxidos de sodio y de potasio del fluido de poro provienen del cemento al hidratarse, pero en algunos casos los agregados también los contienen, además de estar contenidos en el agua de mezclado o aditivos que se utilicen y en puzolanas. Por lo que hay ocasiones que no importa que se utilice cemento bajo en álcalis ya que pueden ser aportados por algún otro de los elementos de la mezcla. Por lo que para prevenir el riesgo de que ocurra, es limitado preferiblemente el contenido de álcalis del concreto, realizando la suma de las aportaciones de álcalis de cada uno de los componentes de la mezcla de concreto en función de su proporción. Por lo que se recomienda no exceder de 3kg de álcalis solubles en 1 m<sup>3</sup>, cuando se emplean agregados que son reactivos, aunque en condiciones de alto riesgo es recomendable trabajar con un contenido menor.

Uno de los factores para que alcance un grado de deterioro el concreto por causa de las expansiones producidas por las reacciones álcali agregado es la existencia de suficiente humedad interna en el concreto, no solo para que exista la solución de poro, sino también para proveer el agua que requieren los productos de la reacción para producir expansión.

En las reacciones álcali sílice y silicato producen un gel que tiene alto contenido de sodio Na, el cual toma agua de su entorno para generar expansión, de tal forma que al existir humedad el gel sigue aumentando de volumen. Si bien al inicio de la reacción las expansiones pueden ser absorbidas por los poros de la pasta hidratada y entre los intersticios de la misma, si esta reacción continúa y si sigue existiendo humedad en el concreto; lo cual provocaría que se generarán presiones internas que agrietan el concreto.

En cuanto a la reacción álcali carbonato, los efectos de los álcalis de la solución de poro consiste en la desdolorización de las rocas calizas dolomíticas y arcillosas, lo que se evidencia por la formación de "brucita" que es un mineral con la composición del hidróxido de magnesio (Mg(OH)<sub>2</sub>). Además de la desdolorización los minerales arcillosos de tal forma que quedan expuestos a la humedad que la rodea y se expande.

Es sabido que en la elaboración de concreto normal se emplea agua en cantidades superiores a las que se requiere para hidratarse, por lo que es evidente la existencia de excedentes de agua libre, es decir, que no se combina con el concreto, que permanece en los poros del concreto endurecido; pero también se sabe que con el tiempo y debido a diversas causas como la evaporación dichos excedentes van desapareciendo, lo cual solo es diferente si el concreto se encuentra en contacto con

el agua continuamente, reponiendo desde el exterior el agua del interior del concreto. Por lo que es de suponer que las estructuras que presten servicio en contacto con agua son las que presentan las condiciones necesarias para tener un grado de humedad en el concreto suficiente para que se desarrolle la reacción álcali - agregado, y que a diferencia las estructuras no expuestas al contacto con el agua, tarde o temprano se termina la humedad que se requiere para la que se presenten los efectos de deterioro por las reacciones álcali - agregado.

En investigaciones realizadas por el ACI en 1991, se reviso el estado de humedad del concreto afectado por la reacción álcali - sílice, en varias estructuras, condiciones de exposición y de servicio. Para lo cual llegaron a 4 conclusiones:<sup>9</sup>

- La primera es que para mantener la reacción álcali - sílice en expansiones que causen daño, se requiere que la humedad relativa en el concreto sea de por lo menos el 80%, relacionada con una temperatura de 21 a 24 °C.
- En la gran mayoría de las condiciones climáticas, la humedad del concreto es suficiente para mantener la reacción.
- En las estructuras que prestan servicio en condiciones áridas o desérticas no expuestas a humedad, pueden mantener un grado de humedad restringido, siempre y cuando no cambien las condiciones.
- Las estructuras de concreto masivo aun en condiciones desérticas pueden contener e humedad interna suficiente para mantenerla reacción álcali - agregado, y consecuentemente la manifestación de los efecto expansivos.

De lo anterior puede admitirse que para el inicio, desarrollo y sostenimiento de una reacción álcali sílice en el concreto con agregados reactivos y alta concentración de álcalis en la solución de poro, no resulta necesario que la estructura se encuentre en contacto continuo con el agua, aunque esta condición asegura que se tenga más del 80% de humedad relativa. También resulta algunas veces riesgosa la humedad ocasional, ya que los periodos de secado y humedad provocan el transporte de álcalis hacia las superficies donde el agua se evapora, con lo cual se generan zonas en las que la solución de álcali aumente en su concentración. Lo cual da como resultado un aumento del riesgo de que se produzca una reacción álcali - agregado con efectos deteriorantes.

### 1.6.1. CONGELAMIENTO Y DESHIELO

#### 1.6.1. CICLOS DE CONGELACIÓN Y DESHIELO

Los ciclos de congelación y deshielo es uno de los ataques físicos al concreto más severos en donde los concretos de menor calidad fallan, en cambio los concretos que han sido diseñados con contenido de aire, con una dosificación correcta, colocados y mezclados correctamente, además de un curado adecuado soportan mejor los ciclos de congelación.<sup>4</sup>

Aunque aun en condiciones poco comunes como en el caso de mantenerse en condiciones de saturación casi completa, suele sufrir los embates de los ciclos de congelación. También debe tomarse en cuenta que el concreto que tiene diferencias de exposición puede tener comportamientos muy variables en extremo, que van desde la falla hasta el que no afecte para nada.

#### 1.6.2. MECANISMO DE CONGELACIÓN

El agua al congelarse incrementa su volumen en aproximadamente un 9%. Si el agua ocupa parcialmente los poros del concreto y el espacio que ocupa el aire es mayor o igual al ocupado por el agua, en esta caso las expansiones serán absorbidas, es decir, el espacio será suficiente para que no se produzcan tensiones en el concreto que pueden dañarlo; por el contrario si el grado de saturación es superior al 91% (crítico), el espacio será insuficiente y se producirán tensiones en el concreto que pueden llevarlo al agotamiento. Las expansiones que se presentan durante el congelamiento generalmente disminuyen conforme se aumenta la velocidad de enfriamiento.<sup>4</sup>

En el año de 1945 se expuso la teoría de presión hidráulica, según la cual al iniciar la congelación del agua en la parte interna del concreto, impulsa el agua que aun no se ha congelado a través de la estructuras porosas de la pasta del cemento hidratada, este flujo esta restringido por la permeabilidad de la pasta por lo cual se genera una presión hidráulica que es capaz de rebasar la resistencia a la tensión de la pasta lo cual hace que dicha pasta se agriete.

De acuerdo con esta teoría, el aumento de esta presión es proporcional a la longitud de la trayectoria que tendrá el flujo, estimando que dicha presión alcanza un nivel crítico cuando el flujo debe recorrer a través de la pasta de concreto una distancia mayor a los 0.2 mm. La solución para reducir el daño por congelación consiste en incluir burbujas de aire en la pasta, distribuidas uniformemente, lo cual hace que la trayectoria del flujo del agua será menor a la distancia que se considera crítica y por lo tanto reduce el riesgo de daño por dicha presión hidráulica.

Se debe considerar también que el punto de congelación del agua de saturación disminuye a medida que el tamaño de los poros es menor, lo cual se debe a que el agua se encuentra sometida a una presión de vapor menor conforme se disminuye las dimensiones de los poros. Ahora bien, la estructura porosa de la pasta de cemento está conformada por poros de diferente tamaño, además resulta que la congelación del agua interior del concreto es un proceso gradual que va de los poros más grandes a los más pequeños, favoreciendo el movimiento del flujo en tal sentido. Y además se considera que a menor diámetro del conducto mayor será la presión hidráulica.

El agua de la pasta de cemento está en forma de una solución alcalina ligera, que al llegar el concreto a temperatura de congelación se producirá en él un período de superenfriamiento en el que se forman cristales de hielo en los capilares de mayor tamaño. Como resultado el contenido de álcalis aumenta en la porción de la solución que aun no se ha congelado, provocando la creación de un potencial osmótico que obliga a las moléculas de agua de los poros cercanos a difundirla en los poros congelados. Lo cual da como resultado que la solución que está en contacto con el hielo se diluya, permitiendo así que el hielo crezca aún más. En el instante en que las cavidades están llenas de hielo y solución, cualquier incremento de volumen produce tensión en el concreto, provocando así que este falle.

En el concreto lo peligroso de la congelación son los ciclos alternados con lluvias que suelen saturar al concreto. Aunque para que realmente exista peligro en el concreto debido a estos ciclos es necesario que se encuentre saturado de agua lo cual no es muy frecuente en estructuras de edificios, pero sí en tableros de puentes, canales, presas, pavimentos, etc.

También debe tomarse en cuenta los fenómenos de congelación en las partículas de los agregados, ya que en la mayoría de las rocas tienen los poros aún más grandes que la los de la pasta. Las rocas expiden agua durante la congelación. Existe la teoría que afirma que la causa del deterioro de las rocas es la expansión del agua absorbida (que no se ha congelado). El tamaño del agregado grueso es un factor importante para la resistencia al congelamiento, para cualquier roca natural dada, siempre y cuando no esté confinada por la pasta de cemento, existe un tamaño crítico por abajo del cual puede ser congelada sin sufrir daños. El papel del aire incluido para reducir el efecto de congelamiento en las rocas es mínimo.

Si en el concreto, la pasta que rodea a los agregados no tiene aire incluido, este puede fallar al encontrarse en estado de saturación y sufrir congelamiento. Por otro lado si existe una correcta distribución de los vacíos que forma el aire incluido, y entre ellos exista un espacio de aproximadamente 0.2 mm, el congelamiento no provocará efectos destructivos en el concreto.

Existen algunas rocas que prácticamente no contienen agua congelada. Lo cual el concreto hecho con este tipo de agregados podría tener mejor desempeño aún en condiciones de humedad continua, pero podría acortarse si los espacios vacíos son llenados con agua o material sólido.

Si se usa agregados absorbentes, como los empleados en elementos estructurales ligeros, y el concreto está colocado en un ambiente de continua humedad, el concreto fallará si el agregado se satura. La presión que se desarrolla cuando las partículas expelen agua durante el congelamiento las rompe así como la matriz, y si alguna partícula está cerca de la superficie de concreto, pueden ocurrir estallamientos.

Resulta evidente que cuanto más seco este el agregado cuando se cura el concreto, mayor cantidad de agua deberá recibir para alcanzar el punto de saturación crítica y que tardará más en alcanzar este punto. Esto es importante ya que en algunos lugares el período de humedad es muy corto. Puede ser poco ventajoso el empleo de agregados saturados, por ejemplo que hayan sido extraídos de bancos sumergidos, especialmente si la estructura debe entrar en servicio durante la estación húmeda o al principio de la estación de invierno.

Existen también algunos tipos de rocas que han sido secadas pero que al colocarlas en el agua se saturan con gran facilidad; son de tipo de saturación fácil. Estas aun cuando estén secas al comenzar el mezclado, pueden alcanzar altos niveles de saturación estando en la mezcladora, pero puede ser que no se sequen lo suficiente debido a la acción de la auto- desecación, por lo que pueden presentarse problemas, si no existe un período seco lo bastante largo antes del período de invierno. Este tipo de rocas en la mezcla puede causar problemas (las que son difíciles de saturar), por lo general el agregado grueso causan menos problemas. Por tanto, si se cuenta con los datos de velocidad de saturación serán de gran utilidad para el diseño de las mezclas.

<sup>4</sup>Debe tenerse en cuenta que la velocidad de absorción de los agregados, independientemente de sus características de absorción, está limitada por la velocidad a la cual puede el agua pasar a través de la pasta endurecida, ya que el hecho que el coeficiente de permeabilidad de la pasta endurecida disminuye conforme aumenta su contenido de cemento y conforme haya sido curada en húmedo durante mayor tiempo, se puede disminuir la velocidad de absorción de cualquier tipo de agregado si se reduce la relación agua/cemento de la pasta y especificando la necesidad de un buen curado.

### 1.6.3. EL EMPLEO DE SALES DESCONGELANTES

Se hizo común remover el hielo de la superficie de los pavimentos mediante el 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 desprendimientos.

El ataque incluye el desarrollo de presiones osmóticas e hidráulicas destructoras durante el congelamiento. Estas presiones se desarrollan en la pasta y son similares a las que se desarrollan debido a la acción ordinaria del frío, que se describió anteriormente.

Las sales descongelantes provocan un alto grado de saturación en el concreto, es por ello que afecta al concreto. Las soluciones salinas tienen menor presión de vapor que la del agua, por lo que secado entre el humedecimiento y el congelamiento es muy pequeño si es que existe. Es por lo que el aire incluido ayuda, al igual que en los ciclos de congelación y deshielo, a soportar la saturación del concreto.

## REFERENCIAS

1. Ing. Luis García Dutari, "Durabilidad, Patología y Rehabilitación de Estructuras de Hormigón". Su Valor en el Proceso de Enseñanza Aprendizaje.
2. Patología, Refuerzo y Rehabilitación de Estructuras de Hormigón Armado. Curso Monográfico. INTEMAC. Octubre de 1992.
3. Comité ACI 201, "Guía para la Durabilidad del Concreto", (Suplemento Mexicano), primera versión elaborada por el grupo de trabajo número 1 sobre durabilidad del concreto, de la sección México centro y sur. Manuel Mena Ferrer (coordinador), Alejandro Graf López, Carlos Gómez Toledo, Luis García Chowell, Roberto Uribe Afif, 1996.
4. ACI-201,"Durabilidad del concret", informe del comité 201, Thomas J. Reading Presidente, Cameron Macinnis secretario, 1975.
5. Powers, T.C., "Resistance of Concrete to frost at Early Ages," Proceedings, RILEM Symposium on Winter Concreting ( Copenhagen, 1956), Bolletin No. 71 Portland Cement Assocaition.
6. "Patología Terapéutica del Hormigón Armado", Daño por acciones físicas y químicas, 1994.
7. Ing. César Constáin Van-Reck, "Durabilidad", Ponencia , Centro de desarrollo de Cemex, 40 aniversario del IMCYC.
8. Comité ACI 302, "Recomended practice for concrete floor and slab construction ACI 302.69", american concret institute, Detreoi 1969, "manual de concreto practico".
9. C. F. E., "Manual de tecnología del concreto", editorial Limusa, Instituto de Ingeniería de la UNAM. tomo I, II, III.
10. NMX - C -111, "Industria de la Construcción, Concreto – Agregados – Especificaciones". 1998.



**EXPOSICIÓN AMBIENTAL**

## 2.0. CONDICIONES QUE AFECTAN LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

La durabilidad de las estructuras de concreto en las instalaciones de petróleo es de gran importancia, ya que en estas instalaciones petroleras radica una parte de la riqueza de nuestra nación. Por tal motivo debemos asegurar la calidad de estas instalaciones, utilizando los mejores materiales y diseñando adecuadamente. El concreto ha probado ser el material de construcción más adecuado para un sin fin de estructuras, superando a otros materiales en costo y durabilidad. Muestra de ello es la existencia de una gran cantidad de edificaciones de concreto armado que han resistido los embates tanto de la carga como del medio ambiente desde hace ya mucho tiempo. Aunque algunas personas consideran al concreto como un material eterno, este requiere de un mantenimiento sistemático y programado para que sea así. Existen construcciones que presentan manifestaciones patológicas de intensidad e incidencia en forma significativa, ocasionando costos muy altos para su reparación, ocasionando que la durabilidad se vea disminuida.<sup>1</sup>

Como ya se ha visto las características por medio de las cuales podemos calificar a la durabilidad dependen de la capacidad de las estructuras para resistir los embates de los medios a los que esta expuesta y a las condiciones de servicio.

Dicho medio de exposición, al que se hallan las estructuras dependen del sitio, mientras que las condiciones de servicio dependerán del tipo de uso que se le dará a la estructura. Por lo cual al diseñar una estructura que queramos que sea durable debemos de tomar en cuenta las condiciones de exposición y las condiciones de servicio. También se debe considerar las condiciones que pueden darse en el interior del concreto, hablando del comportamiento químico de los componentes del concreto, siendo la condición más inestable cuando se generan reacciones que tienen consecuencias deteriorantes como las reacciones álcali - agregados.

## 2.1. CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS REGIONALES

### 2.1.1. EL CLIMA NACIONAL

La durabilidad de las estructuras se ve influenciada grandemente por las temperaturas y en general por el clima, en especial cuando son extremas. En nuestro país el clima está determinado por varios factores, como la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica, así como la diversidad de condiciones atmosféricas, la época del año, ubicación del lugar y la distribución de los cuerpos de agua y de tierra.

Por lo que el país cuenta con una gran variedad de climas, los cuales de manera muy general pueden clasificarse, según su temperatura, en cálido y templado; y de acuerdo con la humedad existente en el

medio, en: húmedo, sub-húmedo y muy seco. En la figura siguiente se muestre de manera tentativa una zonificación.<sup>2</sup>

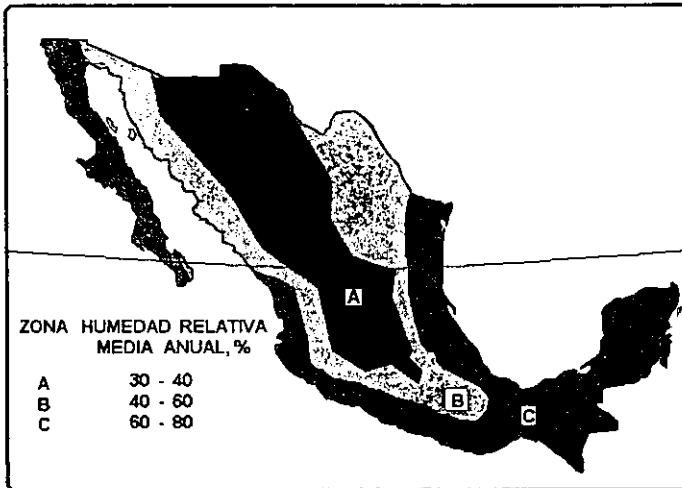


Figura 2.1. humedad relativa media anual.

El *clima seco* se localiza en la mayor parte del centro y norte del nuestro país, esta región comprende el 28.3% del territorio nacional; caracterizada por la circulación de los vientos, lo que provoca escasa nubosidad y precipitaciones que van de 300 a 600 mm anualmente, con temperaturas promedio de 22° a 26° C en algunas regiones, y en otras de 18° a 22° C.

El *clima muy seco* abarca temperaturas en promedio de 18° a 22°C, con algunas temperaturas de más de 26°C; presentando precipitaciones por año de 100 a 300 mm en promedio, y ocupa el 20.8% del país.

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS



Fig. 2.2. Grupos y Subgrupos de Climas en el Territorio Nacional.

En relación al *clima cálido*, éste se subdivide en *cálido húmedo* y *cálido subhúmedo*:

En el *cálido húmedo* que ocupa el 4.7% del país y se caracteriza por tener una temperatura media anual entre 22° y 26°C y precipitaciones de 2,000 a 4,000 mm por año.

El *clima cálido subhúmedo*, se ocupa el 23% del territorio nacional; en él se registran precipitaciones entre 1,000 y 2,000 mm anuales y temperaturas que oscilan de 22° y 26°C, con regiones en donde superan los 26°C.

Finalmente, el *clima templado* se divide en *húmedo* y *subhúmedo*;

En el *clima templado húmedo* se registran temperaturas que oscilan entre 18° y 22°C y precipitaciones en promedio de 2,000 a 4,000 mm anuales; comprende el 2.7% del país.

El *clima templado subhúmedo*, se encuentra en el 20.5% del país, observa en su mayoría temperaturas entre 10° y 18°C y de 18° a 22°C, pero en algunas regiones puede disminuir a menos de 10°C; registra precipitaciones de 600 a 1,000 mm en promedio anual.

## 2.2. CONCRETO EN CLIMA FRÍO

El concreto deberá poseer buena capacidad para resistir los efectos que las temperaturas bajas producen, de lo contrario el frío causara deterioro importante en la estructura de concreto.

Los daños al concreto por temperaturas bajas (de congelación) se deben a las presiones internas originadas por los mecanismos de congelación. (que se definieron en el capítulo anterior) Si bien el daño del concreto se debe a las presiones internas que se forman por los fenómenos relacionados con la congelación del agua que se encuentra en los poros del concreto. Por lo tanto para que exista el riesgo de que el concreto sufra daños por congelación, se requiere que existan dos condiciones básicas: primero que el concreto contenga la suficiente agua en sus poros, y segundo que la temperatura sea lo suficiente mente baja para provocar la congelación del agua en los poros del concreto. Además de estas dos condiciones existe la situación de los ciclos de congelación y deshielo, y su repetición, que realmente es después de haber pasado por dichos ciclos cuando se presentan los daños. Con la excepción de que se trate de concreto en curso de fraguado o recién fraguado, en tal caso solo una congelación es suficiente para ocasionarle daño irreparable al concreto.<sup>3</sup>

El agua necesaria para que se produzca daño en el concreto endurecido, definido por un porcentaje de saturación de 90%, aunque se considera de riesgo a partir del 80%. Y como en el concreto el contenido del agua no siempre es uniforme, van existir zonas en las que el contenido sea mayor que

en otras, pero frecuentemente el porcentaje crítico se encuentra en la cercanía de la superficie expuesta, por lo que es en la superficie donde se comienzan a presentar los efectos del daño.

La temperatura necesaria para que el agua se congele es de 0° C, pero esto es normalmente en la superficie, sin embargo, para que se logre congelar en el interior del concreto se necesita una temperatura más baja dependiendo del tamaño de los poros del concreto.

Puede decirse que el concreto se encuentra en riesgo de congelación cuando la temperatura baja al punto de congelación y continúa descendiendo hasta llegar a un nivel suficiente en el cual los poros del concreto se congelen. Esta condición de riesgo se presenta normalmente a fines del otoño y hasta principios de la primavera en los países de clima frío, en el territorio nacional solo ocurre en el periodo de invierno. Es muy reducida la zona en el territorio nacional donde se presentan temperaturas con las cuales existan riesgo de daños en el concreto por congelación, por lo que no se considera un factor importante de deterioro prematuro de las estructuras de concreto en el país. Sin embargo existen algunas zonas en la república que pueden ser afectadas por los efectos de congelación y deshielo, dichas zonas de riesgo van desde zona de riesgo importante, moderado, leve hasta nulo riesgo de congelación.

La zona de importante riesgo de congelación; son en las que la temperatura desciende por debajo de los -16 °C, dicha zona está localizada en la parte norte de la república, abarcan do los estados de Chihuahua, la parte norte de Durango, fisiográficamente abarca la Sierra Madre Occidental y una parte de la Sierra y Llanos del norte.

La zona de moderado riesgo de congelación; estas son las zonas con temperaturas que van desde los -16 °C a los -10 °C, que cubren el norte y noroeste de la república, todo el estado de Coahuila, parte del estado de Sonora, Nuevo León, Chihuahua, Durango y Zacatecas. Que fisiográficamente se encuentran en la sección del Desierto Sonorense, la sierra Madre Occidental, la Sierra y los Llanos del Norte, la Sierra Madre Oriental, la Gran Llanura de Norteamérica y la Mesa del Centro.

La zona con leve riesgo de congelación; esta zona abarca temperaturas entre los -10 °C y los 0 °C, cubriendo lo se estados de Tamaulipas, Baja California, Sonora, Nayarit, Zacatecas, Aguascalientes, y la zona centro de la república. Que fisiográficamente son las zonas de la Península de Baja California, el Desierto Sonorense, La Llanura Costera del Pacífico, la Llanura Costera del Golfo Norte y el Eje Neovolcánico.

La zona de nulo riesgo de congelación; es la región que corresponde a las temperaturas que van por encima de los 0 °C, que vendría a ser la zona Sur de la República, el Sureste y la parte Sur de la

Llanura Costera del Golfo Sur, la Península de Yucatán, la Sierra de Chiapas y las Cordilleras de Centroamérica.

La Guía ACI 201 en el tema de congelación y deshielo en el concreto, estudia el mecanismo de los ciclos de congelación así como sus efectos y algunas medidas de protección, las cuales podemos aplicar en el territorio Nacional en las regiones en las que se tiene el riesgo de congelación. Dentro del reporte del ACI 306 podemos encontrar las recomendaciones para el diseño de concretos los cuales van a estar en contacto con clima frío.

Recomiendan tener cuidado con concretos a edades tempranas, ya que cuando no se tiene agua externa el grado de saturación de un concreto recién colocado disminuye conforme va madurando el concreto y el agua del mezclado se va combinando con el cemento en el proceso de hidratación en tal caso el concreto se encuentra en un nivel crítico de saturación en el cual el ciclo de congelación le causaría daños severos. Además recomienda asegurar que el concreto desarrolle la resistencia requerida para una remoción de la cimbra sin problemas, y también el mantener las condiciones de curado adecuado para asegurar que se alcance la resistencia sin usar calor en exceso y sin ocasionar una saturación crítica del concreto al final de este periodo de cuidado. Se debe cuidar los cambios rápidos de temperatura en especial antes de que el concreto haya alcanzado la resistencia necesaria para soportar los esfuerzos térmicos los cuales pueden causar agrietamientos que al final afectan la resistencia y la durabilidad del concreto.

Dentro del diseño de la mezcla se debe tener en cuenta la calidad de sus componentes, además de tener cuidado con la relación agua/cemento. El cemento deberá ser portland, tipo I o tipo II el cual deberá cumplir con los requerimientos de la Norma Mexicana NMX C-1. Los agregados podrán ser de origen natural o por trituración, los cuales deberán cumplir con la Norma NMX C-111, y cumplir con los requerimientos de sanidad de la norma NMX C-75. La norma NMX-C-403-1999 recomienda que en caso de que se calienten los materiales para compensar las temperaturas bajas, la temperatura máxima del concreto hidráulico en el instante de la producción y de la colocación no debe exceder de (32°C).

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

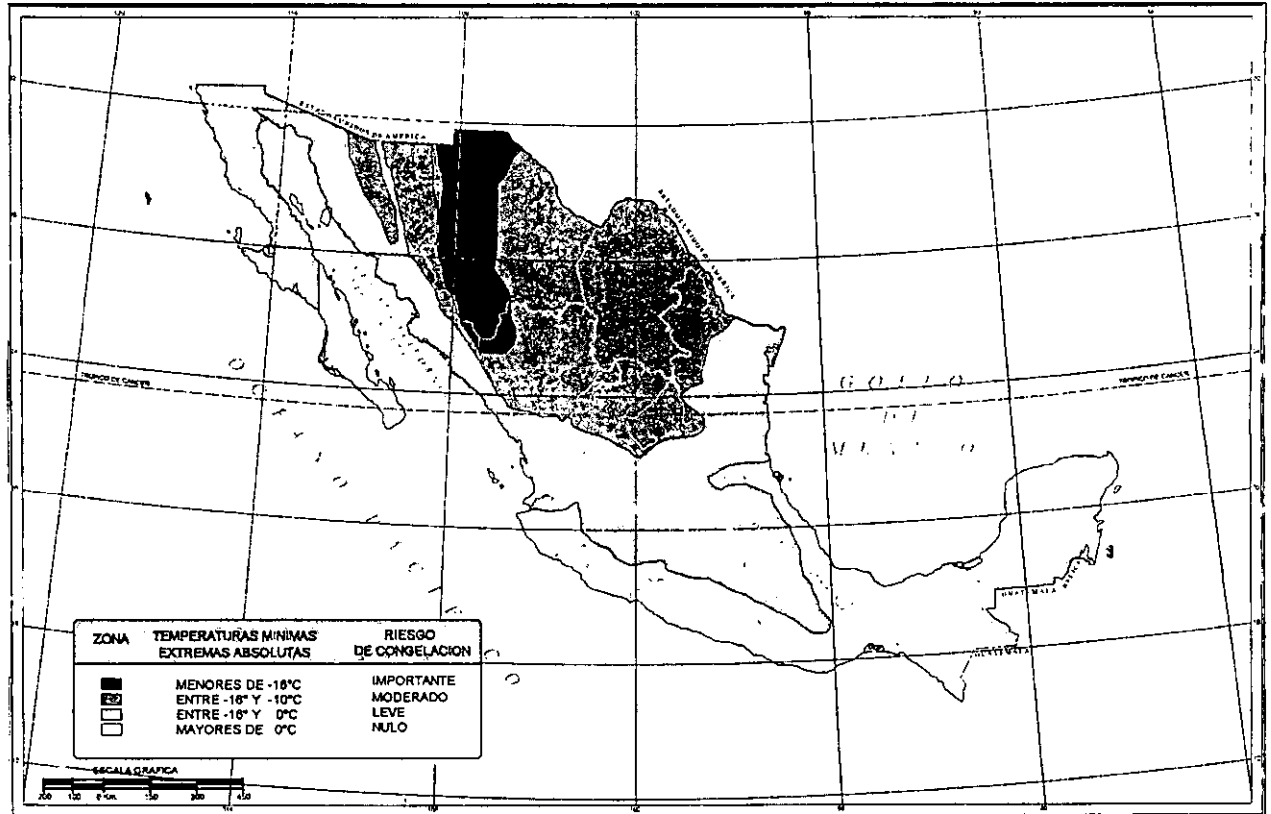


Fig. 2.3. Zonas de riesgo de congelación en la república mexicana.



El aditivo inclusor de aire es uno de los componentes de la mezcla que no deberá faltar, de tal manera que el contenido de aire se encuentre dentro de las recomendaciones que hace el comité ACI 201, el empleo de un aditivo acelerante de la resistencia se opcional (NMX C-255) pero deberá evitarse el empleo de cloruro de calcio si se tiene el peligro de sufrir ataque por sulfatos o sufrir corrosión en el acero de refuerzo.

Para medir la resistencia del concreto a soportar los ciclos de congelación y deshielo y saber cuantos ciclos es capaz de soportar cada concreto existen pruebas para medir esa resistencia potencial en forma acelerada, como es el método ASTM C 666 siendo la NMX C 205 1979 en nuestro país la que determina la resistencia del concreto al congelamiento y deshielo acelerados, la cual establece dos procedimientos para la determinación de la resistencia de probetas de concreto a ciclos acelerados, repetidos, de congelación y deshielo en laboratorio, pudiendo someterse el material a cualquiera de ellos.

A.- Congelación y deshielo acelerados en agua.

B.- Congelación en aire y deshielo en agua, acelerados.

El objetivo de ambos es determinar los efectos de las variaciones en las propiedades del concreto, sobre la resistencia del mismo sometidos a ciclos de congelación y deshielo. Cabe aclarar que ninguno de los dos procedimientos pretende proporcionar cuantitativamente la durabilidad que pueda esperarse de un tipo específico de concreto.<sup>4</sup>

En ambos procedimientos se realizan ciclos de congelación y deshielo en los que la temperatura del concreto desciende de 4°C, a -18°C, y en el periodo de deshielo se hace a la inversa, de -18°C a 4°C, en un tiempo comprendido entre más de 2 y menos de 4 horas, lo cual es bastante rápido si lo comparamos con el tiempo de congelamiento o deshielo natural, y normalmente no se excede de 3°C/hr. En esta prueba se realiza evaluando cada 36 ciclos hasta completar 300 ciclos, en cada evaluación se mide el módulo de elasticidad dinámico en las muestras (especímenes), y se compara con el modulo de que inicialmente se tomo al comenzar la prueba.

La prueba podrá suspenderse antes de los 300 ciclos si el módulo dinámico medido adquiere un valor del 0.6 del módulo dinámico inicial. La evaluación final es el cálculo del factor de durabilidad, el cual nos sirve para tomarlo como referencia al comparar diferentes tipos de concretos. Un ejemplo es cuando se emplean aditivos en el concreto, que de acuerdo a la especificación ASTM C 494, la cual establece que: para aceptar un aditivo el concreto que lo contenga deberá manifestar un factor de durabilidad equivalente al 80 % de el que manifieste el mismo concreto pero sin aditivo. Existe también otro procedimiento por medio del cual se puede evaluar la durabilidad potencial del concreto

bajo los efectos de los ciclos de congelación y deshielo, el cual lo da la ASTM C 671, la cual determina la dilatación crítica de los especímenes de concreto sujetos a congelación lenta.

### 2.3. CONCRETO EN CLIMA CÁLIDO

El clima cálido resulta perjudicial para el concreto ya que afecta su calidad y por consiguiente la durabilidad, por lo que es necesario tomar medidas de prevención desde el momento de su elaboración. La mayoría de los problemas que se presentan es debido a la rapidez de hidratación del cemento a temperaturas más altas y por la mayor rapidez de evaporación de la humedad del concreto recién mezclado. Dicha rapidez de hidratación del cemento esta en función de la temperatura del concreto, de la composición del cemento y de su finura, además de los aditivos que se usen.<sup>5</sup>

Si bien la durabilidad del concreto es un parámetro muy general que resulta difícil de cuantificar pero que significa la resistencia del concreto al intemperismo. Aunque si la resistencia del concreto es satisfactoria y el curado es adecuado para evitar el secado indeseable de la superficie del concreto, la durabilidad de dicho concreto no deberá ser muy diferente de un concreto producido en temperatura normal.

De acuerdo al informe ACI 305, el clima caluroso es definido como la combinación de: alta temperatura ambiental, alta temperatura del concreto, baja humedad relativa, velocidad de viento, radiación solar. Los cuales tienden a deteriorar la calidad del concreto recién mezclado o del endurecido. Las consecuencias de alta temperatura del aire, radiación solar y baja humedad relativa se pueden agravar si aumenta la velocidad del viento. Dichos problemas de la colocación del concreto se pueden presentar en cualquier época del año en climas tropicales calurosos o en climas áridos y normalmente ocurre en época de verano en otros climas. En otoño el agrietamiento por contracción térmica es más serio ya que en esta época la diferencia de temperaturas por cada periodo de 24 horas es mayor durante esta época del año. Por lo que las medidas precautorias tomadas para un día húmedo calmado serán menos estrictas que para los días secos, con aire y soleados, no importando que la temperatura sea la misma.

De acuerdo a pruebas realizadas por el ACI en laboratorios, se ha demostrado los efectos adversos de las altas temperaturas y del curado insuficiente en la resistencia del concreto. Los especímenes moldeados y curados al aire a 23°C, con humedad relativa del 60% y otros a 38°C con humedad relativa del 25%, desarrollaron resistencias de solamente el 73 y 62% respectivamente. Dichos valores son de los especímenes curados a 28 días. Un curado inadecuado en combinación con altas temperaturas de colocación perjudica el proceso de hidratación y reduce la resistencia. Los especímenes fueron hechos con concreto simple sin aditivos ni puzolanas que pudieran haber mejorado el comportamiento ante las temperaturas altas.

El agrietamiento por contracción plástica se presenta en el concreto aparente, especialmente en elementos planos, aunque también en vigas y cimentaciones, se presenta en climas calurosos y áridos, puede darse en otro tipo de climas siempre y cuando la tasa de evaporación sea mas alta que la rapidez con la que asciende el agua a la superficie del concreto recién colocado, a través del sangrado.

El agrietamiento por contracción rara vez es un problema en clima caluroso y húmedo donde la humedad relativa es raro que baje de 80%.

Existen zonas de riesgo por clima cálido en la república:

La zona con importante riesgo por clima cálido se encuentra comprendida en una pequeña zona costera del estado de Sonora, donde se han registrado temperaturas superiores a los 52°C, dicha zona se encuentra comprendida fisiográficamente entre el norte de la región de Llanuras costeras del Pacifico y la parte sur del Desierto Sonorense.<sup>6</sup>

La zona de moderado riesgo por clima cálido, son las zonas donde las temperaturas máximas oscilan entre lo 40°C y los 52°C, y que parcialmente abarca el noroeste, noreste, centro y sur de la república y una zona reducida de la península de Baja California, abarcando las regiones fisiográficas de la Sierra Madre Occidental, Península de Baja California, Sierra Madre Oriental, eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur y Sierra Madre de Chiapas.

La zona con leve riesgo por clima cálido, le corresponde el resto de la república, y son todas las zonas donde la temperatura se mantiene por debajo de los 40°C. Abarcando todas las regiones fisiográficas de la república.

En la mezcla de concreto adecuado se deberán tomar consideraciones no solo para el estado fresco del concreto, sino también para las condiciones que posteriormente estará expuesto el concreto ya endurecido, ya que el concreto pudiera ser que fuese colado en verano en clima cálido y en invierno se vería expuesto a la congelación, por lo que se tendría que hacer con aire incluido.

El cemento podrá ser de tipo I o II(lo que de acuerdo a la norma NOM C-414 ONCCE, sería CPO), conforme a los requisitos de la Norma NMX C-1, o Portland- puzolana (CPP) siendo la calidad establecida por la norma NMX C-2. En todos los casos se deberá cuidar que el consumo de cemento sea el mínimo para que cumpla con los requerimientos de calidad. La calidad de los agregados será normal, de acuerdo con la norma NMX C-111.

Los aditivos recomendados para clima cálido son los agentes reductores de agua de mezclado (NMX C-255), también es posible utilizar un retardante de fraguado y si se requiere un inclusor de aire (NMX C-200) si es que el concreto estará sometido a temperaturas de congelación en el invierno.

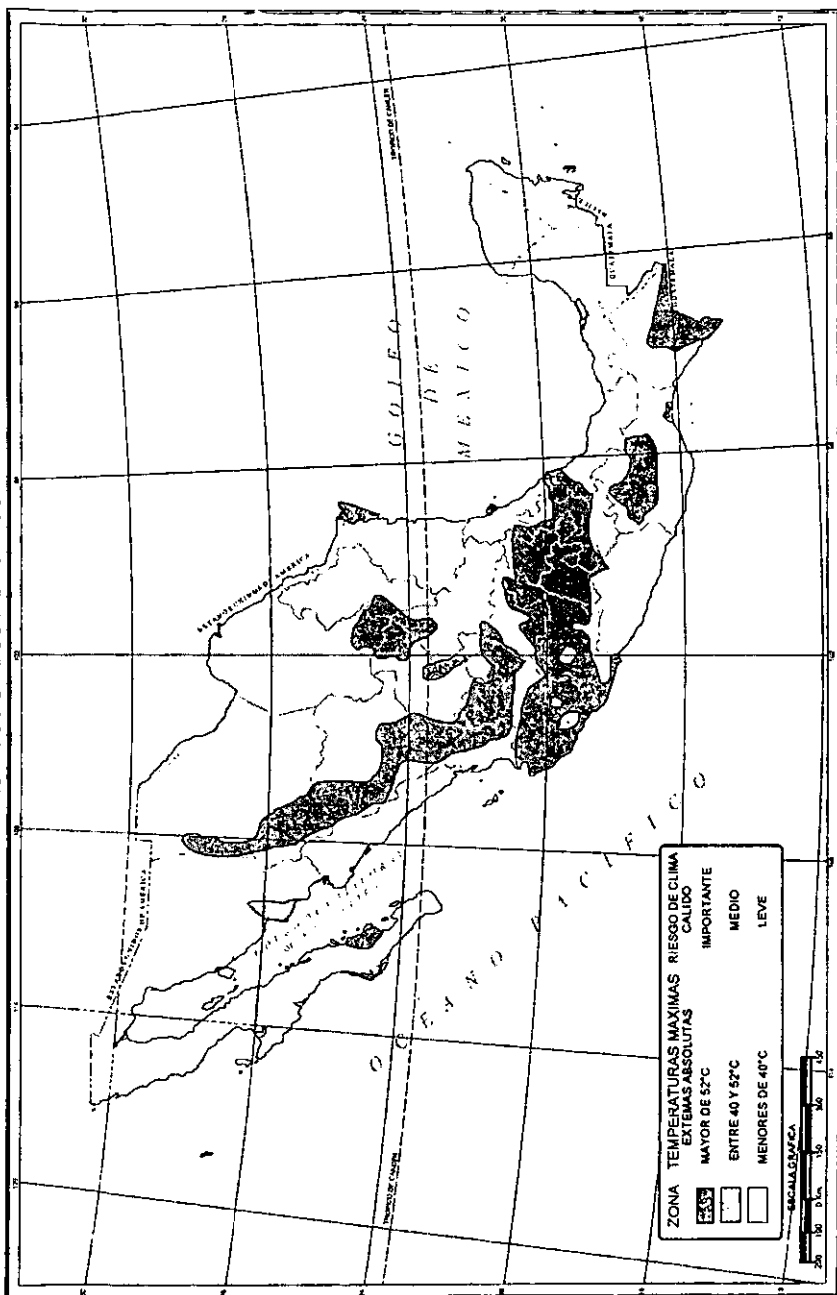


Fig. 2.4. Zonas de riesgo por clima cálido en la república mexicana.

El agua al ser uno de los componentes del concreto, interviene mucho en las propiedades del mismo, tanto en el concreto fresco como en el endurecido. Por ejemplo las temperaturas altas del agua inducen temperaturas altas en el concreto y a medida que la temperatura de este aumenta, se necesita más agua para obtener el mismo revenimiento. El agua que se le adicione al concreto aumentará la relación agua cemento, por lo tanto reducirá la resistencia, durabilidad e impermeabilidad además de otras propiedades del concreto.

Si bien la relación agua/cemento es uno de los valores para que se cumpla con la resistencia y la durabilidad, el fin es utilizar la menor relación, de acuerdo con la práctica ACI 211. Se deberá tomar en cuenta las condiciones del sitio en que se construye la estructura y las características de la misma, para definir que relación de agua /cemento se utilizará, siendo independiente del clima en que se construirá sea cálido.

## 2.4. CONCRETO EN CONTACTO CON MEDIOS AGRESIVOS

El ambiente agresivo es uno de los causantes de la baja durabilidad del concreto. Este medio agresivo es el que por sus características suele contener sustancias que son dañinas para el concreto, en diversas concentraciones. Ya que las estructuras comúnmente están en contacto con el suelo y el agua, éstos suelen contener estas sustancias que dañen al concreto. Las sustancias más comunes son los sulfatos de sodio, potasio, calcio y magnesio.

Estas sales inorgánicas, se encuentran en distintas concentraciones en los suelos y aguas superficiales o freáticas, su peligrosidad deriva en el grado de concentración en que se encuentren dichas sales. El mecanismo de ataque se describió en el capítulo anterior, donde se encuentra también una tabla de grado de agresividad de estas sales (ACI 201), de acuerdo a la concentración de las mismas.

Uno de los medios que generalmente se consideran más agresivos para el concreto es el medio marino, por el contacto con las sales del agua de mar, en la tabla de agresividad del ACI 201, clasifica al agua de mar con un grado de agresividad moderado (con una concentración de 1500ppm), la que se puede elevar gracias a la evaporación, incrementando así su grado de agresividad en el concreto. Además de las sales existe también en el agua de mar los cloruros que son los causantes de la corrosión en el acero de refuerzo y que en el agua de mar es de más de 20000ppm.

En nuestro país existen varios sitios donde las concentraciones de sulfatos son de importancia si se quiere construir alguna estructura de concreto. No solo el ambiente marino está saturado de sulfatos, esto existe en gran cantidad en las instalaciones industriales el ejemplo del cual se ocupa esta tesis es el de las instalaciones petroleras. Por tal razón es recomendable evaluar el grado de concentración de los sulfatos antes de la construcción, examinado tanto el suelo como el manto freático. En la República las zonas más comunes de encontrar estas sales son en zonas áridas o semi-desérticas del norte del país, en las zonas costeras, en particular en zonas pantanosas o bajas y en los lechos de zonas lacustres, como por ejemplo el lago de Texcoco, esto en forma natural.

Las medidas preventivas para evitar los daños por el ataque de los sulfatos se deberán aplicar en la etapa de construcción, teniendo el conocimiento previo de del grado de agresividad del medio en el que se encontrará la estructura. La primera medida es el producir un concreto denso y con baja permeabilidad, esto para impedir que la solución de sulfatos se introduzcan al concreto, así como los cloruros que pueden causar el deterioro del acero. La segunda medida es utilizar cemento que tenga cierta composición química la cual haga resistente al concreto contra los ataques de los sulfatos. Como ya se mencionó para obtener un concreto con baja permeabilidad y una buena durabilidad,

es necesario el empleo de una relación agua/cemento baja, además de emplear un correcto proceso constructivo y un adecuado curado.

De acuerdo al ACI 201 recomienda para concreto de peso normal expuesto a ataques de sulfatos:

	Grado de exposición			
	suave	moderado	severo	Muy severo
Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) contenidos en el suelo (%)	0.00 - 0.10	0.10 - 0.20	0.20 - 2.00	Mayor de 2.00
Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) contenidos en el agua (ppm)	0 - 150	150 - 1500	1500 - 10000	Mayor de 10000

Tabla 2.1 Grados de exposición a los sulfatos.

Se deberá tratar de abatir el nivel freático por medio de drenes o algún otro método, impermeabilizar la base de la estructura antes de desplantarla, impermeabilizando las estructuras que tengan que permanecer enterradas, sustituir el material de excavación por algún otro que este libre de sulfatos en los rellenos. Lo cual solo sería complementario a las anteriores recomendaciones de elaborar concreto denso e impermeable, baja relación agua/cemento, y la realización de la obra con un adecuado método constructivo.<sup>7</sup>

## 2.5. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

En la república mexicana, es importante tomar en cuenta la corrosión ya que existe infraestructura muy importante en las zonas costeras, donde este fenómeno es el causante del deterioro de las estructuras, y de reducir su durabilidad.

Si bien el concreto normalmente le brinda cierta protección al concreto por su grado de alcalinidad (ph ~12.5) y baja conductividad, sin embargo, bajo ciertas condiciones esta protección no es suficiente, por ejemplo cuando el concreto es demasiado poroso, cuando el recubrimiento es insuficiente, la existencia de fisuras, concentraciones de agentes corrosivos en el medio de contacto o en los componentes del concreto, diferencia de potencias o por corrientes, humedad, pérdida de la capa protectora, la introducción de oxígeno, son algunas de las causa que contribuyen a la corrosión.

El concreto debido a su propia constitución, contiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar inter-conectados, siendo permeable a líquidos y gases. Lo anterior es de gran importancia para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, ya que tanto el oxígeno como el agua o cualquier otro agente corrosivo pueden difundirse hacia el acero a través de la masa de concreto. Si bien la



porosidad depende de la calidad del concreto, la cual depende del diseño de la mezcla y de las practicas constructivas.

Otro factor importante en la corrosión es la protección que brinda el recubrimiento al acero, esta protección dependerá del espesor de dicho recubrimiento, dicho espesor es definido por el proyectista, el cual deberá tomar en cuenta las condiciones de servicio de la estructura, ya que si esta se va encontrar en un medio agresivo deberá especificarse un recubrimiento mayor, esto dependerá de acuerdo al grado de exposición en el que se encuentre.

Sin embargo se ha observado que los recubrimientos efectivos no suelen ser los mismos que los especificados por el proyectista, aquí depende del constructor y el supervisor, ya que son los que tienen la influencia decisiva en este aspecto. Para que la protección del recubrimiento sea efectiva se recomienda considerarlo de acuerdo tipo de exposición y al especificarlo en los planos sea incrementado para asegurar que los recubrimientos efectivos sean iguales a los requeridos para una adecuada protección.<sup>8</sup>

La existencia de fisuras o grietas en el concreto no es la causa principal de que se produzca corrosión en él, sin embargo, ayuda a la penetración de los agentes que promueven la corrosión (agua, cloruros, oxígeno, sulfatos, CO<sub>2</sub>, etc.). Por tal razón es necesario prevenir su formación o en caso aplicar un tratamiento adecuado en caso de ya exista agrietamiento en la estructura.

Las causas de la formación de los agrietamientos son muy diversas, algunas por esfuerzos producidos en la estructura y otras por esfuerzos dentro de la masa de concreto, como los agrietamientos producidos durante el estado plástico del concreto pueden deberse a: asentamientos, sangrado excesivo, secado inicial rápido que es la llamada contracción plástica.

Y los agrietamientos en estado endurecido pueden deberse a: contracciones térmicas o por secado, reacciones álcali agregados, ataque de sulfatos, juntas frías, fallas de cimbrado, mal curado, defectos de acabado y otras deficiencias en la construcción.

Así también, los agrietamientos pueden ser causados por fenómenos estructurales tales como movimientos diferenciales en la cimentación, sobrecargas, deficiencias en el diseño, juntas no previstas, puestas en servicio prematuro, etc.

De acuerdo a lo anterior, los agrietamientos se atribuyen en general a las condiciones del medio en que esta la estructura, a los componentes de la mezcla, a los procesos constructivos, etc. Al igual que en todo el mundo en nuestro país el clima y los agregados son variables, por lo que se dan los casos en que se den las condiciones que propicien los agrietamientos, como en los climas áridos del

norte de nuestro país, lo cual provoca que el concreto seque rápidamente dando lugar a la contracción plástica; así también existen zonas en el país donde los agregados suelen ser reactivos, o donde el contenido de finos requiere el uso de mayor cantidad de agua en la mezcla dando como consecuencia la contracción por secado. En todos los casos deberá tomarse las debidas precauciones para evitar los agrietamientos, realizando un correcto diseño y selección de los componentes de la mezcla, tratar de prever las condiciones climáticas lo más que sea posible.

El tipo de ambiente de exposición en que se encontrará la estructura también influenciará en que tan rápido se de la corrosión. Cuando un medio tiene alto contenido de agentes corrosivos estos suelen penetrar al concreto lo cual provoca que se inicie la corrosión del acero embebido en el concreto. Dichos agentes se encuentran en la atmósfera, en el suelo y en el agua. Un ejemplo típico de agente corrosivo en el aire es  $\text{CO}_2$  (bióxido de carbono), el cual provoca e fenómeno de carbonatación en el concreto, a consecuencia de es te fenómeno se reduce la protección que el concreto le brinda al acero, es decir, reduce la alcalinidad del concreto que normalmente es de 12.5, aproximadamente. En cuanto al los agentes que se encuentran en el suelo y en al agua podemos nombras a los sulfatos  $\text{SO}_4$  y a los cloruros, este ultimo también lo encontramos en al aire de las zonas costeras.

Se puede recomendar el empleo de algún revestimiento en la superficie, para tratar de retrasar la penetración de los cloruros. También es recomendable que el concreto mantenga una relación agua/cemento baja, compactada adecuadamente, y con un recubrimiento grueso y un curado adecuado, lo cual brindara una protección adecuada contra la corrosión.

Los agentes corrosivos también los podemos encontrar en la mezcla de concreto, incluido en el agua, en algunos agregados de origen marino y algunos aditivos. Como aditivo ( cloruro de calcio) se emplea para reducir el tiempo de fraguado, en clima frío, y también para permitir un acabado temprano. El empleo de cloruro de calcio puede alterar algunas otras características ene l concreto, puede provocar el aumento por secado en el concreto, puede reducir la resistencia a ciclos de congelamiento y deshielo y al ataque de sulfatos, aumenta la temperatura en el concreto lo cual genera que se incrementen los esfuerzos internos, corroe el aluminio y estimula la corrosión del acero de refuerzo. Debido a esto se debe evitar el uso del cloruro de calcio.<sup>9</sup>

Dentro de las Normas Mexicanas en la fabrica de concreto presforzado (NMX C-252) limita los contenidos de cloruros e la mezcla de concreto a 400 ppm en el agua y de 0.01 % en los agregados, prohibiendo el empleo de aditivos que contengan cloruros. Pero sería más efectivo limitar el contenido de cloruros en la mezcla, no sólo en particular para cada componente de la misma.

## 2.6. REACCIONES ÁLCALI AGREGADO

Como se ha mencionado anteriormente existen tres tipos de reacciones: la reacción álcali – sílice, álcali – silicato y la reacción álcali carbonato.

La primera implica una reacción entre los iones  $\text{OH}^-$  que se da con la pasta hidratada del cemento, es decir con los álcalis del cemento y el sílice reactivo de algunos agregados. Los álcalis del cemento son el óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y el óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), los cuales se pueden ver elevados si la estructura se encuentra en un ambiente marino o en algún otro ambiente en el que la concentración de sales es alta, como cuando se usan sales para descongelar pavimentos.

La forma de deterioro de esta reacción es provocada por que al reaccionar los álcalis con los compuestos silíceos de los agregados, forman un gel que absorbe agua y se hincha generando presiones, por lo cual causará agrietamientos en la estructura.<sup>10</sup>

Existen factores que aceleran este tipo de reacciones tales como la temperatura o la humedad, las cuales sirven como catalizadores para la reacción.

Las pruebas más comunes para este tipo de reacción son:

1. El examen petrográfico de acuerdo con la norma NMX-C-265, para determinar los minerales reactivos en la roca.
2. Método químico para determinar la reactividad potencial, de acuerdo a la norma NMX-C-271.
3. La prueba de barra de mortero según la norma NMX-C-180, con la que se determina el potencial de reactividad alcalina.

La reacción álcali – silicato es muy semejante a la reacción álcali - sílice solo que un poco más lenta. Por lo que se utilizan las mismas pruebas solo que a mayor tiempo.

En cuanto a las reacciones álcali – carbonato los factores que intervienen en ella son un poco complejos y requieren de la heterogeneidad de la roca, tamaño del agregado grueso, permeabilidad del concreto, variabilidad de las condiciones del ambiente en el que está en servicio la estructura, incluyendo humedad y temperatura. En esta reacción no existe la exudación del gel como en la reacción álcali – sílice en las grietas.

Las pruebas recurrentes a esta reacción son:

1. El examen petrográfico de acuerdo con la norma NMX-C-265, para determinar si la roca contiene rombos de dolomita de 1 mm a 200 mm.
2. Determinación de la reactividad potencial de las rocas de acuerdo a la norma NMX-C-272, es una manera rápida de determinar el potencial reactivo, si la expansión es mayor de 0.1%, indicará reacción química.

3. Determinación de las expansiones en prismas de concreto de acuerdo a la norma ASTM-C-1293-93, si la expansión después de un año es mayor a 0.04%, el agregado es reactivo.

Dentro del suplemento mexicano del ACI 201, que se refiere a durabilidad, se encuentra un cuadro sinóptico que indica las pruebas, criterios de interpretación de resultados y decisiones que pueden tomarse en secuencia, dependiendo del tipo de reacción.

En la siguiente tabla se muestran de acuerdo al tipo de reacción, las rocas conocidas que reaccionan con los álcalis.

Tipo de Reacción	Grupo Reactivo	Rocas	Reactivo	Abundancia en México
Álcali - sílice	1.- Son rocas de origen Igneo, sedimentarias y metamórficas que contienen algunas formas de sílice reactiva: son vítreas, microcristalina o cristalina intensamente deformada.	Las que contengan ópalo en su estructura, rocas calcedónicas, calizas silíceas, pedernales, algunas pizarras y areniscas.	Ópalo, tridimita	Escasa
		Las de origen volcánico y estructura vítreas como riolitas, dacitas, latitas, andesitas y sus tobos y algunos basaltos.	Sílice amorfa	Abundante
		Las rocas con alto contenido de sílice como: ortocuarzos, areniscas, granito microcristalino como la aplita, y ciertos esquistos.	Cuarzo cristalino, solo es reactivo si es microcristalino y está muy deformado	Regular abundancia
Álcali - carbonato	2.- Son algunas rocas sedimentarias carbonatadas, que contienen minerales arcillosos y dolomita.	Las rocas calizas dolomíticas arcillosas y otras rocas dolomíticas	Dolomita meta-estable, y calcita cripto cristalina	Regular abundancia
Álcali - silicato	3.- Son algunas rocas metamórficas que filossilicatos de estructura foliada - reticular.	Grauvacas, argilitas, filitas, algunos esquistos y pizarras	Hidromica (illita)	Regular abundancia

Tabla 2.2. Rocas de acuerdo al tipo de reacción que producen con los álcalis.

En nuestro país existe una gran variedad de agregados que resultan ser potencialmente reactivos con los álcalis del cemento, además también se utilizan cementos con altos contenidos de álcalis, lo cual agrava la posibilidad de sufrir daños por reacciones álcali – agregado.

De acuerdo a la constitución geológica de nuestro país se a marcado 15 zonas fisiográficas, en las que se ha delimitado regiones en las cuales podemos encontrar agregados potencialmente reactivos con los álcalis. Cabe mencionar que dicha zonificación de manera general no excluye que fuera de estas áreas se encuentren agregados potencialmente reactivos. De tal forma que se han localizado zonas donde existe la posibilidad de encontrar minerales que reacciones con los álcalis.<sup>11</sup>

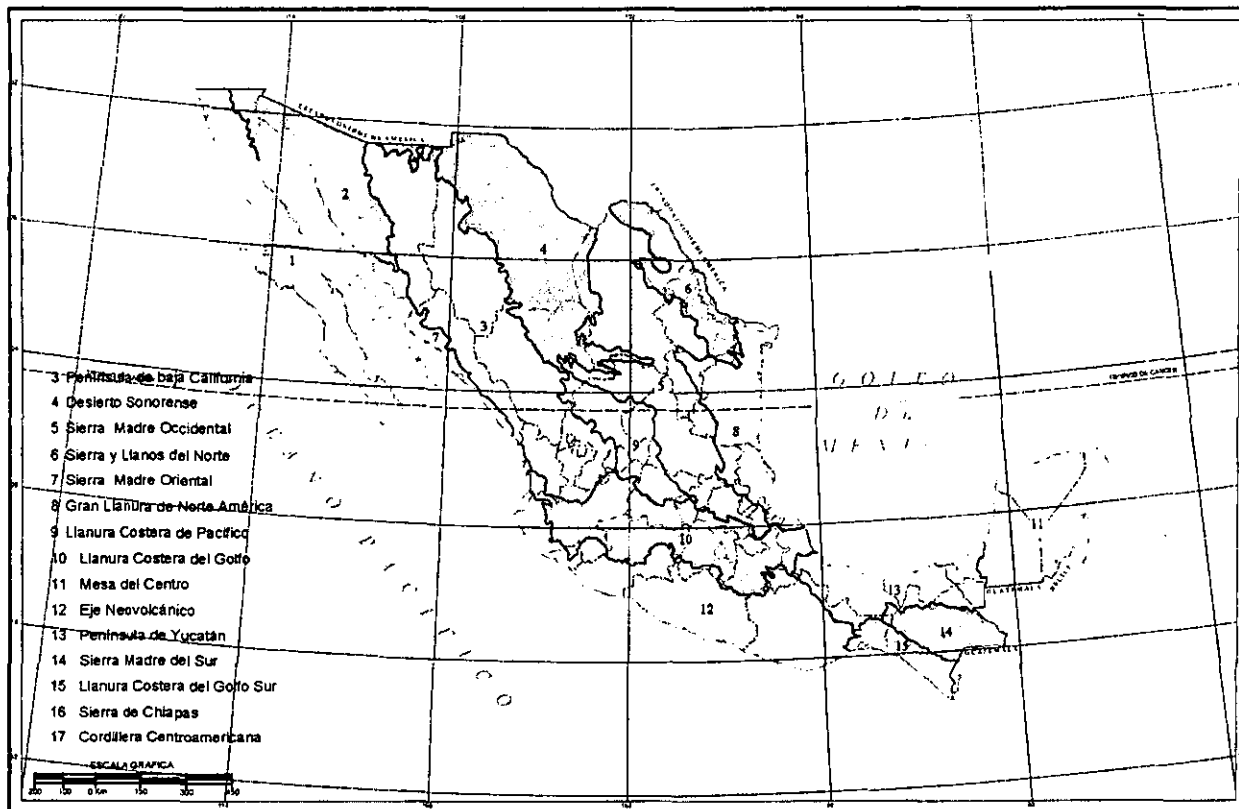


Fig. 2.5 Regiones Fisiográficas.

Las regiones donde existe la posibilidad de encontrar agregados que produzcan una reacción álcali – silice, en nuestro país son: Península de Baja California, Desierto Sonorense, Sierra Madre Occidental, Llanura Costera del Pacífico, Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur. En las que podemos encontrar minerales como: rocas calcedónicas, calizas silíceas, pedernales, algunas pizarras, areniscas, riolitas, dacitas, latitas, andesitas y sus tobas, algunos basaltos, ortocurancitas, areniscas, granito microcristalino, grauwacas, argilitas, filitas, algunos esquistos y pizarras. Las zonas las podemos ver en el mapa siguiente.

Como se puede ver en el mapa anterior se localizan dos zonas, una de con un *potencial de moderada reactividad*, comprende la parte norte de la Península de Baja California y el Desierto de Sonora, además de la región de la Sierra Madre del Sur. En todas estas regiones es común encontrar rocas de origen ígneo, sedimentario y metamórfico. Es decir que es posible encontrar toda clase de rocas.<sup>12</sup>

La *zona de potencial fuertemente reactivo*, abarca la parte sur de la Península de Baja California, una fracción del Desierto Sonorense, Sierra Madre Occidental, Llanura Costera del Pacífico y el Eje Neovolcánico. En la zona 1 y 2 suelen encontrarse rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas de composición variada, en la zona 3 y 10 podemos encontrar rocas de origen ígneo, y en la zona 7 se hallan rocas de tipo sedimentario.

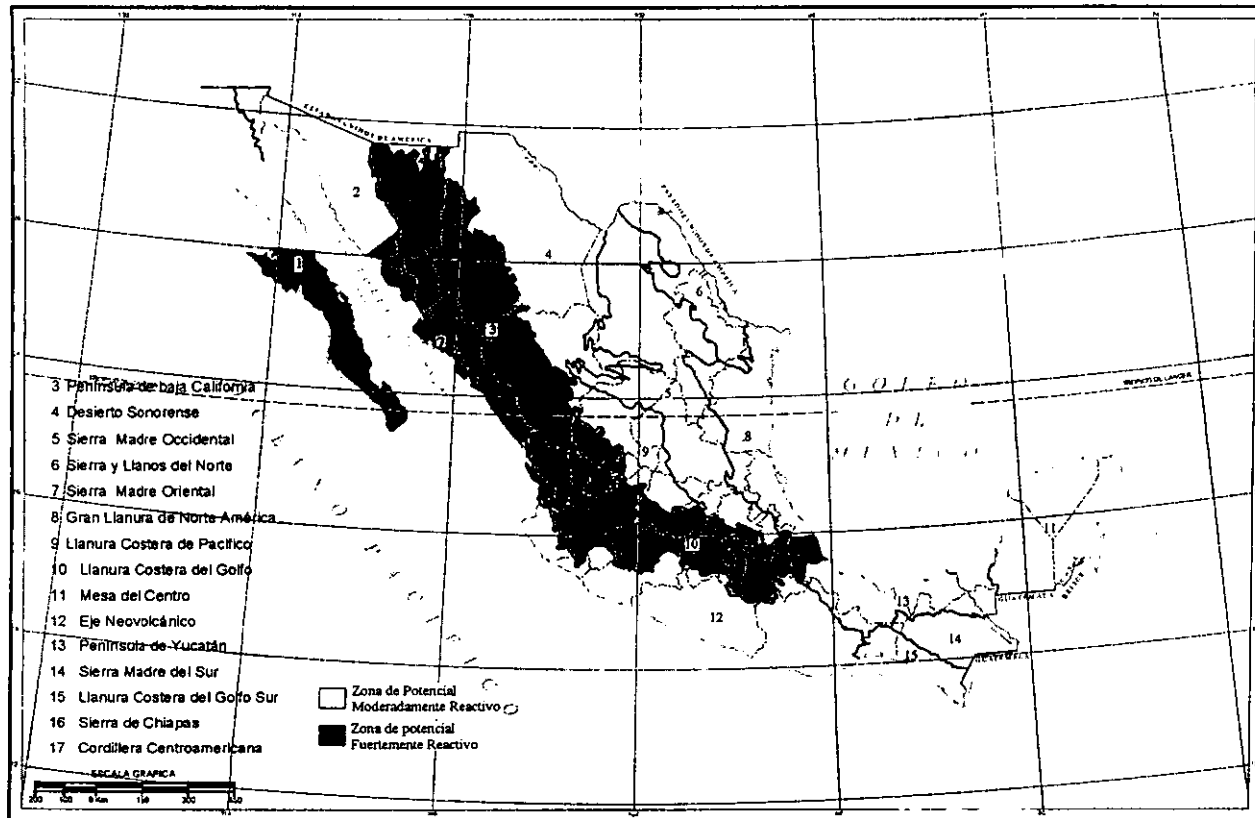


Fig. 2.6. Regiones de reactividad potencial álcali-silíce.



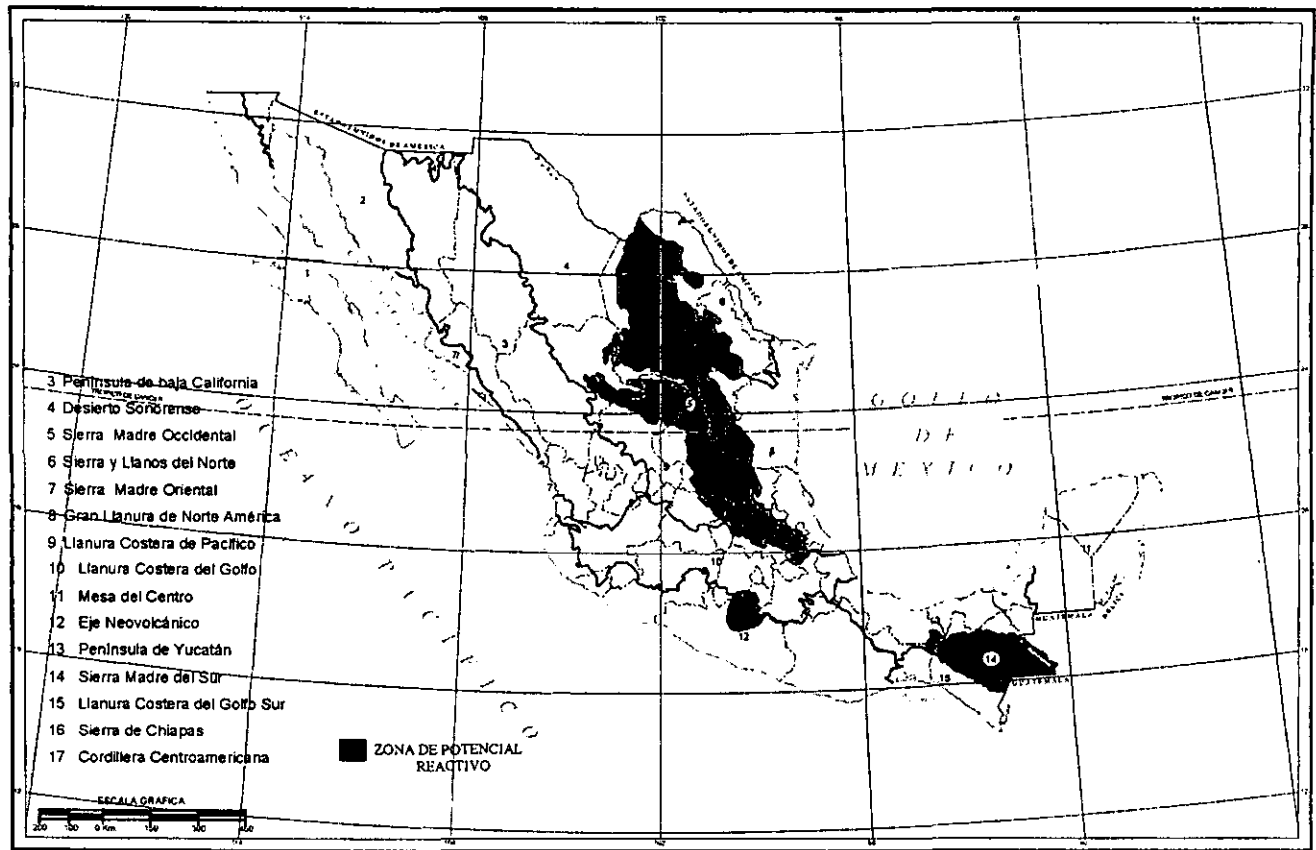


Fig. 2.7. Regiones de potencial reactivo álcali-silice carbonato.

Las regiones donde es posible encontrar rocas que produzcan reacciones álcali - carbonato se encuentran ubicadas en la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre de Chiapas, y una fracción de la Sierra Madre del Sur (sub provincia de la plataforma Morelos). Las rocas que podemos encontrar son algunas rocas sedimentarias carbonatadas, que contienen minerales arcillosos y dolomita como las rocas calizas dolomíticas arcillosas y otras rocas dolomíticas.

Es necesario aclarar que, tratándose de agregados naturales, su origen puede hallarse a distancias considerables por efecto de el transporte de corrientes de agua, por el viento o por la fuerza con que los fenómenos volcánicos ocurren, lo cual aleja a las rocas del lugar donde se formaron. Cabe mencionar también que, la zonificación anterior señala las regiones donde es probable encontrar rocas que contengan los elementos potencialmente reactivos, sin tratar de calificar su grado de reactividad, para lo cual sería necesario un estudio en cada banco.

## REFERENCIAS

1. Temas Técnicos y Prácticos del Concreto, Guía para la Durabilidad del Concreto, suplemento mexicano del informe del comité ACI 201. Versión actualizada abril de 1996.
2. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Carta climatológica, y de tipo de suelo
- 3 ACI 306-88 " Could Weather Concreting" American Concrete Institute, 1988.
- 4 NMX-C-205-1979,"Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados". Ed. ONNCCE, 1979.
- 5 ACI 305R-91 "Hot Weather Concreting" , American Concrete Institute, 1991.
- 6 "Manual de Tecnología del Concreto", Vol. III, Concreto en Estado Endurecido, manual elaborado por el Instituto de Ingeniería, UNAM, a petición de la gerencia de Ingeniería Experimental y control, de la Subdirección Técnica, C. F. E. 1994.
- 7 Comité ACI 304, "Guide for measuring, mixing, transporting, and placing concrete", "Guía para la medición, mezcla, transporte y colocación del concreto", James L. Cope. President. 1993IMCYC.
8. Informe del comité ACI 201, "Durabilidad del Concreto", 1979, 1era ed. En español.
9. NORMA MEXICANA, NMX-C-403-ONNCCE-1999. "Industria de la Construcción Concreto Hidráulico para uso Estructural". 24 de nov. de 1999.
10. Problemas en el Concreto: Causas y soluciones. Ed. IMCYC. 1985.
11. NORMA MEXICANA, NMX C-111, Industria de la Construcción, Concreto – Agregados – Especificaciones. 1998.
12. Carta Edafológica serie I, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA, GEOGRAFIA E INFORMATICA, escala 1:1000000, WEB, isbn 970-13-1811-0, isbn 970-13-1812-9, Carta topográfica serie I, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA, GEOGRAFIA E INFORMATICA, escala 1:1000000, WEB. <http://www.inegi.gob.mx>, isbn 970-13-1810-2, isbn 970-13-1812-9.

**INSTALACIONES PETROLERAS**

### 3.0. INDUSTRIA PETROLERA.

En el país la empresa que se encarga de la explotación de los recursos petrolíferos es PEMEX, dentro de sus actividades están la exploración y explotación de hidrocarburos, así como también la producción, almacenamiento, distribución y comercialización de productos y subproductos petrolíferos y también los productos petroquímicos.

PEMEX esta conformada por un organismo corporativo y cuatro organismos subsidiarios:

Organismo	Labor
Parte Corporativa	Tiene a su cargo la conducción central y de la dirección estratégica de la industria petrolera, y de asegurar su integridad y unidad de acción.
PEMEX Exploración y Producción (PEP)	Tiene a su cargo la exploración y explotación del petróleo y el gas natural.
PEMEX Refinación (PR)	Produce, distribuye y comercializa combustibles y demás productos petrolíferos.
PEMEX Gas y Petroquímica Básica (PGPB)	Procesa el gas natural y los líquidos del gas natural; distribuye y comercializa gas natural y gas LP; y produce y comercializa productos petroquímicos básicos.
PEMEX Petroquímica (PPQ)	Por medio de sus siete empresas filiales (Petroquímica Camargo, Petroquímica Cangrejera, Petroquímica Cosoleacaque, Petroquímica Escolín, Petroquímica Morelos, Petroquímica Pajaritos y Petroquímica Tula) elabora, distribuye y comercializa una amplia gama de productos petroquímicos secundarios.

Tabla 3.1 organismos que conforman la industria petrolera en México (PEMEX).<sup>1</sup>

Además de contar con el **Instituto Mexicano del Petróleo** que apoya a PEMEX tecnológicamente en la extracción de los hidrocarburos, así como en los procesos de elaboración de los productos petrolíferos y petroquímicos.

### 3.1. HIDROCARBUROS - PROCESOS

#### 3.1.1. PETRÓLEO

El petróleo es una mezcla de compuestos denominados hidrocarburos, constituidos por carbono e hidrogeno con presencia de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales y lo encontramos naturalmente en el subsuelo. Siendo el azufre y los hidrocarburos aromáticos los componentes más tóxicos en el crudo, posteriormente de ser extraído es separado en crudo y gas.<sup>2</sup>

En el cuadro anterior se muestra en forma representativa un diagrama de procesos con respecto los organismos que forman la industria petrolera en nuestro país.

#### 3.1.2. GAS.

El gas se obtiene principalmente de las baterías de separación, el cual esta constituido principalmente por metano y contiene también etano, propano, butanos, pentanos y gasolina natural, y algunos contaminantes.

Dentro de los procesos de obtención del gas encontramos:

- ♦ El endulsamiento: que es la eliminación o separación de los gases ácidos sulfuro de hidrógeno  $H_2S$  y bióxido de carbono  $CO_2$ , que se lleva acabo por medio de un proceso de absorción y separación, es aplicable solo si se es posible hallar un solvente líquido en el que le componente gaseoso que deseamos extraer de manera selectiva se a hecho más soluble de lo que son lo otros componentes que se encuentran en la corriente de gas. Si se puede hallar ese solvente, el procedimiento es bastante directo. El gas de alimentación entra a la absorbedora, que es una columna vertical en la que el gas pasa hacia arriba y el solvente líquido, hacia abajo. Normalmente en el interior de la columna se usan casquetes de burbujeo, bandejas perforadas para fomentar el contacto a contracorriente entre el solvente y el gas. El solvente agotado entra en la parte superior de la columna y fluye a contra corriente del gas. En el momento en le que el gas ha alcanzado la parte superior del la columna, la mayor parte del componente que se desea extraer se ha disuelto en el solvente; el gas limpio pasa hacia la atmósfera o hacia sus usos posteriores. El solvente cargado, que ahora contiene la mayor parte del componente que se está extrayendo del gas, pasa a la separadora, la cual normalmente se opera a una temperatura mucho más alta o a una presión mucho más baja, o ambas. A esta temperatura alta o presión más baja, o ambas, la solubilidad del gas en el solvente se reduce mucho, de modo que ese gas se sale de la solución. En seguida se enfría y envía hacia almacenamiento o algún uso posterior. Y el solvente se envía de nuevo a la columna absorbedora.<sup>3</sup>
- ♦ La recuperación de licuables; etano e hidrocarburos mediante procesos criogénicos, es decir, usando bajas temperaturas para generar una destilación que nos permita separar los líquidos.

- ♦ La recuperación del azufre de los gases ácidos  $\text{H}_2\text{S}$ , que se obtienen en el proceso de endulsamiento. Una vez separado el  $\text{H}_2\text{S}$  de los otros componentes del gas, normalmente se le hace reaccionar con el oxígeno del aire, en cantidades controladas, para oxidarlo con el fin de llevarlo sólo hasta azufre elemental,  $\text{H}_2\text{S} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{S} + \text{H}_2\text{O}$  y no hasta  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S} + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ . El azufre elemental se vende para ser usado en de ácido sulfúrico, o bien, usa como relleno en terraplenes, si no se cuenta con un mercado cercano para él.
- ♦ El fraccionamiento de los hidrocarburos: los cuales fueron recuperados en el proceso criogenico en el que se obtuvieron los licuables, obteniendo etano, propano, butanos y gasolina; en ocasiones también resulta conveniente separar el isobutano del n-butano para usos muy específicos.



Fig. 3.2 Ductos, Complejos procesadores y terminales de distribución de gas más importantes en el país.



### 3.1.3. REFINACIÓN

La refinación del petróleo es posible gracias a los diferentes puntos de ebullición de los hidrocarburos. El petróleo es separado mediante una destilación atmosférica y al vacío inicialmente, y posteriormente se le hará pasar por otros procesos para la obtención de sus derivados comerciales. Dependiendo de la calidad y la cantidad del crudo así como de sus características, determinarán que tipo de proceso deberán incorporar a la refinería. En su mayoría los productos que resultan de la destilación se someten a hidrotreamiento con el fin de eliminar el azufre y nitrógeno o en el caso de los residuos para producir combustóleo. Para la obtención de las gasolinas los productos de la destilación se someten a procesos de reformación catalítica, síntesis de éteres, alquilación e isomerización de pentanos-hexanos.

### 3.1.4. PETROQUÍMICOS BÁSICOS Y AZUFRE

De la industria petroquímica se desprenden numerosos sub- productos, que son utilizado en infinidad de industrias como materia prima o ya como producto terminado para ser utilizado y satisfacer diferentes necesidades

Dependiendo de su origen, los petroquímicos básicos se extraen de diferentes Complejos Petroquímicos, concentrados principalmente en el sur este del país. En el caso del azufre los centros distribuidores se ubican no sólo en los centros procesadores, sino también en las refinerías a lo largo de toda la República. Las plantas que componen los complejos se dedican al proceso de recuperación de los productos, de donde son transportados a las terminales de Gas. A partir de éstas el producto es distribuido a los clientes, quienes a su vez lo hacen llegar al consumidor final. La distribución se realiza por medio de ductos, autotanques, carrotanques o, en el caso de exportaciones, a través de buquetanques.

## 3.2. EMISIONES Y DESCARGAS

En al industria petrolera sus actividades con llevan a tener efectos en el ambiente durante los procesos de explotación, producción, procesamiento y distribución de los productos. Dichos efectos se dan por emisiones al aire, descargas al agua, generación de residuos peligrosos y derrames de hidrocarburos

Los principales compuestos emitidos al aire se deben a la combustión y la evaporación de hidrocarburos, así como también de la combustión de corrientes con azufre. Como ya se ha mencionado los compuestos emitidos son los Óxidos de Azufre  $SO_x$ , Óxidos de Nitrógeno  $NO_x$ , además de Partículas Suspendidas Totales PST y algunos Compuestos Volátiles Totales COVT.

Las aguas descargadas contienen compuestos que en su mayoría son grasas y aceites, como resultado de las actividades de procesamiento de los hidrocarburos, algunos otros parámetros que se toman en cuenta son los sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, sulfuros, fenoles y metales pesados.

	Emisiones al aire	Descargas de agua	Generación de residuos peligrosos	Hidrocarburos derramados
Explotación (EP)	344,889	625	134,556	1,501
Refinación (R)	470,390	3,211	32,812	1,946
Gas y petroquímica básica (GPB)	175,257	249	1,085	0
Petroquímica (PQ)	28,526	2,131	16,548	0
total	1 019,062	6,216	185,001	3,447

Tabla 3.2 Emisiones y descargas al medio ambiente en la industria petrolera. (En toneladas)<sup>1</sup>

Las emisiones están en función de la naturaleza y las actividades de la industria, por ejemplo las emisiones en EP se deben a la producción de crudo y gas, en R se debe al procesamiento del crudo, GPB al procesamiento de los hidrocarburos y en PQ a la producción de los petroquímicos. De acuerdo a esto tenemos en la tabla 3.2 las emisiones de cada uno de los organismos en la industria petrolera.

Las emisiones y descargas más significativas a la atmósfera y al agua de acuerdo a la producción de cada una de las actividades de la industria y a los parámetros más importantes como son los óxidos de azufre, COVT que se emiten al aire, y las grasas, aceites y PST que se descargan al agua.

	Emisiones y descargas totales	Producción	%	SO <sub>x</sub>	COVT	Grasas y aceites	PST
				%		Aire	
EP	481,571	187,512,784	0.257	0.138			
R	508,359	63,170,598	0.805	0.420	0.25	0.002	0.003
GPB	176,591	52,806,178	0.334	0.312			
PQ	47,204	674,848	0.700				0.026

Tabla 3.3 emisiones y descargas por unidad de producción y parámetros por unidad de producción.

### 3.3. DETERIORO DEL CONCRETO

La industria del petróleo en nuestro país consta de una gran infraestructura, la cual utiliza diferentes materiales para su construcción, siendo el concreto uno de ellos, el cual es utilizado en pavimentos, bases para maquinarias, contenedores, lastre en tuberías, etc. y dada la importancia de las instalaciones petroleras se desea que estas estén hechas con la mejor calidad posible. En instalaciones petroleras como en muchas industrias en la que se manejan sustancias químicas el concreto suele tener problemas con las reacciones que se pueden producir, entre los componentes de la mezcla del concreto y los productos o subproductos de la industria.

Las condiciones en las que el concreto trabaja dentro de la industria del petróleo son muy diversas, pero podemos distinguir las condiciones de servicio y las condiciones ambientales. Las condiciones de servicio en las que el concreto trabaja en la industria del petróleo dependerá del tipo de actividad que se realice en ella, pues no es lo mismo las condiciones que se presentan en un pozo de extracción, en una refinería o en una estación de bombeo, ya que en cada una de ellas nos encontraremos con diversas situaciones. En cuanto a las condiciones ambientales, dependerá de la ubicación de las instalaciones y de las condiciones climáticas que existan en la región.

Cuando hablamos de concreto hablamos de un material muy noble, un material que ha demostrado su servicibilidad y durabilidad. Sin embargo, en condiciones severas como son las que se presentan por lo regular en instalaciones industriales, lo hacen propenso a tener defectos y a presentar una vida útil reducida. Lo cual puede deberse a:

- ♦ Mal diseño del concreto. Ya que muchas veces los diseñadores no conocen las condiciones de exposición a las que estará sometida la estructura, ya que solo se conforman con especificar o conocer la carga que soportará dicha estructura. Un ejemplo son los tanques de almacenamiento de azufre en estado líquido; por lo cual para el diseño su exposición al ataque químico debe ser tomado en cuenta, además de las altas temperaturas a las que se someten dichos depósitos.

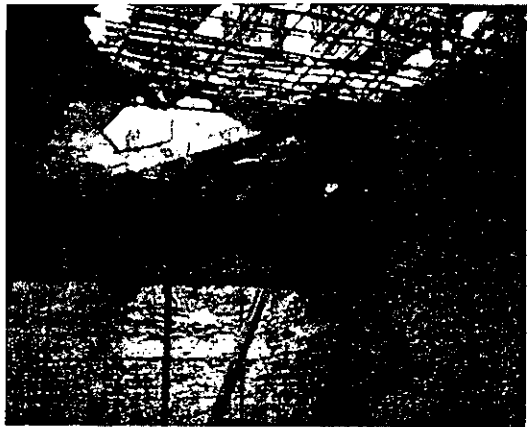


Fig.3.3. Tanques de almacenamiento de azufre en estado líquido.

- ◆ Inadecuado proceso constructivo. Suele suceder que una mala realización en cualquier etapa del proceso de construcción sea el causante de que el concreto no cumpla con las especificaciones, y por lo tanto provoque que las estructuras sean inadecuadas.
- ◆ Mantenimiento escaso o nulo. En las estructuras de concreto se hace necesario que se les de mantenimiento para que cumpla con la vida útil a la que fue diseñada o para alargar la misma. Todo dependerá del servicio que preste la estructura.

### 3.3.1. TIPOS DE DETERIORO ENCONTRADOS EN LAS INSTALACIONES

Los daños encontrados en este tipo de instalaciones dependerán como ya se dijo del tipo de la actividad y ubicación de la instalación en la que se este empleando el concreto, como ya se menciono anteriormente, pero de forma general se mencionan las siguientes formas de deterioro:

1. Fisuras en estructuras que están expuestas a calentamiento producto de la actividad, las cuales producen agrietamiento térmico debido a la variación del coeficiente térmico de expansión de los componentes de hormigón.
2. El daño por sulfatos podría ser el resultado de los gases sulfúricos, como sulfuro de hidrogeno  $H_2S$  y bióxido de azufre  $SO_2$ , producidos durante los funcionamientos de las instalaciones ya que son subproductos de la industria de petróleo.
3. En las instalaciones marinas el ataque de cloruro y de sulfato es resultado de la exposición con el agua de mar que causa aumento continuo de sales en la superficie de hormigón. Posteriormente, cuando las sales penetran el hormigón, corroe el acero y dando lugar al agrietamiento del concreto.
4. La vibración de las bombas y motores son causas frecuente de agrietamiento interior en el concreto.
5. El goteo de vapor y gas en las cañerías y válvulas de alivio desintegran la superficie de concreto y podrían crear agujeros grandes por medio de la pérdida de componentes de concreto

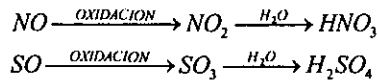
Por lo anterior la durabilidad de una estructura de concreto se ve disminuida. Hablando de las sustancias químicas que se manejan o se producen en la industria petrolera se menciona como sub

productos o desechos a el azufre (SO<sub>2</sub>), al bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfuro de hidrogeno (H<sub>2</sub>S), por mencionar a los más importantes.<sup>4</sup>

Generalmente el ataque al concreto se debe por la descomposición de los productos que se dan durante la hidratación del concreto y por la formación de nuevos compuestos solubles y lixiviables. Dichos compuestos deteriorantes deben estar diluidos en una solución para poder penetrar. El hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) es el mas vulnerable a los ataques de los agentes agresivos, además de los agregados calcáreos.

### 3.3.2. ACIDOS.

Por las emanaciones producto de la combustión en la industria encontramos elementos que son expedidos como por ejemplo los óxidos de nitrógeno y de azufre que al oxidarse pueden y al reaccionar con el agua, en este caso la humedad ambiental, llegan a convertirse en ácidos como ácido nítrico y ácido sulfúrico que son deteriorantes del concreto.



El concreto es de carácter básico y al estar en contacto con ácidos reacciona neutralizándose, dando como resultado sales cálcicas solubles en agua. Los hidróxidos de calcio, silicato de calcio, aluminato de calcio, que constituyen el gel de cemento, los cuales son solubles en compuestos ácidos, por lo que al entrar la pasta en contacto con estos, pierde coherencia y se desintegra, quedando expuestas las partículas de los agregados y al no tener aglutinante se desintegran. Se decía en párrafos anteriores que los agregados calcáreos(calizas, dolomitas) son muy vulnerables, la razón es que estos reaccionan con los ácidos, de tal forma que el deterioro es mayor.

El ácido es capaz de penetrar por los poros del concreto y alcanzar el acero de refuerzo, ocasionando corrosión por reacciones químicas que con el tiempo causan manchas, agrietamientos y destrucción de la superficie del concreto. La pérdida de las sales de calcio que son solubles, hacen que el concreto pierda su efecto pasivante en el acero y por ello se corroe.

La intensidad con que una sustancia ácida causa deterioro al concreto depende del grado de solubilidad en agua de las sales que se forman como consecuencia de la reacción. La profundidad del daño varia no sólo con el tipo de ácido, sino también de la continuidad con que ocurra su aportación.<sup>5</sup>

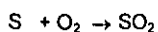
### 3.3.3. AZUFRE

Los combustibles usados hasta la actualidad, como el carbón, el gas, el combustóleo, etc. contienen azufre en mayor o menor grado. Los combustibles como la madera tiene muy poco 0.1 o menos, a diferencia de los carbones minerales que tienen del 0.5% hasta el 3%. Pero hablando del petróleo, contiene mas azufre que la madera pero menos que el carbón mineral.

El azufre es le decimosexto elemento más abundante en la corteza terrestre, con más o menos 260ppm. El azufre que contiene el petróleo crudo se encuentra en forma de sulfatos orgánicos, la combustión del petróleo genera por consiguiente también algún ácido sulfúrico además que en este proceso de combustión también se genera bióxido de carbono. Si bien el azufre es un producto de la industria petrolera, aun que en las gasolinas se considera un contaminante, el azufre en estado básico es utilizado por otras industrias como materia prima. En el gas natural, la mayor parte del azufre se encuentra en forma de sulfuro de hidrogeno H<sub>2</sub>S, el cual se separa con facilidad de los demás componentes del gas. En el petróleo liquido así como en los esquistos petrolíferos y arenas alquitranadas, el azufre esta combinado químicamente hidrocarburos. En los petróleos el azufre se concentra en la fracción de punto de ebullición más alto de los mismos, de modo que el mismo petróleo crudo puede dar lugar a una gasolina de bajo contenido de azufre ( menos de 0.01 % de S) y a un combustóleo pesado de alto contenido de azufre (0.5 a 1 % de S).<sup>6</sup>

La extracción de los compuestos reducidos de azufre del petróleo y de las corrientes de gas natural. Dicho proceso fue mencionado en el punto 3.2.1 de este capítulo.

Al ser quemados los combustibles el azufre contenido, en su mayor parte, formará bióxido de azufre:



Al encontrarse esto en la atmósfera, llegará un momento en que vendrá hacia el suelo, en su mayor parte con precipitaciones, difundiéndose los sulfatos a través de los poros del concreto. En estructuras que se localizan cerca de la costa y en la industria se ven deterioradas por que el ambiente que esta cargado de bióxido de azufre SO<sub>2</sub>, en forma de ácido sulfúrico y la lluvia ácida ataca al concreto.

La reacción química más importante del bióxido de azufre SO<sub>2</sub> en el concreto en la presencia de humedad iniciando la formación de sulfato del calcio CaSO<sub>4</sub> inerte que es sacado fácilmente a través del agua debido a su alta solubilidad, así causa lixiviación a la superficie. Por consiguiente, la fuerza del concreto está considerablemente reducida, particularmente bajo la acción prolongada del SO<sub>2</sub>.

Además, el sulfato del calcio que se produce y cristaliza como yeso en caso de que no haya lavado fuera, a su vez, actúa recíprocamente con el cemento, produciendo desmoronamiento, a causa del ablandamiento severo de la pasta.

Así el sulfato de calcio solo ataca al aluminato de calcio, formando Sulfoaluminato de Calcio ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), que comúnmente llamamos *etringita*, que es un compuesto altamente expansivo; el número de moléculas del agua dependerá de la humedad ambiental variando entre 31 y 32.<sup>7</sup>

Estas dos reacciones tienen como resultado un aumento de volumen sólido. A la que se le atribuye la mayoría de las expansiones y rupturas del concreto causadas por las soluciones de los sulfatos.

El sulfato de sodio reacciona con el Hidróxido de Calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), el cual es un ataque de tipo ácido, ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{NaOH} + 8\text{H}_2\text{O}$ ), cuando el agua fluye el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  puede ser lixiviado completamente, pero el NaOH se acumula al alcanzar cierta estabilización o equilibrio depositándose solo una parte del Trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ) como yeso.

Por otro lado los sulfatos de magnesio atacan a los hidratos de silicatos de calcio y también a el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y al hidrato de aluminato cálcico, dicha reacción da como resultado hidróxido de magnesio  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , el cual tiene una segunda reacción con el gel de sílice y puede causar deterioro.

La proporción y magnitud de deterioración debido al ataque del sulfato depende de la concentración de sulfato, el tipo de sales de sulfato, permeabilidad y porosidad de concreto.

De acuerdo al ACI las reacciones químicas puede ocurrir una acción puramente física que es la formación de cristales en los poros del concreto y que es responsable de daños considerables.

### 3.3.4. BIÓXIDO DE CARBONO

El bióxido de carbono  $\text{CO}_2$  se genera en los procesos de endulsamiento del gas y en la combustión del crudo y los hidrocarburos. Dicho gas tiene efectos perjudiciales al reaccionar con el hidróxido de calcio de la pasta de concreto, disminuyendo el Ph aumentando el riesgo de carbonatación y producir con el tiempo corrosión en el acero de refuerzo.

La carbonatación es un proceso que resulta del contacto del concreto con el bióxido de carbono  $\text{CO}_2$ , que se encuentra en el aire y que al combinarse con la humedad del concreto se convierte en ácido carbónico reaccionando, como ya se mencionó, con el hidróxido de calcio del concreto  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  el cual se libera cuando el cemento es hidratado, de tal manera que de esta reacción se da la

formación de carbonatos, en el caso del hidróxido de calcio del concreto  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se formará carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  y agua  $\text{H}_2\text{O}$ , por lo que al reaccionar la conversión de hidróxido a carbonato disminuye la alcalinidad del concreto, es decir, disminuye su Ph, lo cual reduce la protección que el concreto estableciendo las condiciones básicas para el inicio del proceso corrosivo, por otro lado la extracción del agua del hidróxido genera una disminución del volumen de concreto.<sup>8</sup>

La carbonatación se produce por reacciones químicas del cemento portland hidratado, dichas reacciones son producidas por el bióxido de carbono  $\text{CO}_2$  de la atmósfera. La carbonatación provoca que aumente la contracción del concreto al secarse, por lo que aumenta la posibilidad de que el concreto sufra agrietamientos. Si bien la carbonatación es un fenómeno que avanza progresivamente dependiendo de la concentración del  $\text{CO}_2$  que exista en el aire, el proceso comienza al penetrar el gas en los poros y reaccionando rápidamente con los hidróxidos del concreto, lo cual genera que el aire quede ávido de  $\text{CO}_2$ , el cual es repuesto por el aire del exterior de los poros de concreto, restituyendo el  $\text{CO}_2$  y con esto se propicia un nuevo avance en la carbonatación y así sucesivamente.

El avance de la carbonatación dependerá del contenido de  $\text{CO}_2$  en el aire, de la permeabilidad del concreto y también del grado de humedad que existe en el ambiente y en el concreto.

Cuando el concreto se a curado y compactado de forma adecuada la carbonatación no suele penetrar profundamente. En cambio si el acero se encuentra muy cerca de la superficie y el concreto resulta ser poroso, provoca que el concreto se encuentre más propenso a la corrosión.<sup>9</sup>

El proceso de la carbonatación suele ser muy lento y suele presentarse en la parte superficial de la estructura, para lo cual puede evitarse el daño con un recubrimiento adecuado, concreto de buena calidad.

### 3.3.5 CLORUROS

Pero en cuanto a los cloruros no sucede lo mismo ya que estos son mas agresivos, dependiendo de tipo de exposición y de la concentración, para lo que no basta un buen recubrimiento para condiciones normales. Definir el grado de agresividad resulta difícil ya que no solo depende de contenido o concentración del agente, sino también de otros factores como son la impermeabilidad del concreto, espesor y grado de exposición del recubrimiento, de acuerdo a la NMX C-346, a partir de un contenido de 500 ppm en el agua y de 0.02% de cloruros en el aire, deberán tomarse las consideraciones necesarias para evitar daños por cloruros.

Dentro de la gran infraestructura de las instalaciones petroleras de nuestro país, algunas de las mas importantes, en cuanto a instalaciones se refiere se encuentran en la costa como podemos observar



En la figura 3.2. Tanto los  $\text{SO}_4$  como los cloruros son sales solubles, por tal razón penetran fácilmente a la masa de concreto disolviéndose comúnmente en agua, la cual utilizan como medio de transporte. Si bien ambos son agentes que deterioran el concreto el mecanismo es diferente ya que los sulfatos reaccionan químicamente con los hidratos de la pasta de cemento, generando expansiones que son capaces de agrietar el concreto, en tanto que los cloruros son los causantes de generar o acelerar el proceso de la corrosión del acero de refuerzo. Y al igual que los sulfatos necesitan los cloruros de la humedad para penetrar y entrar en contacto con el acero de refuerzo y corroerlo.<sup>10</sup>

Al existir cloruros en solución y penetran en los poros del concreto actuando esté como electrólito, aumenta la conductividad y facilita el movimiento de los iones de hidróxido entre el cátodo y el ánodo, al aumentar la concentración de cloruros se producen reacciones químicas que causan lugares de deterioro de la película pasiva del concreto y dando así celdas de corrosión.

En este caso hablamos de cloruros por exposición en el medio, pero debemos tener en cuenta que los cloruros no solo penetran al concreto, si no que también pueden ser parte de él, como es el caso de algunos aditivos o cuando el agua de mezclado los contiene. La concentración de cloruros que puede ser tolerable estará influida por factores como el sistema de refuerzo, condiciones de exposición y las características del cemento utilizado en la mezcla. En el sistema de refuerzo, porque comparando el convencional y el presforzado, el último es más susceptible a la corrosión ya que los daños suelen ser más severos por su diámetro de acero reducido y la pérdida de capacidad que representa la corrosión del acero y por estar sometido a altos niveles de esfuerzo. Por tal razón los niveles de cloruro deben ser más restringidos en un sistema de presfuerzo. En cuanto al medio de exposición, el riesgo de corrosión será mínimo en el caso en que el ambiente sea seco, el cual va en aumento con relatividad a la existencia de humedad, en el que la condición más riesgosa será en la que exista humedad y penetración de cloruros y con posibilidad de ingreso de oxígeno, por lo cual a mayor riesgo de exposición mayor deberá ser la restricción de cloruros en la mezcla. En lo que se refiere al tipo de cemento se sabe que el aluminato tricálcico  $\text{C}_3\text{A}$  del cemento reacciona con los cloruros formando cloroaluminato de calcio que es insoluble y no contribuye a la corrosión del acero de refuerzo, de tal forma que los cementos con mayor contenido de aluminato tricálcico atenúan mejor en el concreto los efectos de los cloruros y por consiguiente el riesgo de corrosión disminuye.<sup>11</sup>

En cuanto a las zonas costeras, en las estructuras que se encuentra en contacto directo con el agua de mar y el contenido de cloruros rebasa los 20000 ppm, se hace necesario el empleo de mejores medidas de protección, en especial en la zona en donde el nivel del mar fluctúa, para dicha protección se prevé el uso de cemento apropiados, una relación agua /cemento baja y un recubrimiento de mayor espesor.

### 3.3.6. AGRIETAMIENTO

Dentro de la industria petrolera el concreto es empleado como base para soportar maquinaria como son las bombas, motores y otras estructuras, dichas estructuras de concreto debido al funcionamiento de esta maquinaria, puede generarse agrietamientos, por causa de la vibración y carga excesiva lo cual provoca que el concreto se vea disminuido en su comportamiento, aunque puede parecer un problema de diseño también resulta ser parte de la durabilidad.<sup>12</sup>

Las fisuras aparecen en el concreto como consecuencia de tensiones superiores a la capacidad resistente, debidas a retracciones del concreto o por cargas. La aparición de una fisura visible no significa necesariamente que algo ande mal, sin embargo, es importante conocer la causa que la produce para de esta forma poderla reparar y prevenir.<sup>13</sup>

Se puede hablar de las grietas provocadas por *asentamientos plásticos*, que son grietas diagonales en la superficie del elemento, se presentan a lo largo de las armaduras (> 1mm), que suelen formarse en un periodo de 10 minutos a 3 horas y suelen localizarse en la parte superior de las columnas o las losas.

Las grietas producidas por *retracción plástica* se caracterizan por formar grupos de grietas ya sean paralelas entre sí o en forma de mapa (2-4mm) suelen formarse en un periodo de 30 minutos a 6 horas, presentándose en elementos como losas armadas y pavimentos.

Las grietas debidas a la *contracción térmica* son grietas paralelas y separadas entre sí por distancias semejantes, corren a lo largo de la superficie. (<0.4 mm), se presentan en un periodo de un día a tres semanas, las cuales se presentan principalmente en las juntas de los muros o en donde existe una junta fría o en cimentaciones.

Las *grietas por retracción* son grietas finas, pero de profundidad que afectan el elemento aparecen después de una semana y en el periodo de un año, se localizan entre las juntas de los pavimentos y las losas.

Las grietas provocadas por la *corrosión* y el *deterioro* del acero son grietas a lo largo del acero de refuerzo, que inicialmente son pequeñas y se detectan fácilmente por las marcas de óxido y aumento de volumen en esa zona. Se presentan en miembros expuestos a medio ambiente agresivo en el cual encontramos agentes que inducen la corrosión del acero de refuerzo.

Las grietas producidas por la *reacción álcali* de los agregados se presenta en forma de mapa las cuales se encuentran cubiertas con el producto de la reacción (gel o cal).

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

Las grietas producidas por cargas como la torsión, flexión, corte y cargas concentradas, el tamaño de las grietas dependerá de la magnitud de la carga, la cual dependerá también del diseño, la localización y su distribución dependerán del uso de la estructura y de la frecuencia de la carga.

Las fisuras producidas por cargas difieren de las de retracción porque tienen mayor profundidad y aparecen con forma típica, razón por la cual es necesario comprobar las dimensiones de la fisura para establecer si son originadas por cargas y constituyen un problema estructural. La reparación de este tipo de fisuras involucra tratamientos con morteros especiales, productos asfálticos y resinas epóxicas, entre otros.

Retracción Hidráulica después del fraguado, se originan por los cambios de volumen del concreto debidos a la evaporación del agua de los poros en ambientes secos. Aparecen donde la contracción está impedida con orientación perpendicular a la dirección en que el movimiento está restringido. La retracción hidráulica antes y después del fraguado tiene mayor importancia en elementos tales como losas y muros por su gran superficie y pequeño espesor.

Retracción y dilatación térmica, aparecen en los elementos colocados en medios ambientes en los que disminuye o aumenta la temperatura y tienen limitados los movimientos de contracción. El agrietamiento térmico es debido a la variación del coeficiente térmico de expansión de los componentes de concreto. Su espesor no es uniforme y por lo general varía con los cambios de temperatura.<sup>13</sup>

Los vapores y gases provocados por la actividad en la industria, por fugas de tuberías o goteo en cañerías y válvulas desintegran la superficie de concreto, los cuales podrían provocar agujeros o grietas en la superficie del concreto debido a la pérdida de los componentes del concreto.

## REFERENCIAS

1. PEMEX, <http://www.pemex.com>, "Petroquímica básica, refinación". Petróleos Mexicanos 2000-12-13, emisiones, pag. 1-2.
2. Osama E., K. Daoud and Iman A Ibrahim, "Impact of environmental and operating conditions in oil refineries on concrete properties", *ACI MATERIALS JOURNAL*, julio- agosto 1996, pag. 307-317.
3. Noel de Nevers, "Ingeniería de control de contaminación del aire", , McGraw-Hill, Capitulo 11, control de óxidos de azufre, pag. 355
4. Husain Al-kaiat, "Los efectos de la contaminación en Kuwait por pozos petroleros en las propiedades del concreto", *ACI MATERIALS JOURNAL*, Ene – Febrero 1999. pag. 109-115.
5. H. M. shalaby and O.K: Daoun, "Case studies of deterioration of coastal concrete structures in two oil refineries in the Arabian gulf region", Kuwait institute for scientific research, P.O. Box 24885, 13109 safat, Kuwait. Received July 9, *Cement and Concrete Research*, vol. 20, 1990, pag. 975-985.
6. Osama E. K. Daoud, Member, ASCE, "Condition Survey and assessment of concrete footings in industrial plants", (Head Mgmt. of Constr. and Contracts Dept., Dar Al-Handasah Consultants (Shair and Partners), P.O. Box 895, Cairo 11511, Egypt) and Iman A. Ibrahim, (Asst. Prof., Dept. of Struct. Engrg., Facu. of Engrg., Cairo Univ., Giza, Egypt), *Journal of Materials in Civil Engineering*, November 1997, pag. 161-170.
7. Adam M. Neville, "Tecnología del concreto", Instituto Mexicano del Cemento Y el Concreto, 1999, pag. 337-403.
8. "Manual de tecnología del concreto", Vol. III, Concreto en Estado Endurecido, manual elaborado por el Instituto de Ingeniería, UNAM, a petición de la gerencia de Ingeniería Experimental y control, de la Subdirección Técnica, C. F. E. 1994.
9. "Temas Técnicos y Prácticos del Concreto. Guía para la Durabilidad del Concreto," suplemento mexicano del informe del comité ACI 201. Versión actualizada abril de 1996.
10. M. A. Matti\* BSc PhD and A.J. Watson, Meng, "Shrinkage of oil-soaked concrete", *Magazine of concrete research*, Kuwait institute for scientific research, vol. 34, no. 119: junio 1982, pag. 74-82.
11. Olukunle A. Onabolu, "Some properties of crude oil-soaked concrete. I exposure at ambient temperature", *ACI Material Journals*, vol. 86, no. 2, marzo-abril 1989, and, "Some properties of crude oil-soaked concrete. II exposure at ambient temperature", *ACI Material Journals*, vol. 86, no. 3, mayo -junio 1989.
12. "Naji M. Al-Mutairi, "Kuwait Oil-Based Pollution: Effect on building material", (Mgr. and Assoc. Res., Civ. and Build. Dept Kuwait Inst. for Scientific Res., Engrg. Div., P.O. Box 24885, 13109 Safat, Kuwait), *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 7, No. 3, Agosto 1995, pag. 154-160.
13. J. A. Qazweeni and O. K. Daoud, "Concrete deterioration in a 20-year-old structure in Kuwait", *Cement and Concrete Research*, vol. 21, 1991, pag. 1155-1164.

14. MONS H. Peter. "Concrete repair and maintenance illustrated: problem analysis, repair strategy and techniques." England. Ed. R.S. Means 1993.

**CONCRETO DURABLE**

## 4. CONCRETO DURABLE

En los últimos años se ha venido tomando en cuenta con mayor énfasis el concepto de durabilidad, ya que se ha visto su relación con el costo final de la obra y de su vida útil. Hablando de concreto durable debemos manejar los conceptos de: condiciones de exposición, condiciones de servicio, practicas constructivas. Dichos conceptos son de gran importancia para la concepción de un concreto durable. Dentro de estos conceptos se deberá tomar en consideración en las condiciones de exposición la ubicación geográfica, el carácter del lugar y el medio de contacto. En las condiciones de servicio deberán considerarse el ataque de sulfatos, exposición al agua de mar, ataque ácido, carbonatación, abrasión, corrosión del acero de refuerzo y reacciones químicas. Y en las practicas constructivas previas, durante y posteriores al la colocación del concreto. Ya que el deterioro de las estructuras puede deberse a múltiples causas es necesario identificarlas todas y reconocer su posible procedencia y mas importante aun es conocer su ocurrencia y la magnitud con que puede atacar al concreto, todo esto es importante para poder prolongar la vida útil de las estructuras de concreto.

### 4.1. CONDICIONES DE EXPOSICIÓN

Las condiciones de exposición de una estructura son evaluadas de acuerdo al medio ambiente, que a su vez dependerá de la ubicación geográfica en que se encuentre dicha estructura y del carácter urbano, rural o industrial del lugar; y las características del medio de contacto corresponden al suelo, el agua o cualquier otra sustancia sólida, líquida o gaseosa que eventualmente pueda tener contacto con la estructura. En el caso de las condiciones que prevalecen en el interior del concreto, la condición más inestable que afecta la durabilidad del mismo es la que se produce por las reacciones deletéreas entre el cemento y los agregados.<sup>1</sup>

#### 4.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La ubicación geográfica se toma en cuenta en la elaboración del concreto por las condiciones climatológicas, de las cuales podemos considerar 3 intervalos:

1. Baja temperatura, en la cual deben aplicarse medidas para proteger el concreto en estado fresco y endurecido contra el frío excesivo, es decir, contra el congelamiento.
2. Temperatura moderada, en que no se requieren medidas especiales en este aspecto para el uso del concreto en la construcción de estructuras ordinarias.
3. Alta temperatura, en la cual se deben tomar medidas para evitar el exceso de calor, para prevenir efectos perjudiciales principalmente sobre el concreto fresco y recién colado. Este rango es el que

caracteriza a México, por su posibilidad de ocurrencia, y la condición mas desfavorable en la producción de concreto. Las altas temperaturas en combinación con alta temperatura del concreto, baja humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, tienden a perjudicar la calidad del concreto.

En virtud de la combinación de factores que intervienen en la valoración de un clima caluroso, especifica para estructuras ordinarias una temperatura máxima de 27 °C cuando el clima es caluroso pero no seco.<sup>2</sup> El balance de esta condición indica, al esperarse que la temperatura del concreto al ser mezclado sea ligeramente mayor que la promedio del medio ambiente, que para poder colocar el concreto a una temperatura máxima de 27 o 32 °C, sin adoptar medidas preventivas, es necesario que la temperatura ambiente sea menor de 27 °C en clima seco y menor de 32 °C en clima húmedo.

La temperatura del concreto es importante, esta tiende a ser mas elevada en clima cálido, ya que aunado al calor del ambiente se le suma el calor por la fricción del mezclado y el calor de la reacción por la hidratación del cemento. Es necesario que se tomen medidas para controlar el comportamiento del concreto a elevadas temperaturas, por medio de una adecuada selección de los constituyentes de la mezcla de concreto, una correcta dosificación ya que de lo contrario los aumentos de temperatura en el concreto inducirán efectos adversos como:

- El aumento en la cantidad de agua provocara que la resistencia disminuya así como la durabilidad y aumentara la contracción en el secado.
- El agua necesaria par producir un cierto revenimiento aumenta conforme el tiempo transcurrido a partir de que el cemento se humedeció. Para un tiempo constante de mezclado, la cantidad de agua que se necesita para alcanzar un cierto revenimiento aumenta también con la temperatura.
- La pérdida de revenimiento a edades más tempranas resulta ser evidente, lo cual dificulta el manejo y las operaciones que se hagan con la mezcla.
- En climas áridos se tendrá mayor probabilidad de que se presenten grietas por contracción térmica ya que la humedad relativa en este tipo de clima es muy baja.
- En estructuras de secciones con grandes dimensiones se tendrá una mayor rapidez de hidratación y evolución del calor de hidratación la cual aumentará la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del concreto, lo cual da como resultado agrietamientos por temperatura.

En la NMX-C-403-1999, recomienda para climas cálidos, la temperatura del concreto hidráulico en el momento de su producción y de su colocación no deberá exceder de 32°C. No debe tener una evaporación mayor de 1l/m<sup>2</sup>/h(un litro por metro cuadrado de superficie por hora). Para contrarrestar los efectos de las temperaturas altas el responsable de la obra deberá determinar la conveniencia de



enfriar los materiales y la posibilidad de escarchar el agua, sin que la temperatura del concreto fresco descienda a menos de 10°C.<sup>3</sup>

De acuerdo a datos geográficos, el trópico de cáncer divide en dos a al territorio nacional, siendo la porción sur de clima tropical y la porción norte de clima templado, pero debe tomarse en cuenta las condiciones locales de altitud y distancia al mar.

De acuerdo con el clima regional existen tres zonas que se pueden diferenciar: la zona A correspondiente a la región centro y norte del país, en la cual el ambiente es seco regularmente, caluroso en verano y frío en invierno.; la zona B, rodeando la zona centro y sur, el ambiente en esta zona es menos extremo sus variaciones de temperatura por cambio de estación son mas moderadas y presenta mayor grado de humedad; la zona C, abarca la región sur este y la costa del golfo, en la cual el clima es tropical, caluroso y húmedo, con variaciones de temperatura muy leves en el cambio de estación. En la figura 2.1 del capítulo 2 se muestra la zonificación de manera tentativa de acuerdo a clima y humedad relativa anual. En la zona A se presenta una mayor velocidad de evaporación del agua de la superficie del concreto, por lo que se deberá tener mas cuidado por la rápida desecación del concreto fresco. Y en las zonas B y C, pueden presentar condiciones menos desfavorables, aunque presentan condiciones propicias para la rápida evaporación del agua del concreto fresco.

#### 4.1.2 CARÁCTER DEL LUGAR

El carácter del lugar se refiere básicamente a si la estructura se encuentra en un ambiente rural, urbano o industrial, que para el caso de las instalaciones petroleras del cual se ocupa este trabajo es industrial. A su vez en cada ambiente se puede definir diversos subambientes, en los cuales se toma en cuenta la humedad y la exposición a sustancias químicas agresivas.

En la norma NMX-C-403-1999, presenta una clasificación de acuerdo con la clase de exposición que se deberán tomar en cuenta para el diseño de la estructura. Existen variables que se toman en cuenta en esta clasificación, pero se deberá estar consiente de la existencia de otras, tales como, corrosión del acero de refuerzo por la acción de iones de cloro o por acción de la carbonatación y la reaccione álcali agregado.

La clasificación 1 se refiere a el ambiente seco en interiores, regiones con humedad relativa mayor al 60% por un lapso no mayor a tres meses al año y que no se encuentran expuestos en forma directa al viento ni al suelo o agua.

La clasificación 2a, se refiere al ambiente húmedo sin congelamiento, interior de edificaciones con humedad relativa mayor al 60% por más de tres meses al año, expuestos al viento.

La clasificación 2b, es de ambiente húmedo con congelamiento, exteriores expuestos al viento y al congelamiento.

La clasificación 3, se refiere a el ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes.

La 4 se refiere a el ambiente marino, elementos en zona de humedad o sumergidas en el mar con una cara expuesta al aire, elementos en aire saturado de sales ( zona costera). Que sería una de las clasificaciones en las entrarían varias de las instalaciones petroleras, ya que existe una enorme infraestructura en costa y fuera de ella.

Las siguientes clasificaciones son de ambiente de agresividad química, por gases, líquidos o sólidos.

Condiciones Ambientales		Niveles de Agresividad			
		5ª ligera	5b moderada	5c alta	5d muy alta
En contacto con agua	Ph	6.5 - 5.5	5.5 - 4.5	4.5 - 4.0	< 4.0
	CO <sub>2</sub> agresivo (en mg/l como CO <sub>2</sub> )	15 - 30	31 - 60	61 - 100	> 100
	Amonio (en mg/l como NH <sup>4+</sup> )	15 - 30	31 - 60	61 - 100	> 100
	Magnesio (en mg/l como Mg <sup>2+</sup> )	100 - 300	301 - 1500	1501 - 3000	> 3000
	Sulfato (en mg/l como SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	200 - 600	601 - 3000	3001 - 6000	> 6000
En contacto con el suelo	Sulfatos (en mg como SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg de suelo secado al aire)	2000-6000	6000-12000	>12000	---

Tabla 4.1. clasificación de agresividad química de acuerdo a sus niveles de contaminantes.<sup>3</sup>

#### 4.1.3. MEDIO DE CONTACTO

Las estructura de concreto tienen contacto con suelo, aire y agua. Los cuales pueden ser agresivos y pueden afectar la durabilidad del concreto en contacto con ellos, y esto debido a que pueden contener sustancias de manera natural o no, en concentraciones variables que dañen el cemento portland.

Como ya se ha mencionado las sustancias mas agresivas son sulfatos, cloruros, los álcalis, bióxido de carbono, calcio y magnesio.

Existen situaciones en las que el diseño no permite la protección total del elemento, por lo cual debe tener precaución para aislar la estructura del medio de contacto, por lo que se recomienda lo siguiente:

- ◆ En estructuras desplantadas en terrenos con el nivel freático alto es recomendable abatirlo por medio de drenes o por cualquier otro procedimiento adecuado.
- ◆ En cimentaciones aplicar algún producto impermeabilizante andes de ser desplantada la estructura.
- ◆ Aplicar algún producto impermeabilizante en las superficies terminada de las estructuras que estarán enterradas o sumergidas.
- ◆ Otra protección es la sustitución del material de relleno, en las cimentaciones, por otro que no contenga sustancias agresivas. Este seria factible combinarlo con alguno de los anteriores.

En la norma NMX-C-403-ONNCCE-1999, se sugiere que para tener una estructura con una esperanza de vida de por lo menos 50 años, de acuerdo a la exposición ambiental, la relación a/c no deberá exceder 0.5, y la resistencia a la compresión simple  $f_c$ , no deberá ser menor de 260 kg/cm<sup>2</sup>. En la tabla A.2.a de esta misma norma podemos encontrar los requisitos de resistencia la compresión simple, relación agua/cemento, contenido de cemento para agregados gruesos entre 20 y 40 mm, contenido de aire por tamaño máximo de agregado, tanto par concreto reforzado, concreto presforzado o postensado. Además de algunos requisitos adicionales tanto para los agregados como para los cementos.

## 4.2. CONDICIONES DE SERVICIO

### 4.2.1. ATAQUE QUÍMICO

Son muy variadas las sustancias que al concreto afectan, su origen y fuentes de aporte son igual mente variado, por lo que es necesario conocerlos para prevenir el deterioro del concreto. en este estudio se ha mencionado algunas de las sustancias que en las instalaciones petroleras existen y que son las mas deletéreas para el concreto, como sub productos o desechos a el azufre SO<sub>2</sub>, al bióxido de carbono CO<sub>2</sub>, sulfuro de hidrogeno H<sub>2</sub>S, por mencionar a los más importantes.

En la tabla siguiente se muestran algunos ácidos orgánicos e inorgánicos, y soluciones alcalinas y salinas respecto a su velocidad de ataque al concreto.

Velocidad de ataque a temperatura ambiente	Acidos inorgánicos	Acidos orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Varios
Rápida	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	---	Cloruro de aluminio	---
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de sodio 20%	.Nitrato de amonio .Sulfato de amonio .Sulfato de sodio .Sulfato de magnesio .Sulfato de calcio	Bromo (gas) Sulfito líquido
Lenta	Carbónico	---	Hidróxido de sodio 10-20% Hipoclorito de sodio	.Cloruro de amonio .Cloruro de magnesio .Cloruro de 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 zinc .Cromato de sodio	Amoniaco líquido

Tabla 4.2. Velocidad de ataque de algunas sustancias.

El concreto que se encuentra expuesto a la acción de sustancias químicas agresivas, además de presión y temperaturas altas, es más propenso a ser deteriorado. La prevención depende del grado de agresividad del medio en que este la estructura. El concreto fabricado adecuadamente, con el tipo correcto de cemento y que ha sido bien proporcionado, mezclado, colado y curado, será denso, resistente, impermeable y resistente a la mayoría de los ataques de sustancias químicas. Por lo tanto, siendo el concreto hecho de esta manera no necesita ninguna protección adicional, al igual que el acero de refuerzo que al estar embebido el concreto de buena calidad esta protegido. Un buen proporcionamiento de concreto debe tomar en consideración el tipo de cemento, la relación a/c y el contenido de cemento. Aunque en algunos casos es necesario una protección adicional. En ambientes en que los productos de calcio son disueltos, los cementos portland con escoria granular de alto horno CPEG o los cementos portland puzolánico CPP, estos tienen mejor desempeño en estas circunstancias en comparación con el cemento portland ordinario CPO, ya que el contenido de silicato

tricálcico libera gran cantidad de iones de calcio durante la hidratación, también la mezcla con ceniza volante puede ser eficaz para estas circunstancias de exposición.<sup>4</sup>

#### 4.2.2. ATAQUE POR SULFATOS

Dentro de la infraestructura de la industria petrolera como ya se ha comentado existe el riesgo del deterioro del concreto por sulfatos y otras sustancias agresivas al concreto, a demás que de manera común y natural se encuentran en el medio ambiente estas sales en diferentes concentraciones, cuando se encuentran en porcentajes muy bajos el riesgo es casi nulo, pero a medida que este porcentaje de concentración va en aumento el riesgo de causar daño al concreto también aumenta, ya que producen cambios de volumen en los elementos y provocan el deterioro prematuro, el cual se ve acelerado en presencia de agua.<sup>5</sup>

Es conveniente evaluar los contenidos de sulfatos previamente a la construcción en las instalaciones, analizando el suelo y el agua,

En las estructuras que van a estar sometidas a ataque por sulfatos, el concreto se debe diseñar de acuerdo con el grado del ataque. Los puntos clave por considerar son los siguientes:

- *Permeabilidad:* podemos considerar que un concreto tiene una baja permeabilidad cuando  $k$  (coeficiente de permeabilidad) es menor a  $1 \times 10^{-11}$  m/seg.; una mediana, permeabilidad cuando  $k = 5 \times 10^{-11}$  m/seg., y una alta, permeabilidad cuando  $k = 1 \times 10^{-10}$  m/seg.

- *Relación agua/cemento:* de acuerdo con las condiciones del ataque, pueden requerirse relaciones agua/cemento muy bajos, de acuerdo a la norma NMX-C-403-ONNCCE-1999 para una exposición ligera de agentes químicos cuando existen sulfatos, es decir 5a, la relación a/c va de 0.5 y en caso de utilizar un cemento RS la relación podrá ser de 0.55; para una exposición moderada 5b, recomienda una relación a/c de 0.5; para una exposición alta 5c, recomienda 0.45; y para una exposición muy alta recomienda 0.45. Aunque menciona que la relación agua/cemento no es necesaria especificarla solo en el caso de que el concreto se vaya encontrar en ambientes agresivos, por que en tales condiciones lo que se desea es obtener un concreto de alta densidad e impermeabilidad. Se menciona que en otro caso solo basta con especificar la resistencia de proyecto, ya que para lograr tal resistencia se deberá reducir la relación a/c, de acuerdo a los criterios de diseño.

- *Tipo de cemento:* se recomienda el empleo de CPO en caso de una exposición ligera 5a o el empleo de un RS en el mismo caso, para los demás casos de moderada a muy alto es recomendado el

empleo de cementos RS. El CPO es cemento portland ordinario y los RS son cementos con características especiales de resistencia a los sulfatos de acuerdo a la norma NMX-C-414-ONNCC-1999.

	Grado de exposición			
	suave	moderado	severo	Muy severo
Tipo de cemento recomendado	—	Tipo II, puzolana tipo I, IS (MS), IP (MS). (RS, CPP, NOM C-414)	Tipo V, (CPP, CPGE, NOM C-414)	Tipo V + puzolana (CPP, CPGE, NOM C-414)

Tabla 4.3. Tipos de cementos recomendados según el grado de exposición.

Algunas veces estos tipos de cementos no resulta factible su obtención por lo que se tendrán que tomar alternativas para evitar el deterioro por sulfatos. Realmente recomienda escoger un cemento con bajo contenido de aluminato tricálcico  $C_3A$ , un cemento resistente a el ataque de sulfatos no tiene mas del 5% de  $C_3A$ . El empleo de ceniza volante baja en calcio mejora la resistencia a los sulfatos.

No es recomendable especificar un contenido de cemento para la mezcla ya que este puede variar debido a la finura del cemento, tamaño máximo del agregado y la consistencia del concreto, por lo que para concretos expuestos es mejor recomendar la relación a/c en vez de un contenido de cemento. También es conveniente recomendar un bajo revenimiento, además de una compactación adecuada, recubrimiento, curado húmedo adecuados.

#### 4.2.3. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.

El fenómeno de la corrosión ya ha sido descrito en capítulos anteriores, como el proceso electroquímico que resulta ser. De tal fenómeno se pueden tener como consecuencia se tiene dos efectos. Una es la pérdida de sección de acero con lo que pierde su adherencia con el concreto, afectando en forma negativa sus propiedades mecánicas y, por lo que disminuye su capacidad de trabajo estructural. Por otra parte, debido a la formación de óxidos genera un cambio de volumen, donde dichos cambios generan presiones lo suficientemente poderosas para agrietar el concreto y que puede llevar a que el concreto sufra desprendimientos.

Se debe evitar la ocurrencia de la corrosión del acero de refuerzo, identificando las principales causas que la favorecen, para lo cual se toma en cuenta lo siguiente:

- Excesiva porosidad del concreto (concreto permeable al agua y al aire).
- Reducido espesor del recubrimiento de concreto sobre el refuerzo.
- Existencia de grietas en la estructura.
- Alta concentración de agentes corrosivos en los componentes del concreto.

· Manifestación de corrientes eléctricas en el concreto (corrientes parásitas o generadas internamente por diferencia de potencial).<sup>6</sup>

#### 4.2.3.1. MEDIDAS DE PROTECCIÓN

En el diseño se sugiere en la manera que sea posible tender hacia al uso de secciones de formas redondeadas. En las zonas con ángulos los agentes agresivos actúan desde dos lados. El espesor de recubrimiento puede variar en dos sentidos lo que aumenta el riesgo.

Proporcionar drenajes adecuados debiendo evitarse las superficies horizontales del concreto, o bien tomar medidas especiales de protección si fueran necesarias.

Limitación en el ancho de las fisuras: Fundamentalmente a través de la limitación de la tensión de trabajo del acero y el diámetro de las armaduras. Cuando el ancho de las fisuras medido en la superficie de concreto es menor de 0.4 mm. la presencia de éstas tiene poca importancia.

Cuidado en los detalles de armado: La disposición de las armaduras debe permitir una correcta colocación y compactación del concreto. Deben preverse puntos de inserción para el vibrador, especialmente en el caso de secciones fuertemente armadas.

Espesores de recubrimiento adecuados: los espesores de recubrimientos para el acero de refuerzo es un factor importante en la protección contra el ataque de sustancias químicas como los cloruros, bióxido de carbono, etc. ya que entre mas grande sea el recubrimiento, mayor será la protección al acero. Por lo que la calidad del concreto hablando de permeabilidad y el recubrimiento funcionan juntos. Ya que se puede, hasta cierto grado cambiar uno por otro. Cabe mencionar que el trabajo del recubrimiento no solo es proteger el acero de refuerzo, también brinda protección contra el fuego y la abrasión, además de asegurar la interacción entre el concreto y la armadura. De acuerdo a la NMX-C-403-ONNCE-1999, recomienda los siguientes recubrimientos de acuerdo al tipo de exposición de las estructuras.

RECUBRIMIENTO MÍNIMO (mm.)	Tipos de exposición de las estructuras										
	1	2a	2b	3	4a	4b	4c	5a	5b	5c	5d
Concreto armado	15	20	25	40	40	35	40	Dependerá del tipo de ambiente en que se encuentre			
Concreto presforzado	25	30	35	50	50	45	50				

Tabla 4.4. recubrimientos recomendados de acuerdo al tipo de exposición.

Composición del concreto: Para la selección y especificación de la calidad de los materiales componentes y del concreto, se deben tener en cuenta las condiciones ambientales a que estarán expuestos los distintos elementos de la estructura. En general se recomienda la utilización de a/c menores de 0.50 y contenidos de cemento superiores a 300 kg./ m<sup>3</sup> de concreto. Es aconsejable, además, el uso de aditivos reductores de agua ( plastificantes o superplastificantes ), e incluso de aire. Es necesario un buen curado del concreto, particularmente en el caso de mezclas de elevada sensibilidad ( mezclas a base de cemento portland puzolánico CPP, con escorias de alto horno CPEG, etc. ) . En este caso se recomienda un período mínimo de curado de 14 días., cuidar que los niveles de iones de cloro sean los mas bajos posibles. En la NMX-C-403-ONNCCE-1999, se menciona el contenido de iones de cloro solubles en agua en porcentaje en peso del cemento, así para concreto presforzado se sugiere un máximo permitido de 0.06%, para concreto reforzado en condiciones húmedas se sugiere un porcentaje de 0.08%, pero para condiciones secas sube un poco a 0.15%. Mientras que el ACI 201 recomienda un contenido máximo de cloruros en el concreto, para un concreto en ambiente húmedo, expuesto a la acción de los cloruros siendo este concreto reforzado un valor de 0.30 kg (Cl)/m<sup>3</sup>, y para un concreto en ambiente húmedo, sin estar expuesto a la acción de los cloruros, de 0.50 kg (Cl)/m<sup>3</sup> para concreto reforzado.

Si se desea establecer la cantidad máxima de cloruros que puede soportar la mezcla de concreto fresco es necesario tener en cuenta el contenido de cloruros que define el umbral de riesgo de corrosión en el concreto endurecido así como las condiciones de exposición de la estructura. Dicho umbral de riesgo de corrosión del acero en el concreto endurecido se relaciona con el contenido de cloruros solubles del orden de 0.4% del peso del cemento, de acuerdo al consumo unitario usual de cemento, el cual resulta ser del orden de 1 o 2 kg de ion por m<sup>3</sup> de concreto. Las condiciones de exposición están dadas por la presencia de cloruros en el medio de contacto y la existencia de agua y oxígeno en el medio.

Por lo tanto si la estructura va estar en un medio donde el riesgo de corrosión es alto los contenidos de cloruro tendrá que ser menor, es decir, el contenido de cloruros en la mezcla deberá ser inversamente proporcional al riesgo de corrosión.

Una medida de protección contra la corrosión del acero de refuerzo seria el empleo de ánodos de sacrificio. Los ánodos usados son más "electro-negativos" que el acero, y se corroen más rápido que éste. Comúnmente se usa aluminio, magnesio o zinc, no se requiere una fuente externa de energía en algunos casos. El pequeño voltaje dentro del sistema evita que el hidrogena debilite el acero.



#### 4.2.4. CARBONATACIÓN

Como ya se ha mencionado la carbonatación del concreto es producida por el  $\text{CO}_2$ , el cual reacciona con el hidróxido de calcio que se forma al hidratarse la pasta de cemento, si bien mejora la resistencia a la compresión, también origina contracciones y reduce el pH, lo cual incrementa la posibilidad de corrosión en el acero de refuerzo.<sup>7</sup>

Dicho proceso de carbonatación depende de la permeabilidad del concreto que a su vez depende de la relación agua /cemento, además de tipo de cemento, de la compactación, del recubrimiento y del curado.

La carbonatación se ve acrecentada cuando la humedad relativa se ubica entre 50 y 70 por ciento, y cuando ésta tiene valores < 25 por ciento, la carbonatación se considera insignificante. Pero en las instalaciones petroleras el grado de  $\text{CO}_2$  resulta ser superior. El agua contiene más de 20 ppm de  $\text{CO}_2$  favorecer la rápida carbonatación de la pasta de cemento portland, y para valores menores de 10 ppm el riesgo de carbonatación es insignificante. En la tabla 4.1 de este capítulo se pueden ver los rangos de agresividad  $\text{CO}_2$  dependiendo el grado de exposición. Y en la tabla A.2.a, de la NMX-C-403-ONNCE-1999 recomienda algunos parámetros para la durabilidad dependiendo el grado de exposición.

#### 4.2.5. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

La resistencia de la abrasión del concreto depende en esencia de la resistencia de los agregados a las acciones abrasivas y su composición granulométrica, también de la resistencia mecánica del concreto a compresión, además del buen uso del concreto y correctos procesos constructivos.

Para mejorar la resistencia del concreto al desgaste de la superficie que esta expuesta a la abrasión deberá tenerse en cuenta lo siguiente:

- ◆ Evitar el empleo excesivo de agua en el mezclado.
- ◆ Utilizar las cantidades adecuadas de cemento.
- ◆ Evitar el revenimiento elevado, el cual provocaría el movimiento de las partículas ligeras hacia la superficie y el sangrado.
- ◆ Evitar la manipulación excesiva del concreto.
- ◆ También se deberá evitar contenidos de aire que en los que no se considere las condiciones de exposición.

- ◆ Deberá evitarse las practicas inadecuadas de acabados que favorezcan el proceso de sangrado. Ya que muchas veces al realizar los acabados suele agregarse agua que daña la proporción de la mezcla si no se realiza adecuadamente.
- ◆ Deberá proporcionar al concreto un curado adecuado.
- ◆ Se deberá evitar la carbonatación.
- ◆ Y se deberá tener el cuidado para dejar que el concreto tenga el suficiente tiempo de endurecimiento, y no abrirlo al transito prematuramente.

La resistencia a la compresión es un factor que controla en cierta forma la resistencia a la abrasión, ya que está aumenta al aumentar la resistencia a al compresión. Además ambas resistencias, de compresión y abrasión varían de forma inversamente proporcional a la relación de vacíos (agua + aire)/cemento. Por lo que una dosificación bien hecha no solo daría una buena resistencia a la compresión, sino también una buena resistencia, en a superficie del concreto, a la abrasión.

Otro factor de importancia en la resistencia a la abrasión es al dureza de los agregados (grava y arena), ya que al durabilidad de algunos concreto empleados en lugares muy transitados o por el uso de llantas metálicas o de hule duro, por lo que se hace necesario el empleo de agregados especialmente duros y resistentes. Esto se hace más evidente cuando se emplean concretos de baja resistencia en vez de concretos de alta resistencia.

Los procesos de acabados deben realizarse con especial cuidado si se desea que la superficie de la losa sea de buena calidad, tanto como su parte interior. El retardar las operaciones de aplanado y pulido aumentará la resistencia a la abrasión. Esta demora se recomienda hasta que el agua de la superficie que le da un cierto brillo a la mezcla fresca se haya retirado o desaparecido.

Si se desea que la capa superficial tenga una mejor resistencia al abrasión se puede espolvorear en la superficie cemento en capas secas y arena de tipo duro, o cemento y agregado de hierro.

Un buen curado también aumenta la resistencia a la abrasión, el ACI 301.69 recomienda un curado adicional ya que esto aumenta la resistencia al desgaste, el estudio demostró que un curado a 7 días aumenta al doble la resistencia del concreto al desgaste en comparación de un curado a 3 días.

El nivel adecuado de resistencia del concreto deberá ser de acuerdo al uso que se le dará y también al tiempo de servicio. Para lo cual el ACI 201<sup>1</sup> recomienda que en ningún caso la resistencia a al compresión deberá ser menor a los 280kg/cm<sup>2</sup>.

Para lo cual se recomienda que:

Se debe tener cuidado en la relación agua/cemento.

Se debe dosificar con una granulometría que sea adecuada, se recomienda que el TMA no rebase los 2.54cm., es decir una pulgada.

Se deberá intentar con una cierta consistencia que permita la colocación y la compactación adecuada. Se recomienda un revenimiento de 7.5cm y para acabados de 2.5cm.

De acuerdo con las condiciones de exposición el contenido de aire para pisos interiores que no estén expuestos ciclos de congelamiento, se recomienda que sea del 35 o menor, ya que si el contenido de aire es alto puede reducir la resistencia.

Para cuando se tengan condiciones severas de desgaste se recomienda el empleo de una capas de recubrimiento de lata resistencia no menor a 350kg/cm<sup>2</sup>. Y limitando también el TMA a 12mm o ½ pulgada en el recubrimiento.

El empleo de agregados duros y resistentes le dará al concreto resistencia adicional contra la abrasión, algunos agregados finos que contengan en sílice.

#### 4.2.6. REACCIONES DELETÉREAS DE LOS AGREGADOS.

Todos los agregados son reactivos en menor o mayor grado cuando se incorporan en concreto elaborado con cemento portland. Esto sólo se convierte en un problema cuando los productos de reacción son de una composición determinada y abundantes y su toma de humedad produce fuerzas de expansión destructivas dentro del concreto. Este proceso de reacción involucra la presencia de álcalis en el concreto (usualmente aportados por el cemento, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O), agua y ciertos agregados silíceos. El deterioro debido a esta reacción se manifiesta usualmente en la superficie de la estructura afectada por un sistema regular de fracturas llamado mapeo o patrón de fisuramiento. Este patrón puede ser influido por el tamaño y la forma de la estructura afectada.<sup>8</sup>

La reacción álcali-agregado se define como el proceso físico-químico en el que intervienen algunos minerales de los agregados y los hidróxidos alcalinos del concreto que son aportados principalmente por el cemento, los agregados o por algún agente externo. Este proceso genera presiones de poro lo suficientemente fuertes para producir fisuramiento del concreto y su consecuente deterioro.

Las condiciones que permiten su desarrollo son:

- a) Desarrollo de altas concentraciones de hidróxidos alcalinos en la solución de poro y migración de los reactantes a los sitios de la reacción.
- b) Reacción con las fases reactivas dentro de las partículas de agregado y formación de un producto de reacción (gel).
- c) Flujo o absorción de un fluido en o por el producto de reacción, causando fuerzas expansivas.

d) El estrés o fuerza expansiva actúa en el cemento, el agregado y/o en la zona de adherencia pasta/agregado, causando fracturamiento y el subsiguiente deterioro del concreto.

Comúnmente se admite que existen tres condiciones cuya ocurrencia en el concreto es necesaria para que se produzca y manifieste una reacción álcali-agregado en grado deletéreo:

Primera. Presencia de rocas y minerales reactivos en los agregados, en las proporciones que en cada caso resulten críticas, conforme a su origen y naturaleza.

Segunda. Elevado contenido de álcalis en la mezcla de concreto para mantener una solución fuertemente alcalina en contacto con los agregados.

Tercera. Presencia de humedad capaz de permitir la formación de las soluciones de poro.

En principio se necesita conocer la reactividad de los agregados, en el capítulo 2 de este trabajo se mencionan algunas pruebas, dependiendo el tipo de reacción, además de una lista de algunas rocas reactivas. Si los agregados son reactivos no es recomendable su empleo y mucho menos en contacto con agua de mar o en cualquier otro medio en que los álcalis estén en posibilidad de entrar al concreto.

Si por algún caso no se puede evitar el empleo de agregados reactivos se recomienda limitar los álcalis en el cemento, en la ASTM sugiere que el contenido de óxidos de sodio que son equivalentes a  $0.658 K_2O + Na_2O$  limitándolo a un 0.6% por masa del concreto, anticipando que se ingresen álcalis en forma de solución, utilizar puzolanas, escoria de alto horno, comprobando su eficiencia, debe considerarse que la finura de los componentes incrementara la demanda de agua por lo que habrá el riesgo de contracción por secado, lo cual provocará agrietamientos.

#### 4.2.7. COMO PREVENIR LAS FISURAS

Durante la colocación evite el tráfico y las operaciones sobre las superficies recién acabadas. Una vez realizadas las operaciones de colocación y tan pronto desaparezca el agua de mezclado, lo cual es fácilmente de detectar puesto que la superficie cambia de brillante a mate, proporcione un adecuado curado bien sea mediante cubiertas protectoras o por tratamientos húmedos, tales como el riego directo y la arena constantemente humedecida. Prolongue el curado hasta que la resistencia sea el 70% de la resistencia de diseño, lo cual en concretos normales ocurre alrededor de los 7 días. Proteja la superficie del concreto de las elevadas temperaturas, los rayos de sol, el viento especialmente los cambios bruscos de temperatura. Verifique que las cimbras no se van a mover con la presión del concreto fresco. No se debe alterar el concreto para facilitar las operaciones de acabado, ya que esto hace que el concreto sea más propenso a presentar fisuras debidas a retracción hidráulica. Humedezca el suelo o las cimbras que van a estar en contacto con el concreto para evitar que absorban el agua de mezcla. No se exceda en la vibración del concreto pues la pasta se concentra en la superficie aumentando la exudación y por tanto fomentando la retracción hidráulica que se traduce

en fisuras superficiales. Tenga previstas las juntas constructivas, de dilatación o de contracción, garantizando que no queden en zonas sometidas a fuertes tracciones debido a que pueden originar fisuras. Verifique el recubrimiento de las varillas de refuerzo y de las instalaciones embebidas en el concreto para evitar la aparición de fisuras por reflejo. Evite esfuerzos sobre concretos que no han alcanzado suficiente resistencia, verificando la resistencia antes de descimbrar y/o cargar la estructura.

#### 4.3. RECOMENDACIONES ADICIONALES

Para producir un concreto durable es necesario que todas las actividades que se realizan para la elaboración del concreto se lleven a cabo correctamente, para que se tenga la seguridad de que el concreto satisfará las necesidades para las que se elaboró. Dentro de las causas más comunes por las que el concreto presenta deficiencias encontramos que se debe a la aplicación de procesos constructivos deficientes e inadecuado manejo del concreto. Es importante que se cumplan las prácticas constructivas sugeridas en el diseño, elaboración, transporte, manejo, colocación y acabados con el fin de obtener un concreto que sea durable, lo cual ayudará a obtener un producto de acuerdo a las necesidades, además de bajar los costos de mantenimiento y mejorando la relación entre el costo del proyecto y la vida útil del mismo, por decir algunas.

Dentro de algunas recomendaciones sobre los materiales; se debe cuidar que el cemento que se va emplear no presente señales de humedad, que los sacos no estén rotos, no deben tener más de tres meses de almacenamiento; la dosificación del cemento debe hacerse en masa pesando directamente la cantidad requerida o utilizando sacos completos considerando su peso nominal. El agua que se va emplear en la mezcla debe cumplir con las características de proyecto que por lo general se pide un agua que sea potable, lo cual limita los sólidos inorgánicos disueltos que raramente exceden 2000 ppm y menos de 1000 ppm. Pero debe tenerse en cuenta que algunas aguas que son potables contienen altos índices de sales que serían perjudiciales para el concreto. En la norma NMX-C-283-1982 se establecen los métodos de análisis para determinar las características de las aguas para concreto diferente de la potable, para conocer su calidad y sus posibilidades de uso en la fabricación y el curado del concreto. La cual contiene los métodos para la determinación de: aceite, grasa y sólidos, carbonatos y bicarbonatos como  $\text{CO}_3^{=}$ , sulfatos como  $\text{SO}_4^{=}$ , cloruros como  $\text{Cl}^{-}$ , materia orgánica, magnesio  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{CO}_2$  disuelto, pH, impurezas en solución, álcalis como  $\text{Na}^{+}$ . En cuanto a su dosificación se debe hacer por peso, o por volumen tomando en cuenta la relación aproximada de 1 litro es un 1 kg. En cuanto a los aditivos se debe ajustar a todas las especificaciones de su tipo, su dosificación puede ser en masa o en volumen dependiendo del tipo, para lo cual se debe contar con equipo de medición que asegure una buena aproximación a las cantidades que se requieren. En cuanto a los agregados debe cuidarse su calidad, en la norma NMX-C-305-1980 encontramos la clasificación de los agregados para concreto y en la norma NMX-C-180-

1986 muestra la determinación de la reactividad potencial de los agregados con los álcalis del cemento.

En cuanto al método de mezclado debe realizarse por medio mecánico para poder asegurar la uniformidad de la misma y además para que el tiempo de mezclado sea razonablemente corto. El tiempo mínimo de mezclado dependerá de la capacidad de la mezcladora, los tiempos recomendados por la norma NMX-C-403-ONNCCE-1999, son para mezcladoras de hasta 4.5 m<sup>3</sup>, para mezclas hechas con en camión mezclador deberá cumplir la norma NMX-C-155.

En cuanto al transporte debe ser lo suficientemente rápido para que no se pierda revenimiento y lo suficiente mente eficaz para que no haya segregación de los materiales y se pierda mortero o lechada. La elección del medio de transporte dependerá de el volumen de concreto que se empleará, distancias mínimas y máximas, revenimiento, T. M. A., accesibilidad a las cimbras para colocación del concreto y del tiempo del que se disponga para este trabajo.

Respecto a su colocación; no se debe colocar concreto segregado pues no cumple con la homogeneidad que se requiere en las estructuras de concreto; no debe dejar caer el concreto a que esto provocaría segregación, la altura máxima se de 1.5m; debe evitarse el desplazamiento en forma horizontal del concreto con una tolerancia de 50 cm, debe asegurar que el vibrado llegue a todas las capas; se recomienda el empleo de embudos, para que el concreto baje verticalmente, dentro del ACI 304 se encuentra información sobre la colocación del concreto.

Por medio de la compactación permite que el concreto llegue a todos los espacios de la cimbra, dándole a esta la mayor capacidad, dicha compactación se realiza por medio de vibración aplicándole vibraciones superiores a las 3000 vibraciones por minuto. La vibración debe aplicarse en forma inmediata a la colocación del concreto con lentitud y de dirección vertical, aplicándolo a distancia regular; el vibrador debe permanecer en el concreto en cada inserción dependiendo de la consistencia, y debe de dejarse de aplicar en el momento en que la superficie presente brillo que indique el flujo de la lechada; debe evitar sobrevibrar el concreto ya que podría generar segregación.

El método de curado dependerá de las circunstancias y tipo de obra, para elementos horizontales el método aceptable es el de inundar con agua limpia, rociando permanentemente o con cubiertas húmedas saturadas de agua, mientras se mantenga la presencia del agua de mezclado ene l concreto durante el periodo de endurecimiento todo estará bien; otro es por medio del sellado de la superficie del concreto evitando la pérdida del agua de mezclado, lo cual se puede hacer cubriendo el concreto con plástico o aplicando algún compuesto que forme membranas. El concreto debe curarse inmediatamente después de su colocación, como referencia se menciona que en cuanto el concreto pierde si brillo por efecto del agua propia de la mezcla, en ese momento debe iniciarse el

curado; si la temperatura del ambiente es superior a los 10°C, se recomienda que el curado se realice mínimo 7 días, en el caso de que el concreto sea sensible al curado o las condiciones ambientales sean muy agresivas se recomienda un curado mínimo de 14 días. En los reportes de ACI 305 y 306 se encuentran recomendaciones para curado en climas fríos y climas cálidos respectivamente.<sup>9</sup>

En cuanto al descimbrado, debe realizarse con el cuidado de no perjudicar la seguridad de las estructuras, para poder ser descimbrado el concreto debe ser capaz de soportar su propio peso, y lo suficientemente resistente para no sufrir ningún daño posteriormente y lo suficientemente rígido para no presentar deformaciones indeseables. Se deberá dejar apuntalado los elementos horizontales el mayor tiempo posible.

## REFERENCIAS

1. Comité ACI 201, "Suplemento mexicano del Comité ACI 201 Guía para la Durabilidad del Concreto", Sección Centro-Sur del American Concrete Institute, Guía del consumidor de concreto premezclado de Cemex, 4ª. ed., 1998.
2. Mena, F.M., Concreto en clima caluroso, Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto: Durabilidad, Monterrey, N.L., México, 1993.
3. NMX-C-403-ONNCCE-1999, "Industria de la Construcción – Concreto Hidráulico para Uso Estructural", 24 de nov. de 1999.
4. NMX-C-414-ONNCCE-1999, "Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos – Especificaciones y Métodos de Prueba". 6 de julio de 1999.
5. "Manual de Tecnología del Concreto", Vol. III, Concreto en Estado Endurecido, manual elaborado por el Instituto de Ingeniería, UNAM, a petición de la gerencia de Ingeniería Experimental y control, de la Subdirección Técnica, C. F. E. 1994.
6. Adam M. Neville, " Tecnología del Concreto", IMCYC, primera edición 1999, pag. 337 –374.
7. Ing. R. Uribe Afif, XI congreso Nacional de Ingeniería Estructural, "Concreto Durable, El Inicio del Cambio", Monterrey, N. L., IMCYC, vol. 13, num. 141, pag. 25-32.
8. NMX - C -11, Industria de la Construcción, Concreto – Agregados – Especificaciones. 1998.
9. ACI 305 y 306, "Elaboración, Colocación y Protección del concreto en clima caluroso y frio", IMCYC, 1995.



## **CONCLUSIONES**

---

El deterioro acelerado de las estructuras de concreto es la causa fundamental para que se dé un cambio en la manera de diseñar y construir. Debe verse al concreto no solo como el material que resiste muy bien las cargas a compresión, sino como un material al cual debe analizarse en forma particular las condiciones de exposición y servicio en las que va a trabajar.

Son muchas las sustancias que atacan al concreto dentro de las principales encontramos a los sulfatos, cloruros, bióxido de carbono, y algunos ácidos, su mecanismo de ataque, como se vio, es reaccionando con algún componente de la mezcla del concreto, dentro del cual también existen sustancias que merman su durabilidad, provocando deterioro de la mezcla de concreto o de los materiales que se encuentran embebidos en ella, como es el caso del acero de refuerzo, que se corroe debido a una reacción electroquímica.

Las condiciones de exposición a las que el concreto es sometido pueden llegar a ser muy severas, en nuestro país existe una gran diversidad de climas, pero se concluye que las condiciones más severas, hablando de climas en nuestro país, son las de un clima caluroso y húmedo. El clima caluroso aunado a los vientos, acelera el proceso de evaporación y provoca agrietamientos, que permitirán la penetración de agentes que deterioran al concreto o los materiales que en él se encuentren. Existen también en nuestro país una gran diversidad de rocas de las cuales son obtenidos los agregados, se observó la clasificación de las regiones fisiográficas y las regiones donde existe el riesgo de encontrarse con agregados que provoquen una reacción con los álcalis del cemento. Si es posible analizar los agregados y anticipar la reacción que se dará en el concreto al utilizar agregados reactivos se pueden tomar medidas para minimizar el daño, como por ejemplo el empleo de cemento con un contenido bajo de álcalis.

Es importante ver que las condiciones de servicio a las que se encuentra en contacto el concreto dentro de las instalaciones petroleras puede llegar a ser muy severas como es el caso del contacto con los sulfatos, como resultado de los procesos en la industria. El azufre es tanto una materia prima subproducto de la industria petrolera, ya que sale como parte del crudo siendo un contaminante del mismo, es separado del crudo y también forma parte de las emisiones de la industria, lo cual resulta en incremento de los niveles de bióxido de azufre en la atmósfera, los cuales al precipitarse penetran en las estructuras de concreto, ayudados por la humedad ambiental, deteriorando al concreto. Aunado a eso se encontró que las instalaciones que se encuentran en proximidad al mar se ven afectadas por dicho entorno, altos niveles de sales y cloruros. Que se ve acelerada por la humedad ambiental que impera en las zonas costeras, por su proximidad con el mar.

Como producto de las actividades de la industria se encontró que el bióxido de carbono resulta de los procesos de endulsamiento del gas y en la combustión del crudo y los hidrocarburos. El cual es el

causante de la carbonatación del concreto e incrementa la posibilidad de corrosión del acero de refuerzo.

Por tanto es necesario que el concreto que se elabore para estas instalaciones tenga la calidad y durabilidad que requiere para soportar las condiciones a las que estará expuesto dentro de las instalaciones petroleras, si bien el costo de hacer un concreto de calidad y con una durabilidad adecuada resulta alto, a primera vista, la verdad es que resulta más económico elaborar este concreto, que un concreto al que se le tenga que estar dando mantenimiento o reparándolo, continuamente, lo cual incrementa el costo al final. Y en algunos casos las reparaciones resultan ser poco efectivas cuando las condiciones de servicio son muy severas. Es por tal razón que no podemos comparar un concreto convencional y un concreto de alto comportamiento. Al elaborar un concreto durable puede resultar que la resistencia obtenida sea superior a la especificada en proyecto, ya que para hacer un concreto durable se requiere mejor calidad, por lo que se concluye que la resistencia mecánica no es un factor definitivo en el incremento de la durabilidad.

Si bien en México ya existe una norma en la cual se encuentra los requisitos mínimos para un concreto durable, hace falta orientar más dichos requerimientos hacia las necesidades que en la industria petrolera existen, este trabajo presenta una visión muy general de los agentes físicos y químicos por los cuales la durabilidad del concreto en las instalaciones petroleras se ve reducida y mostrando algunas de las recomendaciones que se requieren para minimizar los daños y obtener un concreto durable, con lo cual se cumple con el objetivo de esta tesis.

Se pretende que este trabajo sirva a aquellas personas interesadas en la durabilidad del concreto y a estudiantes para que tengan una mejor visión del concreto, no solo como un material estructural, al que anteriormente se le consideraba eterno, si no para sensibilizar acerca de las condiciones de servicio y de exposición a las que el concreto trabajará, y que podría hacer que la estructura no cumpliera con las necesidades de servibilidad y durabilidad. Lo esperado en el futuro próximo será, que cuando se determinen las características del concreto, deberá darse prioridad a las condiciones de exposición ambiental, sobre los requerimientos estructurales con el fin de asegurar que la estructura de concreto sea durable.