

01146

Universidad Nacional Autónoma de México

División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería



“Guía para prevenir y controlar el deterioro de las estructuras de concreto sometidas a ambientes marinos”

Tesis

para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería Civil
(Construcción)

del alumno:

Ing. Rigel Ruiz Osuna

Director de tesis:

Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

México, D. F.; Julio de 2003.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Universidad Nacional Autónoma de México

División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería



“Guía para prevenir y controlar el deterioro de las estructuras de concreto sometidas a ambientes marinos”

Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil (Construcción) del alumno:

Ing. Rigel Ruiz Osuna

Director de tesis: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes

México, D. F.; Julio de 2003.

Agradecimientos.

A Dios por haberme dado salud para terminar esta Maestría y mi tesis.

A mi Esposa por su gran paciencia.

A mi Familia por su apoyo incondicional.

A mi director de Tesis, Ing. Juan Luis Cottier Caviedes por sus asesorías.

Al Lic. Luis Enrique López Navidad y el Ing. Eduardo Alcántara León; gerente y jefe de laboratorio de la Planta de CEMEX Concretos Mazatlán respectivamente; por haberme facilitado sus instalaciones para la realización de esta tesis.

A todos los maestros de la Sección de Construcción por sus buenas enseñanzas.

A los maestros sinodales por sus buenas correcciones.

A la Universidad Autónoma de Sinaloa y a la Universidad Nacional Autónoma de México; por la oportunidad que me brindaron.

Indice

Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes.....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Estructura porosa del concreto.....	2
1.2.1. Fases que componen la estructura del concreto.....	3
1.2.1.1. Fase agregado.....	4
1.2.1.2. Fase de pasta de cemento hidratado.....	4
1.2.1.2.1. Sólidos de la pasta de cemento hidratada.....	5
1.2.1.2.2. Poros en la pasta de cemento hidratada.....	5
1.2.1.2.3. Agua en la pasta de cemento hidratada.....	6
1.2.1.2.4. Relaciones estructura-propiedades de la pasta de cemento hidratada.....	6
1.2.1.2.4.1 Resistencia.....	6
1.2.1.2.4.2. Estabilidad dimensional.....	8
1.2.1.2.4.3. Durabilidad.....	8
1.2.1.3. Fase de zona de transición entre la pasta y el agregado.....	9
1.3. Procesos de absorción del concreto.....	9
1.4. Características de durabilidad del concreto.....	10
Capítulo 2. Tipos de sulfatos.....	14
2.1. Introducción.....	14
2.2. Naturaleza.....	14
2.2.1. Sulfatos de origen natural.....	15
2.2.2. Sulfatos de origen biológico.....	16
2.2.3. Sulfatos de origen industrial.....	16
2.3. Formas de presencia en la obra.....	16
2.4.- Conclusión.....	17
Capítulo 3. Cementos Portland resistentes a sulfatos.....	18
3.1. Introducción.....	18
3.2. Tipos de cementos en México según NMX-C-414-ONNCCE.....	18
3.3. Composición química.....	19
3.3.1. Cemento Portland Ordinario (CPO).....	19
3.3.2. Cemento Portland Puzolánico (CPP).....	19
3.3.3. Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno (CPEG).....	19
3.3.4. Cemento Portland Compuesto (CPC).....	19
3.3.5. Cemento Portland con humo de sílice (CPS).....	19
3.3.6. Cemento con Escoria Granulada de alto horno (CEG).....	19
3.4. Usos.....	20
3.4.1. Cemento Portland Ordinario (CPO).....	20
3.4.1.1. Cemento Portland Ordinario de clase resistente 20 (CPO 20).....	21
3.4.1.2. Cemento Portland Ordinario de clase resistente 30 y 30R, (CPO 30 y CPO 30R).....	21
3.4.1.3. Cemento Portland Ordinario de clase resistente 40 y 40R, (CPO 40 y CPO 40R).....	22
3.4.2. Cemento Portland Puzolánico (CPP).....	23
3.4.2.1. Cemento Portland Puzolánico de clase resistente 20, (CPP 20).....	23

3.4.2.2. Cemento Portland Puzolánico de clase resistente 30, 30R, 40 y 40R, (CPP 30, CPP 30R, CPP 40 y CPP 40R).	24
3.4.3. Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno (CPEG).	25
3.4.3.1. Cemento Portland con escoria Granulada de alto horno de clase resistente 20, (CPEG 20).	25
3.4.3.2. Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno de clase resistente 30, 30R, 40 y 40R, (CPEG 30, CPEG 30R, CPEG 40 y CPEG 40R).	26
3.4.4. Cemento Portland Compuesto (CPC).	26
3.4.4.1. Cemento Portland Compuesto de clase resistente 20, (CPC 20).	27
3.4.4.2. Cemento Portland Compuesto de clase resistente 30, 30R, 40 y 40R, (CPC 30, CPC 30R, CPC 40 y CPC 40R).	27
3.4.5. Cemento Portland con humo de Sílice (CPS).	28
3.4.5.1. Cemento Portland con humo de Sílice de clase resistente 20, (CPS 20).	28
3.4.5.2. Cemento Portland con humo de Sílice de clase resistente 30, 30R, 40 y 40R, (CPS 30, CPS 30R, CPS 40 y CPS 40R).	29
3.4.6. Cemento con Escoria Granulada de alto horno (CEG).	29
3.4.6.1. Cemento con Escoria Granulada de alto horno de clase resistente 20, (CEG 20).	30
3.4.6.2. Cemento con Escoria Granulada de alto horno de clase resistente 30 y 30R, (CEG 30 y CEG 30R).	30
3.4.7. Cementos con características especiales.	31
3.4.7.1. Cemento resistente a sulfatos.	31
3.4.7.2. Cemento con Baja Reactividad Alkali Agregado.	32
3.4.7.3. Cemento con Bajo Calor de Hidratación.	32
3.4.7.4. Cemento Blanco.	32
3.5. Conclusión.	33
Capítulo 4. Estudio de las causas del deterioro actual.	34
4.1. Introducción.	34
4.2. Síntomas de deterioro.	34
4.3. Conclusión.	41
Capítulo 5. Estudio de concreto fabricado con diferentes cementos y sometidos a diferentes condiciones.	42
5.1. Introducción.	42
5.2. Concreto fabricado con diferentes tipos de cementos.	42
5.3. Tipos de condición: agua potable, agua de mar y en el terreno.	45
5.4. Resultados.	49
5.5. Conclusión.	61
Capítulo 6. Evaluación de las normas vigentes sobre el uso de concreto en ambientes marinos.	62
Capítulo 7. Conclusiones.	63
GLOSARIO.	65
Anexo A	66
BIBLIOGRAFÍA.	67

Introducción

En la actualidad en México se puede observar como algunas estructuras de concreto que se encuentran en las costas o muy cercanas a ellas sufren deterioro a muy temprana edad debido a la cercanía del ambiente marino, ocasionando gastos extras para las personas propietarias de las estructuras y para el constructor como es el caso del Puerto de Mazatlán, Sinaloa, por citar un ejemplo.

Dichos deterioros se deben a la acción de los sulfatos en el concreto, que es un fenómeno que aún en nuestros días no está bien comprendido por algunos ingenieros civiles que diseñan estructuras de concreto sólo para soportar las fuerzas mecánicas a las que estarán sometidas y no para las agresiones del medio ambiente.

Desgraciadamente en México existe una falta de cultura de calidad en la construcción, acompañada de falta de ética cuando se construye una obra de concreto, al igual que existe un desconocimiento de la estructura del material y sus reacciones químicas al medio ambiente que lo rodea.

La presente tesis pretende dar al ingeniero civil constructor una guía de recomendaciones para prevenir y controlar el deterioro de las estructuras de concreto que se construyen cerca de playas o muelles, esperando que este trabajo sea de utilidad para los estudiantes de ingeniería civil y para los ingenieros que ejercen la profesión.

La tesis se divide en ocho capítulos, de los cuales en el primero se habla de la estructura y durabilidad del concreto. En el segundo capítulo se mencionan los tipos de sulfatos que atacan al concreto. El tercer capítulo trata de los tipos de cementos en México para elaborar concreto y cuales son los aptos para usarse en un ambiente marino. En el cuarto se hace una evaluación de las causas del deterioro actual. En el capítulo cinco se obtienen resultados de resistencia de probetas de cilindro de concreto realizadas con diferentes tipos de cemento y expuestas a diferentes condiciones. En el sexto capítulo se hace una revisión de la normativa existente al respecto, y en el capítulo siete como conclusiones se dan alternativas para la prevención y el control del deterioro.

Por último se aclara que en el título de esta tesis al hablar de prevención se trata de que el daño por los sulfatos no se presente y al hablar de control se refiere a que si el daño llega a presentarse sea mínimo, sin causar estragos en la estructura.

Capítulo 1. Antecedentes.

1.1. Introducción.

Mucha gente podría pensar, al igual que muchos ingenieros civiles y arquitectos, que una estructura diseñada para soportar grandes cargas y de gran estética como los edificios, presas, residencias, etc., están hechas para durar para siempre.

La mayoría de los ingenieros diseñan una estructura de concreto para que tenga una resistencia aceptable ante las cargas a las cuales prestará el servicio, pero no para que las estructuras de concreto soporten las agresiones de los agentes de carácter químico como cuando está sometida a un ambiente marino presentando a corto plazo un deterioro que merma la vida útil, creando un complejo problema que genera gastos al dueño y al constructor. Como ejemplo están las construcciones que se encuentran a lo largo del malecón y en la zona industrial en la Ciudad Mazatlán, Sinaloa.

Todos los años a las personas que habitan estas construcciones se les puede observar haciendo reparaciones, generalmente sin asesoría capacitada, que les implica un gasto extra.

Esos gastos se pueden evitar teniendo una cultura de calidad en la construcción y en los materiales que se emplean (que en la actualidad no la hay), además de tener un conocimiento de la estructura interna del concreto y su comportamiento al estar sometido a la agresión del medio ambiente marino.

El objetivo de este capítulo es el de conocer la estructura interna del concreto, para comprender como se llevan a cabo los procesos de su deterioro al estar expuesto a un ambiente marino.

1.2. Estructura porosa del concreto.

Los poros son los espacios vacíos que quedan en la masa del concreto, producto de la evaporación del agua excedente en el amasado de éste o los del aire atrapado en su manipulación, y que permiten que presente cierta permeabilidad a líquidos y gases.

La estructura porosa del concreto es de gran importancia para lograr un concreto de calidad, al estar envueltos los poros del concreto en los procesos de deterioro químicos y físicos, junto con las grietas y el agua.

En la permeabilidad de la estructura de concreto existen dos parámetros de importancia: la porosidad abierta y la distribución y medida del poro. La porosidad abierta ocurre cuando están interconectados entre sí y la distribución

y medida de poro es la manera en que están distribuidos en la superficie del concreto y al tamaño de ellos.

Los poros en el concreto se clasifican por sus orígenes en:

- Poros gel (micro-poros, es decir < 50 nm).
- Poros de capilaridad.
- Poros de compactación o de aire (macro-poros, es decir > 50 nm).¹

Los macro-poros y poros por capilaridad son los más importantes en la resistencia a los ataques químicos y físicos (ver Fig. 1.1).²

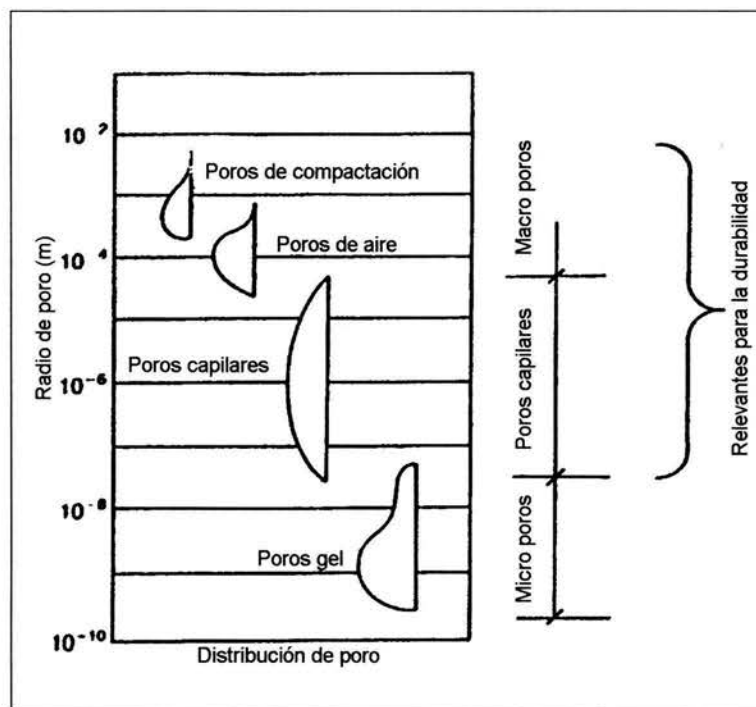


Fig. 1.1. Distribución de la medida de poro.

1.2.1. Fases que componen la estructura del concreto.

Para comprender mejor el origen de la estructura porosa del concreto es necesario conocer las fases que componen su estructura. Estas fases son: el agregado, la pasta de cemento hidratada y la zona de transición entre la pasta y el agregado a nivel microscópico (ver Fig. 1.2).

¹ Ver definición de nm (Nanómetro) en el glosario.

² Boletín de información No. 183 del COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON, *Durable concrete structures: desing guide*, Mayo 1992, págs. 3 - 4.

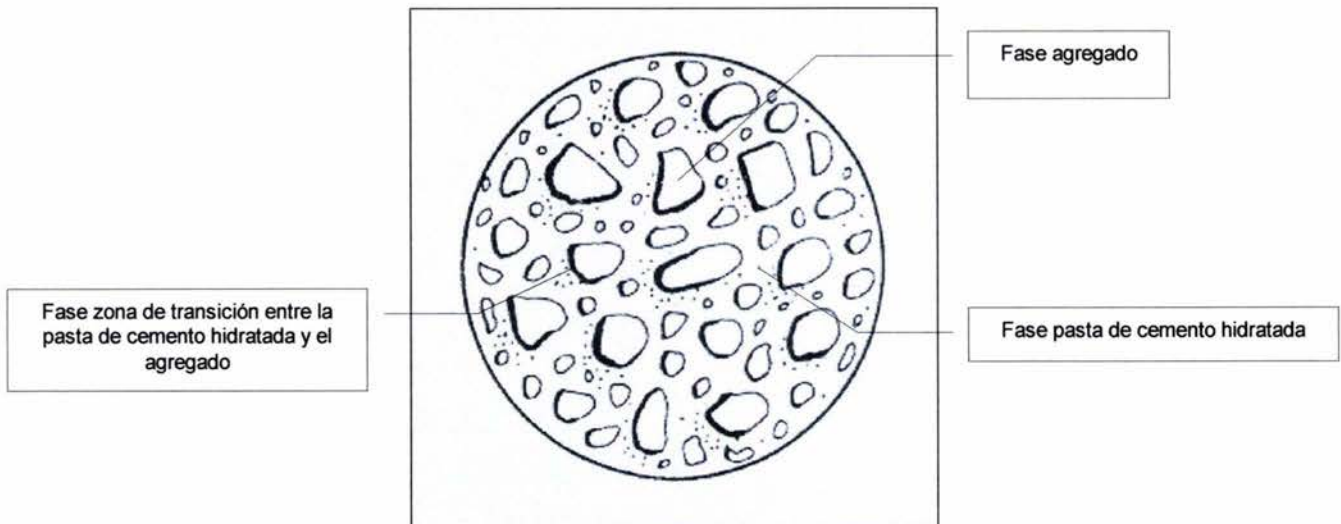


Fig. 1.2. Fases que componen la estructura del concreto.

1.2.1.1. Fase agregado.

La fase del **agregado** es la responsable del peso unitario del concreto, de su módulo de elasticidad y de su estabilidad dimensional. Estas propiedades dependen en gran parte de la densidad y de la resistencia del agregado que a su vez están determinadas por las características físicas de éste, como volumen, tamaño y distribución de los poros más que por la composición química o mineral.

Esta fase es la más resistente de las tres pero no tiene una influencia directa en la resistencia del concreto, a menos que esta sea muy porosa o débil. Sin embargo, tiene una influencia indirecta cuando sus partículas son grandes y de forma alargada y plana, que pueden provocar el fenómeno denominado sangrado interno del concreto, caracterizado por la formación de películas de agua alrededor del agregado grueso que debilitan la zona de transición entre la pasta y el agregado.

1.2.1.2. Fase de pasta de cemento hidratado.

La fase de pasta de cemento hidratado es una mezcla de cemento Portland con agua, en la cual, después de las reacciones químicas que tiene el cemento hasta llegar a su hidratación se forman algunos elementos sólidos tales como hidrato de silicato de calcio (H-S-C), hidróxido de calcio, sulfoaluminatos de calcio y granos de clinker no hidratados. También se forman los poros gel, los poros capilares y los poros de compactación o de aire; además puede encontrarse agua capilar, absorbida entre capas y químicamente combinada.

1.2.1.2.1. Sólidos de la pasta de cemento hidratada.

El sólido **hidrato de silicato de calcio (H-S-C)** representa entre 50 y el 60% del volumen de una pasta de cemento completamente hidratada, siendo el más importante para determinar las propiedades de la pasta.

Según el modelo de Powers Bruneauer, está formado por una estructura de capas con un área superficial alta y la resistencia es atribuida a las fuerzas de Van der Waals. Es aquí donde se forman los poros gel que son la separación entre capa y capa que, según este modelo, llegan a medir aproximadamente 18 angstrom.³

Otro modelo llamado Feldman – Sereda, considera a la estructura formada por una disposición irregular o enredada de capas distribuidas al azar creando espacios de diferentes formas y tamaños que van desde los 5 a los 25 angstrom.

El **hidróxido de calcio**, también llamado “portlandita”, constituye del 20 al 25% del volumen de la pasta de cemento completamente hidratada.

Los **sulfoaluminatos** ocupan del 15 al 25% del volumen de la pasta de cemento completamente hidratada.

Los **granos de clinker no hidratados** son partículas de clinker grandes, que no se terminaron de disolver durante el proceso de hidratación y que debido al reducido espacio entre partículas los productos de la hidratación tienden a cristalizar estas partículas y a cubrirlas, dando la impresión de que son partículas de clinker en su morfología.

1.2.1.2.2. Poros en la pasta de cemento hidratada.

Durante la hidratación de la pasta de cemento se forman los poros que pueden ser gel, de capilaridad y de compactación o de aire.

Los **poros de capilaridad** son los espacios no llenados por los productos sólidos de la pasta de cemento al término de su hidratación. Determinados en su volumen y forma por la relación agua/cemento y el grado de hidratación del cemento, los poros capilares pueden llegar a medir de 10 a 50 nm en una pasta con una baja relación agua/cemento y de 3 a 5 μm en una pasta de alta relación agua/cemento a edades tempranas de hidratación.⁴

Los **poros de compactación o de aire** son producto del atrapamiento de aire durante la manipulación de la pasta o ya sea por la inclusión a voluntad de

³ Ver definición de angstrom en el glosario.

⁴ Ver definición de μm (Micrómetro) en el glosario.

aire atrapado para el caso de climas fríos. El tamaño de los poros de aire puede ser de 3 nm y en los de aire incluido de 50 a 200 μm .

1.2.1.2.3. Agua en la pasta de cemento hidratada.

En cuanto al agua existente en la pasta de cemento hidratada puede encontrarse el **agua capilar** que es la que existe en los poros capilares ya sea en los mayores de 50 angstrom, que se considera agua libre, o en los menores de 50 angstrom, que es agua retenida por tensión capilar y que si se remueve podría causar retracción del sistema.

Se puede encontrar **agua absorbida** por las moléculas de hidrógeno de la pasta de cemento hidratada, la cual podría perderse por secado de la pasta de cemento hidratada con 30% de humedad relativa, provocando retracción por secado.

El **agua entre capas** es la existente entre las capas del hidrato de silicato de calcio y que puede perderse por un fuerte secado de 11% de humedad relativa.

El **agua químicamente combinada** forma parte integral de los productos de la hidratación.

1.2.1.2.4. Relaciones estructura-propiedades de la pasta de cemento hidratada.

1.2.1.2.4.1 Resistencia.

La resistencia se ve afectada en el caso de que exista una mala distribución de los poros capilares o de aire grandes, los cuales dependen de la relación agua/cemento que se utilice y del grado de hidratación según muestra un experimento realizado por Powers.

En ese experimento para un caso A, una pasta con relación agua/cemento de 0.63 que contiene 100 cm^3 de cemento, requerirá 200 cm^3 de agua; esto produce 300 cm^3 de volumen de pasta o espacio total disponible. El grado de hidratación del cemento dependerá de las condiciones de curado (duración de la hidratación, temperatura y humedad).

Suponiendo que bajo las condiciones estándar de ASTM, el volumen de cemento hidratado a 7, 28 y 365 días es 50, 75 y 100% respectivamente, el volumen calculado de sólidos (cemento anhidro más el producto de hidratación) es de 150, 175 y 200 cm^3 . El volumen de los poros capilares puede encontrarse por la diferencia entre el espacio total disponible y el volumen total de sólidos. Esto es 50, 42 y 33% respectivamente, a 7, 28 y 365 días de hidratación.

Para el caso B, se supone un grado de 100 por ciento de hidratación para cuatro pastas de cemento hechas con agua que corresponden a relaciones agua/cemento de 0.70, 0.60, 0.50 y 0.40. Para un volumen dado de cemento, la pasta con mayor cantidad de agua tendrá el volumen total mayor de espacio disponible. Sin embargo, después de completarse la hidratación, todas las pastas contendrán la misma cantidad de producto sólido de hidratación. Por lo tanto, la pasta con el mayor espacio total terminará con un correspondiente volumen mayor de poros capilares. (ver Fig. 1.3).

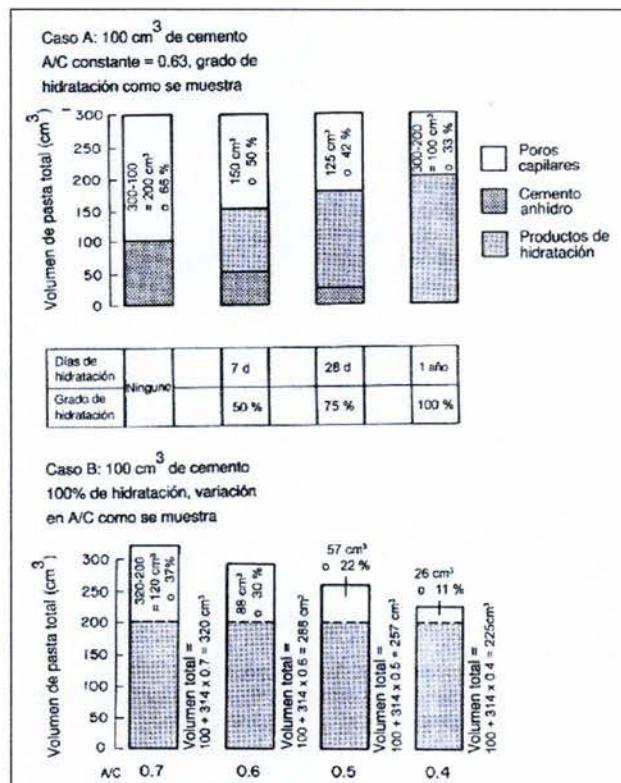


Fig. 1.3. Cambios en la porosidad capilar con diversas relaciones agua/cemento y grados de hidratación.⁵

Con ese experimento Powers demostró la relación que existe entre la resistencia a la compresión y la relación sólido/espacio, y estableció la siguiente expresión (ver Fig. 1.4):

$$S = kx^3$$

donde:

S = resistencia a la compresión.

K = constante experimental igual a 2,390 kg-f/cm².

X = relación sólido/espacio.

⁵ P. KUMAR MEHTA, P. J. M. MONTEIRO, *Concreto: estructura, propiedades y materiales*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, D. F., 1998, pág. 23.

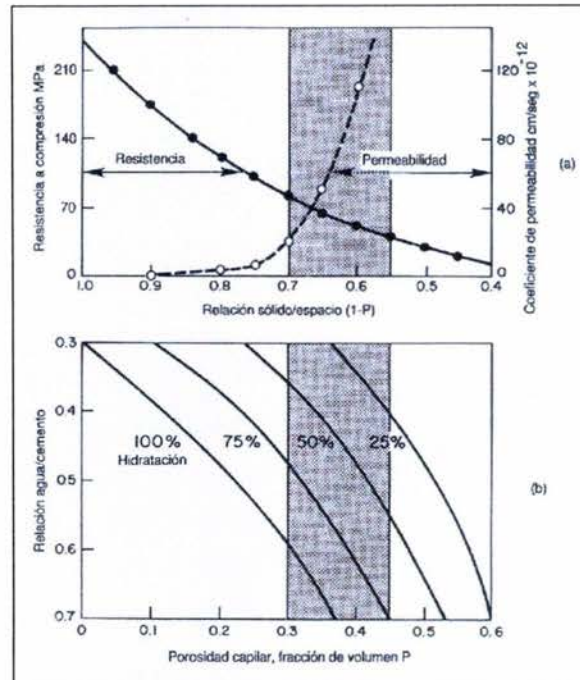


Fig. 1.4. Influencia de la relación agua/cemento y grado de hidratación, sobre la resistencia y la permeabilidad.⁶

1.2.1.2.4.2. Estabilidad dimensional.

La estabilidad dimensional de una pasta de cemento hidratada no es estable debido a que cuando la mezcla está expuesta al medio ambiente, comenzará a perder agua debido a que la humedad del medio ambiente es inferior al cien por ciento. Primero empezará a perder el agua libre en los macro-poros y posteriormente cuando casi la totalidad de dicha agua se ha perdido comenzará a perderse el agua absorbida en los micro-poros, provocando una retracción del sistema.

1.2.1.2.4.3. Durabilidad.

La durabilidad está íntimamente ligada con la impermeabilidad de la pasta de cemento hidratada, que es muy importante para lograr concretos impermeables debido a que dicha pasta es alcalina y su exposición a aguas agresivas podría ser perjudicial para el material.

La permeabilidad al igual que la resistencia están íntimamente relacionadas con la relación sólido/espacio de acuerdo al experimento de Powers (ver Fig. 1.4).

⁶ Ibid., pág. 24.

1.2.1.3. Fase de zona de transición entre la pasta y el agregado.

La zona de transición entre la pasta y el agregado está compuesta de los mismos elementos de la pasta de cemento hidratada, pero sus propiedades son muy diferentes. Esto es debido a la formación del sangrado interno del concreto, es decir las partículas de agua que se adhieren al agregado grueso cuando el concreto es colocado y compactado, y a la formación de los iones de calcio, de sulfato de hidroxilo y de aluminato, producidos por la disolución de los compuestos de sulfato de calcio y del aluminato de calcio, combinándose para formar etringita e hidróxido de calcio.⁷

Si se tiene una relación agua/cemento, los productos cristalinos cercanos al agregado grueso estarán formados por cristales relativamente más grandes, generando por lo tanto una estructura más porosa que la de la pasta de cemento hidratada.

La resistencia de la zona de transición puede llegar a ser mayor que la de la pasta de cemento hidratada con el incremento de la edad del concreto; esto es debido a la cristalización de productos nuevos en los poros de la zona de transición por reacciones químicas lentas entre los componentes del cemento y el agregado.

Aparte de los poros capilares y de los cristales de hidróxido de calcio orientados, el principal responsable de la resistencia de la zona de transición son las micro-grietas, que éstas dependen del tamaño del agregado, granulometría, contenido de cemento, relación agua/cemento, grado de compactación del concreto fresco, condiciones de curado, humedad del ambiente y la historia térmica del concreto.

Con la existencia de estas micro-grietas en la zona de transición el concreto falla cuando es sometido a esfuerzos de aproximadamente 70% de su resistencia última, creándose concentraciones de esfuerzo en los macro-poros generando así agrietamiento en la pasta de cemento uniéndose estas a las de la zona de transición y provocando la falla total.

Por último, cabe mencionar que la zona de transición tiene gran influencia en la rigidez, el módulo de elasticidad y en la durabilidad del concreto.

1.3. Procesos de absorción del concreto.

La durabilidad del concreto es afectada por los procesos físicos, químicos y biológicos del ambiente al que se encuentre sometido; pero para que éstos se desarrollen, se necesita la presencia de agua para el transporte de agentes deletéreos que afectan al concreto. Así los factores a considerar son: la

⁷ Ver definición de Etringita en el glosario.

estructura porosa del concreto y las grietas y el agua como agente de transporte.

Los procesos de absorción del concreto, mejor conocidos como los mecanismos de transporte de sustancias deletéreas, son:

- Mecanismo de transporte por el aire húmedo.
- Mecanismo de transporte por la lluvia ó por salpicaduras.
- Mecanismos de transporte por inmersión.

El **mecanismo de transporte por el aire húmedo** se desarrolla cuando el concreto ya endurecido se encuentra sometido a un medio ambiente húmedo. Los poros por capilaridad y los macro-poros son llenados por agua o por vapor de agua llevando con ellos gases como el bióxido de carbono que afecta a las paredes de los poros y oxígeno que causa la corrosión del acero de refuerzo ó sustancias disueltas en el agua como los sulfatos y cloruros.

El **mecanismo de transporte por la lluvia ó salpicaduras** se desarrolla cuando la superficie del concreto es humedecida, provocando que los poros se llenen de agua y llevando con ella sustancias disueltas y pudiendo ser la difusión de gases nula.

El **mecanismo de transporte por inmersión** se desarrolla cuando el concreto se encuentra completamente sumergido en agua, provocando la penetración del agua en los poros acelerada por la presión hidráulica. Aquí el agua transporta sustancias que reaccionan químicamente con el concreto o con el acero de refuerzo, pudiendo formar la cristalización de algunas sales y provocar expansiones que causan el deterioro del concreto.

1.4. Características de durabilidad del concreto.

Se entiende por durabilidad del concreto como la capacidad de éste de resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, el concreto durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga a su medio ambiente.

La falta de durabilidad de las estructuras de concreto puede deberse a tres factores principales como son:

1. Mala selección de los materiales para la elaboración del concreto.
2. Errores en la construcción por la falta de un buen control de calidad en la mano de obra de la colocación y curado del concreto y de la colocación del acero.
3. Errores en el diseño estructural.

Estudios recientes muestran que la falta de durabilidad de las estructuras de concreto se deben a esos factores en la siguientes proporciones (ver Fig. 1.5)⁸:

Factor	Porcentaje
Mala selección de materiales.	16.20
Mala construcción.	38.50
Mal diseño estructural.	45.30

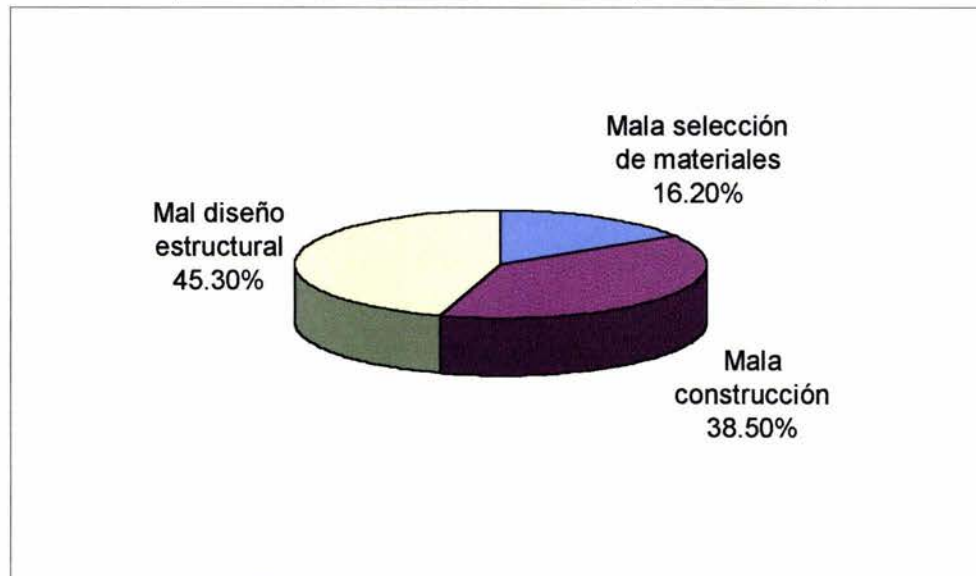


Fig. 1.5. Causas de la pérdida de la durabilidad.

La durabilidad del concreto armado depende de la calidad del concreto, del acero en caso de concreto armado y de la interrelación entre ambos, así como de la estructura porosa del concreto que es de primordial importancia para permitir o no el acceso de sustancias agresivas al interior del concreto.

En la Fig. 1.6 se pueden observar los factores que influyen en la durabilidad del concreto armado, que pueden ser físicos y químicos.⁹

⁸ J. A. VIEITEZ CHAMOSA, *Patología estructural. Aspectos químicos, normativa y estadística*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, Marzo 1984, citado por M. A. SANJUÁN BARBUDO, P. CASTRO BORGES, *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, D. F., 2001, pág. 1.

⁹ Boletín de información No. 183 del COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, *Durable concrete structures: desing guide*, Mayo 1992, pág. 1.

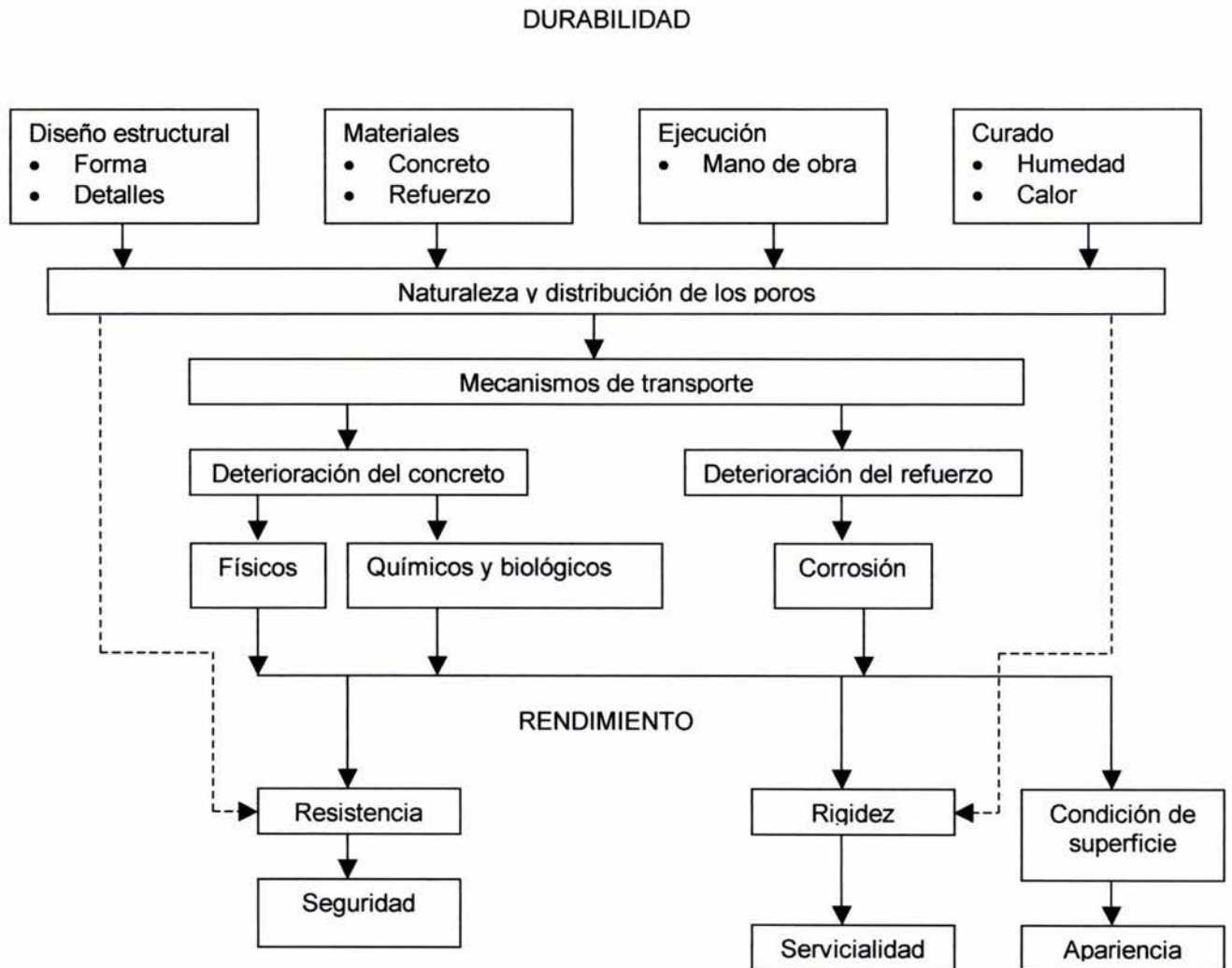


Fig. 1.6. Factores que influyen en la durabilidad del concreto armado.

1.5. Conclusión.

Cuando se haga un diseño de una estructura de concreto, es importante no solamente diseñar por resistencia sino también diseñar por durabilidad.

En el diseño por durabilidad se deben dar al constructor una serie de recomendaciones para que las lleve a cabo durante la ejecución de los trabajos.

Entre las recomendaciones más importantes que el estructurista debe de dar al constructor son: un cemento adecuado que cumpla con las especificaciones de calidad de acuerdo al ambiente al que estará expuesto, con una buena relación agua/cemento y correcta colocación, vibrado y curado. Además, es fundamental establecer un buen sistema de control de calidad que

asegure el cumplimiento de las especificaciones. Otro punto de importancia a cuidar es la correcta colocación del acero de refuerzo.

Lo anterior es fundamental para evitar un concreto poroso de baja calidad que mediante alguno de los mecanismos de absorción permita la entrada de agentes deletéreos al interior del concreto causando un deterioro y por ende gastos extras al dueño de la estructura. Siempre es más barato construir bien la primera vez.

Capítulo 2. Tipos de sulfatos.

2.1. Introducción.

En este capítulo se dan a conocer los diferentes tipos de sulfatos que existen en general, sin énfasis al ambiente marino, se indican cuales son los más agresivos, su origen y sus formas de presencia en la obra. Además de dar a conocer una clasificación de éstos de acuerdo a su severidad.

2.2. Naturaleza.

El ion sulfato puede estar presente en el suelo o en el agua subterránea o freática, en soluciones acuosas de ácido sulfúrico o en forma de sales que son identificados como anión SO_4 .

Las sales de sulfatos dañinas al concreto están presentes principalmente en suelos selenitosos con yeso y en aguas freáticas presentes en estos mismos suelos, agua de mar y aguas de desecho de la industria química. El agua de mar, aparte de contener sales de sulfatos, está compuesta de otras sales como el magnesio, cloruro, calcio, sodio, etc., cuyo trabajo químico en conjunto la hacen ser de mediana a severamente dañina.

Las aguas más dañinas son aquellas que contienen concentraciones de:

- Sulfato de calcio (yeso).
- Sulfato de sodio.
- Sulfato de magnesio.
- Aguas de desechos industriales.

En el reglamento de construcciones del ACI 318-95, la exposición a los sulfatos es clasificada en cuatro grados de severidad en suelo y en agua¹⁰:

Grados de agresividad del suelo, según sulfatos solubles (SO_4):	
Benigno.	Menos de 0.10%
Moderado.	0.10% a 0.20%
Severo.	0.20% a 2.00%
Muy severo.	Más de 2.00%
Grados de agresividad del agua, según sulfatos (SO_4):	
Benigno.	Menos de 150 ppm
Moderado.	150 a 1 500 ppm
Severo.	1500 a 10 000 ppm
Muy severo.	Más de 10 000 ppm

¹⁰ Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería UNAM, *Manual de tecnología del concreto sección 1*, editorial Limusa Noriega editores, México, D. F. 1994, pág. 45.

Los sulfatos en forma de sales altamente agresivos son:

- De amonio.
- Calcio.
- Magnesio.
- Sodio.

y los que se consideran menos agresivos son:

- De cobre.
- De aluminio de bario.

Estos son considerados así por ser insolubles al agua.

El origen de los sulfatos puede ser:

- Natural.
- Biológico.
- Industrial.

2.2.1. Sulfatos de origen natural.

Todos los suelos por lo general tienen un contenido de sulfatos bajo que, en general está entre 0.01 y 0.05% en los suelos secos, pero pueden encontrarse otros con un contenido elevado de ellos, mayor de 5%, lo cual sucede cuando el suelo contiene yeso. Los suelos arcillosos o de aluvión son susceptibles de contener pirita, que se oxida al contacto con el aire y la humedad formando ácido sulfúrico, si se combina con carbonato de calcio finamente distribuido en el suelo, formará yeso al mismo tiempo que se desprenderá ácido carbónico.

Parte de ese yeso podrá ser disuelto por el agua freática donde permanecerá una parte cristalizada en forma de yeso. Consecuentemente se formarán tres componentes dañinos llamados componentes finales de la descomposición de la pirita: ácido sulfúrico, sales de sulfato y ácido carbónico.

La oxidación de la pirita se torna diferente cuando se encuentran vestigios de carbón, el cual tendrá un efecto reductor en la oxidación. Sin embargo, si existe aire en suficiente cantidad, la oxidación se llevará a cabo independientemente de la presencia de carbón y la formación de sulfatos continuará.

Bajo la acción del ácido sulfúrico el potasio y el sodio contenido en los feldspatos es transformado en sulfato de sodio y sulfato de potasio, los cuales son altamente solubles al agua y dañinos al concreto.

2.2.2. Sulfatos de origen biológico.

Los sulfatos presentes en el suelo pueden provenir también de la descomposición biológica, de tipo aeróbica, de sustancias orgánicas que contienen proteínas y/o azufre, tales como el estiércol y abonos artificiales.

Para que el azufre orgánico se convierta en sulfato requiere de la descomposición del nitrógeno contenido en las albúminas, en los nitratos, incrementando así la acidez del suelo.

2.2.3. Sulfatos de origen industrial.

Estos sulfatos se forman por la descomposición en el medio ambiente de las sustancias que desalojan las plantas industriales y fábricas de fertilizantes, galvanizadoras, laboratorios fotográficos, etc., así como por la combustión de carbón y gasolinas en las zonas industriales y urbanas, las cuales contienen cierta cantidad de dióxido de azufre que al combinarse con el oxígeno y la humedad del medio ambiente producen ácido sulfúrico, que produce salitre y degradación de algunas fachadas por la formación superficial de yeso, y a la adherencia de polvos como cenizas, partículas de carbón, etc.

2.3. Formas de presencia en la obra.

El concreto puede sufrir dos tipos de daños debido al ataque de los sulfatos: de carácter mecánico y de carácter químico.

Estos daños se presentan en forma de deflexiones, fisuras, expansiones, desintegración del concreto y colapsos parciales o totales.

Los efectos que causan los sulfatos en la masa de concreto se pueden clasificar en tres grupos:

1. Simultáneamente con la lixiviación o lavado de una parte de los componentes del concreto ya endurecido, principalmente del Ca(OH)_2 , el valor del pH es reducido. Consecuentemente, la hidrólisis continúa y se tiene como resultado final la formación de geles no expansivos de sílice, óxido de aluminio y de óxido de hierro, que al ser solubles al agua se pierden, aumentando con esto la porosidad en el concreto permitiendo la penetración en forma más rápida de los agentes degradantes dando con ello una degradación mayor al concreto.
2. Transformación de componentes del concreto endurecido en geles no expansivos e insolubles al agua los cuales permanecerán dentro de la masa del concreto; sin embargo, por su consistencia provocarán una disminución en la resistencia del concreto.

3. Los poros y vacíos del concreto son llenados con formaciones de cristales los cuales al endurecer expanden y destruyen al concreto.

La degradación del concreto por sulfatos se debe principalmente al fenómeno de expansión en relación con la cristalización de la etringita, siendo ésta etringita secundaria.

La formación de la etringita expansiva destructiva se distingue de la expansiva no destructiva o primaria, obtenida en las primeras etapas de la hidratación del cemento Portland por reacción del yeso, puesto que la etringita primaria es expansiva pero se presenta en la etapa plástica del concreto motivo por el cual no causa daños a la masa al experimentar el aumento de volumen.

2.4.- Conclusión.

Cuando se vaya a construir una estructura de concreto en un terreno cercano al mar o que quede expuesta a la brisa marina, es recomendable contar con un equipo especializado de Químicos para hacer estudios tanto del suelo como del agua de mar para conocer el contenido de agentes deletéreos para el concreto y así proceder al diseño por durabilidad a fin de proyectar nuestra estructura para una vida útil apropiada.

Capítulo 3. Cementos Portland resistentes a sulfatos.

3.1. Introducción.

A partir de 1999 en México se implementó una nueva norma mexicana publicada por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación para clasificar los tipos de cementos hidráulicos, dar las especificaciones y sus métodos de prueba, que es la NMX-C-414-ONNCCE, que vino a sustituir a las NMX-C-001-1980, NMX-C-002-1986 y a la NMX-C-175-1969.

En este capítulo se tratan los tipos de cementos normalizados que existen en nuestro país, así como su composición química y usos de dichos cementos, atendiendo los cuidados que se deben tener al emplearlos según esta norma.

Al final de este capítulo se concluye con un resumen de los cementos que son aptos para usarse en la elaboración de concretos a emplearse en ambientes marinos, es decir, expuestos al ataque de sulfatos.

3.2. Tipos de cementos en México según NMX-C-414-ONNCCE.

En esta norma los cementos hidráulicos se clasifican de la manera siguiente:

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno

Estos tipos de cementos pueden presentar adicionalmente una ó más características especiales, las cuales se clasifican de la manera siguiente:

Nomenclatura	Características especiales
RS	Resistencia a los Sulfatos
BRA	Baja Reactividad Alkali agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

A estos tipos de cementos se les puede agregar después del símbolo de su tipo, la clase resistente que tienen, que puede ser de 20, 30 y 40, estos son para indicar su resistencia normal ó mínima a los 28 días; y puede añadirse a

los valores de 30 y 40 la letra R que indica una resistencia inicial especificada a los tres días.

3.3. Composición química.

3.3.1. Cemento Portland Ordinario (CPO).

Compuesto de clinker Portland y sulfato de calcio de un 95% a un 100% de su masa.

3.3.2. Cemento Portland Puzolánico (CPP).

Compuesto de clinker Portland y sulfato de calcio de un 50% a 94% y materiales puzolánicos como puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes en 6% a 50%.

3.3.3. Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno (CPEG).

Compuesto de clinker Portland y sulfato de calcio de un 40% a 94% y escoria granulada de alto horno de un 6% a 60%.

3.3.4. Cemento Portland Compuesto (CPC).

Compuesto de clinker Portland y sulfato de calcio de un 50% a 94%, materiales puzolánicos de un 6% a 35%, humo de sílice de un 1% a 10%, escoria de alto horno de un 6% a 35% y caliza de un 6% a 35%.

3.3.5. Cemento Portland con humo de sílice (CPS).

Compuesto de clinker Portland y sulfato de calcio de un 90% a 99% y humo de sílice de un 1% a 10%.

3.3.6. Cemento con Escoria Granulada de alto horno (CEG).

Compuesto de clinker Portland y sulfato de calcio de un 20% a 39%, escoria granulada de alto horno de un 61% a 80%.

Nota: Todos los tipos de cementos pueden tener de un 0% a 5% de componentes minoritarios que pueden ser uno ó más de los componentes principales, a menos que estén incluidos ya como tales en el cemento.

Composición química de los cementos ⁽¹⁾.

Tipo	Denominación	Componentes					Minoritarios ⁽²⁾
		Clinker	Principales				
		Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos ⁽³⁾	Humo de sílice		
CPO	Cemento Portland Ordinario	95 – 100	-	-	-	-	0 – 5
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50 – 94	-	6 – 50	-	-	0 – 5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno	40 – 94	6 - 60	-	-	-	0 – 5
CPC	Cemento Portland Compuesto ⁽⁴⁾	50 – 94	6 – 35	6 – 35	1 – 10	6 – 35	0 – 5
CPS	Cemento Portland con humo de sílice	90 – 99	-	-	1 – 10	-	0 – 5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno	20 – 39	61 – 80	-	-	-	0 – 5

Notas:

- (1) Los valores de la tabla representan el porcentaje en masa.
- (2) Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales, a menos que estén incluidos ya como tales en el cemento.
- (3) Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes.
- (4) El cemento Portland compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede ser en forma individual en conjunto con clinker + yeso.

3.4. Usos.

El objetivo de ésta norma en cuanto al uso de los cementos es informar y ayudar a los usuarios a utilizar los cementos de empleo general, y a distinguir cuando se debe de usar otros cementos especiales, en función de sus efectos en las propiedades, comportamiento y prestaciones del cemento.

3.4.1. Cemento Portland Ordinario (CPO).

El Cemento Portland Ordinario tiene, en principio, los mismos empleos que los de otros tipos, con las salvedades y matizaciones de cada caso. Por ejemplo, en condiciones comparables de resistencia mecánica el Cemento Portland Ordinario, en general, desprende un mayor calor de hidratación y es más sensible a los ataques químicos por medios ácidos y salinos (en particular por sulfatos). No obstante, este cemento puede ostentar, en determinados casos, las características especiales de bajo calor de hidratación y de resistencia a los sulfatos.

Como factor positivo se puede señalar que puede conferir una mayor protección a las armaduras contra la corrosión metálica, por la cual el Cemento Portland Ordinario es utilizable con ventaja en el caso de concreto pretensado que implique una gran responsabilidad, y siempre que se tenga en cuenta la posibilidad de fisuración por retracción (sobre todo térmica), en particular por lo que pueda afectar a la propia corrosión de armaduras.

El Cemento Portland Ordinario es especialmente apto para la prefabricación, particularmente sin tratamientos higrotérmicos, y concretos de altas resistencias, en obras públicas especiales y de gran responsabilidad como puentes de concreto pretensado, otras estructuras pretensadas, etc. En el caso de concretos con cenizas volantes, sobre todo en proporciones altas, son aconsejables, prácticamente en exclusiva, el Cemento Portland Ordinario.

A continuación se muestra un resumen de las obras en las cuales el Cemento Portland Ordinario es utilizable, en cuales no es recomendable, salvo precauciones especiales y las precauciones que hay que tomar; éstas son en cada una de sus clases resistentes.

3.4.1.1. Cemento Portland Ordinario de clase resistente 20 (CPO 20).

Utilizable para:

- Obras de concreto en masa, de pequeño a mediano volumen.
- Obras de concreto armado.
- Algunas obras o elementos de concreto pretensado.
- Prefabricación con tratamientos higrotérmicos.
- Pavimentación y firmes en carreteras.
- Estabilización de suelos.

No recomendable, salvo algunas precauciones especiales para:

- Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos.
- Obras de concreto en masa, de gran volumen, especialmente con dosificaciones altas.

Precauciones:

- Cuidar el almacenamiento, tratando de que no se prolongue más de tres meses.

3.4.1.2. Cemento Portland Ordinario de clase resistente 30 y 30R, (CPO 30 y CPO 30R).

Utilizable para:

- Obras de concreto armado en las que se requiera un endurecimiento más rápido de lo normal.
- Obras o elementos de concreto pretensado.
- Prefabricación, incluso con tratamientos higrotérmicos.

No recomendable, salvo algunas precauciones especiales para:

- Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos.
- Obras y piezas de concreto armado, de mediano o de gran volumen o espesor, y estructuras fácilmente fisurables por retracción, tanto plástica como térmica e hidráulica.

Precauciones:

- Cuidar el almacenamiento, tratando de que no se prolongue más de dos meses.
- Cuidar la dosificación (en peso), el amasado y, especialmente, el curado.
- Tomar las medidas necesarias para evitar fisuraciones por retracción, particularmente durante las primeras horas (retracción plástica), y en caso de piezas y elementos voluminosos, o de pequeño espesor.

3.4.1.3. Cemento Portland Ordinario de clase resistente 40 y 40R, (CPO 40 y CPO 40R).

Utilizable para:

- Obras especiales de concreto armado de endurecimiento muy rápido y de muy altas resistencias a toda edad.
- Obras o elementos de concreto pretensado en los que se da la misma circunstancia.
- Fabricación de concreto en tiempo ó clima muy frío.
- Descimbrado, desencofrado y desmoldado muy rápidos.

No recomendable, salvo precauciones especiales, para:

- Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos.
- Obras de concreto armado de mediano volumen o espesor, y estructuras fisurables por retracción, tanto térmica como hidráulica.

Precauciones:

- Cuidar el almacenamiento, tratando de que no se prolongue más de un mes.
- Cuidar la dosificación (en peso), el amasado y, muy especialmente, el curado.

- Tomar medidas para evitar fisuraciones por retracción, particularmente durante las primeras horas (retracción plástica), y en el caso de piezas y elementos voluminosos y/o con dosificaciones incluso bajas.

3.4.2. Cemento Portland Puzolánico (CPP).

El Cemento Portland Puzolánico es idóneo para prefabricación mediante tratamientos higrotérmicos del concreto, bien con vapor libre o, mejor todavía, con vapor a presión en autoclave. Así mismo, el Cemento Portland Puzolánico va particularmente bien en el caso forzado de tener que emplear en el concreto, agregados reactivos con los álcalis del Cemento Portland Ordinario, en primer lugar porque la adición de puzolana reduce la proporción de clinker Portland y con ella la de los álcalis que éste aporta y en segundo lugar porque la propia puzolana fija álcalis y evita o atenúa la acción sobre los agregados reactivos. A parte de otros aspectos específicos, de naturaleza y consideración físicas.

También, el Cemento Portland Puzolánico es de bajo calor de hidratación, pudiendo dar la totalidad, o mucho de ellos, sobre todo a cortas edades, calores de hidratación inferiores incluso a los de la generalidad del Cemento Portland Ordinario del tipo CPO-BCH.

Por todas estas circunstancias, los cementos puzolánicos son idóneos para obras de concreto en contacto con aguas agresivas de cualquier naturaleza, pero en particular puras, carbónicas y ligeramente ácidas. Son así mismo, aptos para concreto en grandes masas en que interese evitar una gran elevación de temperatura, y con concreto de presas y cimentaciones masivas. No son en cambio, los más adecuados para concreto pretensado, particularmente con escasos recubrimientos.

A continuación se muestra un resumen de las obras en las cuales el Cemento Portland Puzolánico es utilizable, en cuales no es recomendable, salvo precauciones especiales y las precauciones que hay que tomar; éstas son en cada una de sus clases resistentes.

3.4.2.1. Cemento Portland Puzolánico de clase resistente 20, (CPP 20).

Utilizable para:

- Obras de concreto en masa y armado.
- Pavimentos y cimentaciones.
- Morteros en general.
- Prefabricación con tratamientos higrotérmicos.
- Concretos más susceptibles a ataques por aguas puras, carbónicas agresivas ó con débil acidez.
- Obras de concreto en masa en grandes volúmenes (presas, cimentaciones masivas, muros de contención, etc.).

- Obras en las que se requiera impermeabilidad, a condición de que la dosificación sea la adecuada.
- Obras de concreto en masa, con áridos sospechosos de reactividad frente a álcalis.
- Obras marítimas masivas que no requieran resistencias mecánicas elevadas.
- Tratamientos hidrotérmicos e higrotérmicos del concreto.

No recomendables, salvo precauciones especiales, para:

- Concreto pretensado con alambres adherentes.
- Fabricación de concreto en tiempo de heladas.

Precauciones:

- Las normales en la dosificación y en el almacenamiento, tratando de que no se prolongue más de tres meses.
- Curar adecuada y prolongadamente, en especial en climas secos y fríos, evitando desecaciones durante el primer período de endurecimiento, en climas cálidos y secos.

3.4.2.2. Cemento Portland Puzolánico de clase resistente 30, 30R, 40 y 40R, (CPP 30, CPP 30R, CPP 40 y CPP 40R).

Utilizable para:

- Los mismos fines que en el tipo CPP, clase resistente 20.
- Obras de concreto en masa o armado que toleren un moderado calor de hidratación.
- Obras de concreto en masa o armado en ambientes ligeramente agresivos por aguas puras, carbónicas o con débil acidez mineral.
- Obras de concreto en masa o armado con agregados sospechosos de reactividad frente a álcalis.
- Obras de gran impermeabilidad, con dosificaciones adecuadas.
- Prefabricación con tratamiento hidrotérmico e higrotérmico.
- Obras de concreto pretensado.

No recomendable, salvo precauciones especiales, para:

- Los mismos fines que el tipo CPP, clase resistente 20, excepto concreto pretensado.
- Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos.

Precauciones:

- Los mismos fines que el tipo CPP, clase resistente 20, reduciendo el período de almacenamiento a no más de dos meses.

3.4.3. Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno (CPEG).

El Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno es tanto menos vulnerable a la agresión química, en general, cuanto mayor es su contenido de escoria (o cuanto menor es su relación clinker/escoria), y en particular los menos atacables frente a las agresiones de tipo salino por agua de mar o por sulfatos.

En otro aspecto, el cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno es de bajo calor de hidratación, tanto menor cuanto mayor sea su contenido de escoria.

El Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno, por razón de la escoria, pueden contener sulfuros en determinada proporción, lo cual puede dar lugar a acciones corrosivas sobre las armaduras, especialmente serias en el caso de concreto pretensado.

Por todo lo que antecede, el Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno es idóneo para concreto en masa o armados (con suficiente recubrimiento de armaduras), que hayan de estar en ambientes agresivos (salinos en general, sulfatados en particular o yesíferos), obras en zonas costeras o sumergidas en el mar, o en aguas, suelos y terrenos salinos, sulfatados o selenitosos. Y mayormente si además de la resistencia química se requiere, por la naturaleza y/o ubicación y/o finalidad de la obra, un bajo calor de hidratación que evite o disminuya la retracción térmica y la consiguiente fisuración.

A continuación se muestra un resumen de las obras en las cuales el Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno es utilizable, en cuales no es recomendable, salvo precauciones especiales y las precauciones que hay que tomar; éstas son en cada una de sus clases resistentes.

3.4.3.1. Cemento Portland con escoria Granulada de alto horno de clase resistente 20, (CPEG 20).

Utilizable para:

- Obras de concreto en masa, incluso de gran volumen, que requieran de un bajo calor de hidratación.
- Pavimentaciones y cimentaciones.
- Obras subterráneas.
- Estabilización de suelos, suelo-cemento y grava-cemento.

- Morteros de recubrimiento, agarre y juntas, salvo problemas de coloración.
- Obras de concreto en masa en ambientes débilmente agresivos por salinidad en general (zonas litorales) o por sulfatos.
- Obras marítimas masivas de mediana resistencia.
- Concreto armado.
- Prefabricación con tratamientos hidrotérmicos e higrotérmicos.

No recomendable, salvo precauciones especiales, para:

- Concreto pretensado con alambres adherentes.
- Fabricación de concreto a bajas temperaturas o en tiempo de heladas.
- Obras en que importe el aspecto exterior del concreto (manchas).

Precauciones:

- Las normales en la dosificación y en el almacenamiento, tratando de que éste no se prolongue más de tres meses.
- Curar adecuadamente y prolongadamente, en especial en climas fríos o a temperaturas bajas, evitando al máximo la desecación prematura y empleando productos de curado, si es preciso.

3.4.3.2. Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno de clase resistente 30, 30R, 40 y 40R, (CPEG 30, CPEG 30R, CPEG 40 y CPEG 40R).

Utilizable para:

- Los mismos fines que el tipo CPEG, clase resistente 20, en empleos que exijan resistencias aún más altas.
- Prefabricación con tratamientos higrotérmicos.

No recomendable, salvo precauciones especiales, para:

- Los mismos fines que el tipo CPEG, clase resistente 20.

Precauciones:

- Las mismas prácticamente que para el tipo CPEG, clase resistente 20, reduciendo el período de almacenamiento a no más de dos meses.
- Curado y desecación.

3.4.4. Cemento Portland Compuesto (CPC).

En principio, los Cementos Portland Compuesto en general, perteneciente a una misma clase resistente, son equivalentes desde el punto de vista de utilización práctica, a efectos estructurales. Entre el empleo de unos u

otros cementos pueden existir algunas ligeras diferencias, en función de las consistencias o de las relaciones agua/cemento de los concretos.

A efectos de durabilidad, resistencia química (excepto corrosión de armaduras), calor de hidratación, retracción y fisuración, o tratamientos higrotérmicos, y a igualdad de todo lo demás, en principio serán preferibles los Cementos Portland Compuesto a los Cementos Portland Ordinario, a no ser que estos tengan alguna de las características especiales incluidas en las mismas, tales como bajo calor de hidratación y/o resistente a los sulfatos.

A continuación se muestra un resumen de las obras en las cuales el Cemento Portland Compuesto es utilizable, en cuales no es recomendable, salvo precauciones especiales y las precauciones que hay que tomar; éstas son en cada una de sus clases resistentes.

3.4.4.1. Cemento Portland Compuesto de clase resistente 20, (CPC 20).

Utilizable para:

- Prácticamente todos los fines de los tipos CPEG y CPP, de las clases resistentes correspondientes, habida cuenta de que sus propiedades u comportamientos se pueden considerar como suma ponderada, según sea la composición, de las propiedades y comportamientos de dichos tipos de cemento y clases resistentes.

No recomendables, salvo precauciones especiales, para:

- Prácticamente los mismos casos limitativos de los tipos CPEG y CPP, de las correspondientes clases resistentes, por los mismos motivos.

Precauciones:

- Prácticamente las mismas que para el resto de los tipos CPEG y CPP, de las clases resistentes correspondientes por razones análogas.

3.4.4.2. Cemento Portland Compuesto de clase resistente 30, 30R, 40 y 40R, (CPC 30, CPC 30R, CPC 40 y CPC 40R).

Utilizable:

- Prácticamente todos los fines de los tipos CPEG y CPP, ya que sus propiedades y comportamientos se pueden considerar como suma ponderada según las propiedades y comportamientos de dichos tipos de cemento y clases resistentes.

No recomendables, salvo precauciones especiales, para:

- Prácticamente los mismos casos limitativos de los tipos CPEG y CPP, de las correspondientes clases resistentes, por los mismos motivos.

Precauciones:

- Prácticamente las mismas que para los tipos CPEG y CPP, de las clases resistentes correspondientes por razones análogas.

3.4.5. Cemento Portland con humo de Sílice (CPS).

La utilización del Cemento Portland con humo de Sílice requiere a veces el uso de enérgicos superfluidificantes reductores de agua en el concreto, a fin de mantener aceptablemente bajas las exigencias de agua del mismo y su retracción hidráulica de secado, esto se debe a que el humo de sílice es un producto que consta de partículas muy finas de sílice amorfa, con una superficie específica 50 veces mayor que la de un Cemento Portland Ordinario.

A continuación se muestra un resumen de las obras en las cuales el Cemento Portland con humo de Sílice es utilizable, en cuales no es recomendable, salvo precauciones especiales y las precauciones que hay que tomar; éstas son en cada una de sus clases resistentes.

3.4.5.1. Cemento Portland con humo de Sílice de clase resistente 20, (CPS 20).

Utilizable:

- Obras de concreto en masa y armado.
- Pavimentaciones y cimentaciones.
- Morteros en general.
- Prefabricación con tratamientos higrotérmicos.
- Obras en las que se requiera impermeabilidad, a condición de que la dosificación sea la adecuada.

No recomendables, salvo precauciones especiales, para:

- Concreto pretensado con alambres adherentes.
- Fabricación de concreto en tiempo de heladas.

Precauciones:

- Las normales en la dosificación y en el almacenamiento, tratando de que no se prolongue más de tres meses.

- Curar adecuadamente y prolongadamente, en especial en climas secos y fríos, evitando desecaciones durante el primer período de endurecimiento, en climas cálidos y secos.

3.4.5.2. Cemento Portland con humo de Sílice de clase resistente 30, 30R, 40 y 40R, (CPS 30, CPS 30R, CPS 40 y CPS 40R).

Utilizable:

- Los mismos fines que en el tipo CPS, clase resistente 20.
- Obras de gran impermeabilidad, con dosificaciones adecuadas.
- Prefabricación con tratamiento hidrotérmico e higrotérmico.

No recomendables, salvo precauciones especiales, para:

- Los mismos fines que el tipo CPS, clase resistente 20, excepto concreto pretensado.
- Obras en ambientes, aguas y terrenos agresivos.

Precauciones:

- Los mismos fines que el tipo CPS, clase resistente 20, reduciendo el período de almacenamiento a no más de dos meses.

3.4.6. Cemento con Escoria Granulada de alto horno (CEG).

El Cemento con Escoria Granulada de alto horno es utilizable en aquellos casos en que, no exigiéndose unas resistencias mínimas altas ni una grande o mediana velocidad de endurecimiento, le pueden afectar al concreto problemas de fuerte agresividad salina por parte de yesos, sulfatos en general o agua de mar. También se podrán utilizar cuando, siendo compatibles con el resto de las circunstancias del caso, éste exija la condición de un calor de hidratación muy bajo.

El Cemento con Escoria Granulada de alto horno no es, en cambio, recomendable para concreto pretensado, ni para armado con armaduras de diámetro pequeño y escaso recubrimiento.

A continuación se muestra un resumen de las obras en las cuales el Cemento con Escoria Granulada es utilizable, en cuales no es recomendable, salvo precauciones especiales y las precauciones que hay que tomar; éstas son en cada una de sus clases resistentes.

3.4.6.1. Cemento con Escoria Granulada de alto horno de clase resistente 20, (CEG 20).

Utilizable para:

- Obras de concreto en masa, incluso de gran volumen que requieren un calor de hidratación bajo.
- Obras de concreto en masa en ambientes húmedos o agresivos por salinidad en general (zonas litorales) o por sulfatos de aguas y terrenos.
- Pavimentaciones, cimentaciones y obras subterráneas.
- Estabilización de suelos, suelo-cemento y grava-cemento.
- Obras marítimas.

No recomendable, salvo precauciones especiales, para:

- Concreto armado y pretensado.
- Concreto a bajas temperaturas.
- Obras de gran superficie y poco espesor, en las que importe el aspecto externo del concreto (manchas).
- Concreto en ambientes muy secos.

Precauciones:

- Las mismas que las del tipo CPEG, clase resistente 20, sobre todo en lo referente al curado y a la desecación.
- Extremar las relativas a las dosificaciones mínimas y a la compacidad.
- Evitar su empleo, salvo precauciones extremas de curado, en ambientes muy secos.
- Fabricación de concreto en tiempo frío y desecación, en el caso de concreto armado.

3.4.6.2. Cemento con Escoria Granulada de alto horno de clase resistente 30 y 30R, (CEG 30 y CEG 30R).

Utilizable:

- Los mismos fines que el tipo CEG, clase resistente 20, siempre que se requieran resistencias mecánicas aún mayores.

No recomendables, salvo precauciones especiales, para:

- Los mismos fines que el tipo CEG, clase resistente 20.

Precauciones:

- Las mismas que para el tipo CEG, clase resistente 20.

3.4.7. Cementos con características especiales.

A continuación se muestra un resumen de las obras en las cuales los cementos de características especiales como el Cemento Resistente a sulfatos, Cemento con Baja Reactividad Alcali Agregado, Cemento con Bajo Calor de Hidratación y el Cemento Blanco son utilizables, en cuales no son recomendables, salvo precauciones especiales y las precauciones que hay que tomar.

3.4.7.1. Cemento resistente a sulfatos.

Utilizable:

- Concreto en contacto con aguas y terrenos yesíferos o que contienen otros sulfatos, y concretos en contacto con aguas marinas o en ambientes marítimos.
- Concretos sometidos a la acción de los sulfatos (cálcico y/o magnésico) de aguas o terrenos.
- Concretos sometidos a la acción del agua de mar (sulfatos y cloruros alcalinos y alcalinotérreos).

No recomendables, salvo algunas precauciones especiales, para:

- No existen contraindicaciones para estos cementos, distintas de las que corresponden a los de su mismo tipo y clase resistente, en cada caso, siempre que se tengan en cuenta las precauciones respectivas.

Precauciones:

- Emplear siempre los materiales y las dosificaciones adecuadas en cada caso. Cuidar todas las etapas de la tecnología del concreto, y muy especialmente el curado, y, en su caso, la protección adicional o complementaria del material.
- Tener en cuenta que, a efectos de durabilidad, hace más un buen diseño del concreto (dosificación del cemento, relación agua/cemento, naturaleza y granulometría de los agregados, etc.) y una correcta ejecución del mismo (mezclado, transporte, vertido, puesta en obra, compactación, curado, protección, etc.) que garanticen una suficiente densidad, compacidad, impermeabilidad a los fluidos e impermeabilidad a los iones agresivos, que la selección de unos u otros cementos más o menos adecuados.
- En otras palabras, con un cemento que no sea el más idóneo para un determinado medio agresivo, un concreto muy compacto e impermeable

resistente más y mejor que otro compacto y más vulnerable, aunque éste se haya hecho con el cemento adecuado.

3.4.7.2. Cemento con Baja Reactividad Álcali Agregado.

Utilizable para:

- Obras de concreto en masa, con agregados sospechosos de reactividad frente a álcalis.

No recomendables, salvo precauciones especiales, para:

- No existen contraindicaciones para estos cementos, distintas de las que corresponden a los de su mismo tipo y clase resistente, en cada caso, siempre que se tengan en cuenta las precauciones respectivas.

Precauciones:

- Emplear siempre los materiales y las dosificaciones adecuadas en cada caso.
- Cuidar todas las etapas de la tecnología del concreto, y, en su caso, la protección adicional o complementaria del material.

3.4.7.3 Cemento con Bajo Calor de Hidratación.

Utilizable para:

- Obras en las que intervienen grandes masas de concreto susceptibles de experimentar fuertes retracciones por variaciones térmicas con peligro de fisuración y agrietamiento, tales como grandes macizos de presas, cimentaciones, grandes losas.

No recomendable, salvo precauciones especiales, para:

- Concreto en tiempo frío y prefabricación.

Precauciones:

- Cuidar mucho el curado, evitando al máximo evaporaciones y desecaciones.
- Proteger el concreto cuando sea necesario.

3.4.7.4. Cemento Blanco.

Utilizable para:

- Los mismos usos que los Cementos Portland ordinarios de las respectivas clases resistentes, en los casos que se requiera el color blanco o más claro de los morteros o concreto.
- Concretos estructurales blancos de cada vista.
- Concretos coloreados (cemento blanco como base).
- Prefabricación de piezas o elementos de mortero y concreto, de color blanco o claro.

No recomendables, salvo precauciones especiales, para:

- Obras en ambientes agresivos, especialmente en contacto con aguas o terrenos yesíferos o que contengan sulfato magnésico.

Precauciones:

- Cuidar el almacenamiento, evitando que se prolongue demasiado, no debiendo pasar de dos meses (30 y 30R) o de un mes (40 y 40R). Cuidar la dosificación (en peso), el mezclado y, sobre todo, el curado.
- Tomar medidas para evitar fisuraciones por retracción, particularmente durante las primeras horas y en el caso de piezas o elementos voluminosos. En el caso de utilizar agregados pigmentados para obtener morteros y concretos coloreados, asegurarse de su idoneidad y compatibilidad con el cemento, a efectos de fraguado, resistencia mecánica, estabilidad de volumen y durabilidad.

3.5. Conclusión.

Como conclusión de esta norma, los cementos recomendables para usarse en ambientes marinos, expuestos al ataque de sulfatos se agrupan en la siguiente tabla:

Tipo	Denominación
CPO – RS	Cemento Portland Ordinario con característica especial de resistencia a los sulfatos en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa. Este tipo de cemento se puede encontrar comercialmente.
CPC	Cemento Portland Compuesto en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa en climas calurosos. Este tipo de cemento se puede encontrar comercialmente.
CPP	Cemento Portland Puzolánico en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa en climas calurosos. Este tipo de cemento se puede encontrar comercialmente.
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa en climas calurosos. Este tipo de cemento no se encuentra comercialmente, requiere fabricación especial.
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa en climas calurosos. Este tipo de cemento no se encuentra comercialmente, requiere fabricación especial.

Capítulo 4. Estudio de las causas del deterioro actual.

4.1. Introducción.

En el concreto sometido a ambientes marinos, por lo general el fenómeno de deterioro que sufre es debido al ataque de los sulfatos que se encuentran en el agua de mar, en el suelo o en el medio ambiente, causando síntomas como los que se aprecian en algunas imágenes contenidas en este capítulo. Estos deterioros se deben a las reacciones que se desencadenan entre los sulfatos y los componentes del concreto.

Este capítulo se refiere al desarrollo del mecanismo de deterioro del concreto que es atacado por sulfatos. Se describe como los agentes deletéreos penetran en el concreto, las reacciones químicas que generan y sus efectos, que al final producen la degradación de éste.

4.2. Síntomas de deterioro.

Un concreto que sufre ataque por sulfato presenta los siguientes síntomas:

1. Expansión del concreto.
2. Formación de grietas.
3. Erosión.
4. Pérdida de la resistencia y la masa.

El ataque por sulfatos es caracterizado por la reacción química del ion sulfato con los aluminatos y el hidróxido de calcio componentes del concreto de cemento Portland endurecido, formando principalmente etringita secundaria y en una menor cantidad yeso.

Estas reacciones químicas se llevan a cabo cuando hay suficiente agua presente, llevando a la formación de grietas con un diseño irregular (ver Fig. 4.1). Dichas grietas favorecen la penetración del ion sulfato existente en el agua, ocasionando que el proceso continúe y llevando a la completa desintegración.

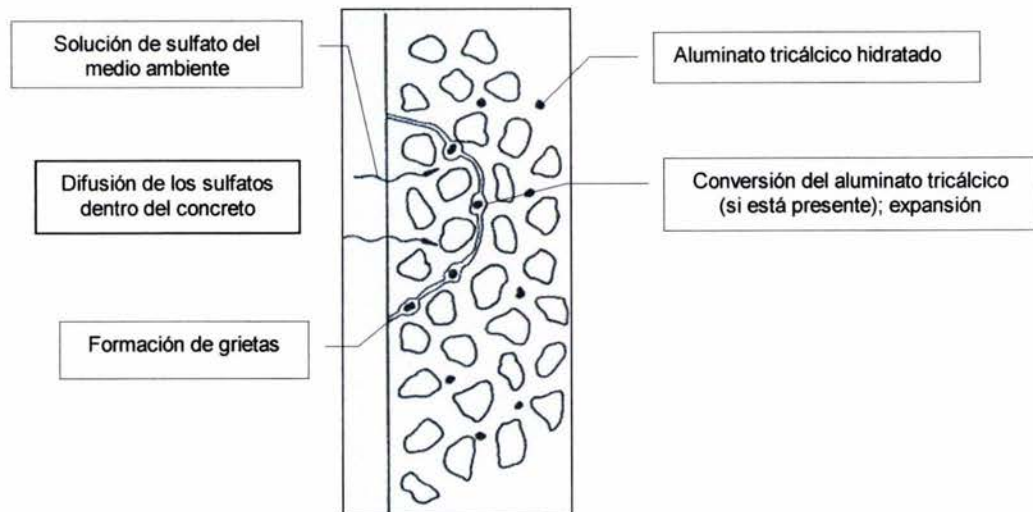
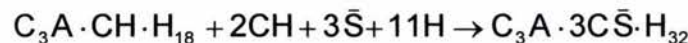
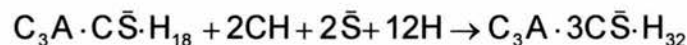


Fig. 4.1. Efecto del ataque por sulfatos.

Los principales parámetros que tienen influencia en la expansión son:

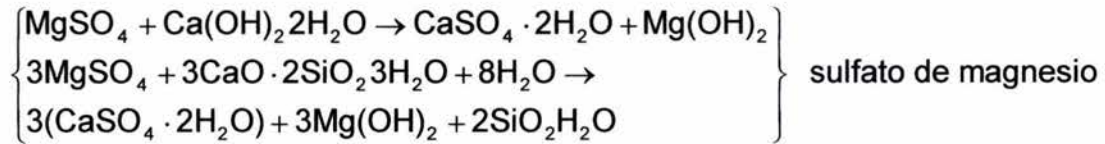
- Condiciones de exposición.
- Permeabilidad del concreto.
- Tipo de cemento.
- Cantidad de agua existente.

La formación de etringita secundaria o expansiva se lleva a cabo en cementos Portland con un contenido de más de 5% de aluminato tricálcico, en los cuales la mayor parte de la alúmina estará en forma de hidratos de monosulfato ($C_3A \cdot CS \cdot H_{18}$), durante el proceso de hidratación. También ocurre en los cementos con contenido de aluminato tricálcico mayor a 8%, en los que los productos de la hidratación también contendrán hidratos de monosulfato ($C_3A \cdot CS \cdot H_{18}$), que al entrar en contacto con los iones de sulfato ambos hidratos que contienen alúmina son convertidos a la forma de alto sulfato mejor conocido como etringita, mediante la siguiente reacción química:



En cuanto a la formación del yeso, esta se lleva a cabo por la reacción química del intercambio de cationes presentes en la solución de sulfato ya sea Na^+ ó Mg^{2+} , provocando que tanto el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio (H-S-C) sean convertidos en yeso mediante la siguiente reacción química:





En el caso de ataque por sulfato de sodio se produce el hidróxido de sodio que asegura la continuación de alta alcalinidad en el sistema, lo que es esencial para la estabilidad de la fase cementante principal que es el hidrato de silicato de calcio (H-S-C). En el caso de ataque por sulfato de magnesio, la conversión del hidróxido de calcio a yeso es acompañada por la formación de hidróxido de magnesio alcalino relativamente insoluble y pobre, por lo cual la estabilidad del hidrato de silicato de calcio (H-S-C) en el sistema se reduce y también es atacada por la solución de sulfato.

Ahora bien, para el caso de un concreto sometido a ambiente marino se pueden deteriorar como resultado de los efectos combinados de la acción química de los constituyentes del agua de mar en los productos de hidratación del cemento, de la expansión álcali-agregado (cuando se encuentran presentes agregados reactivos), de la presión de cristalización de sales dentro del concreto si una cara de la estructura está sometida a condiciones de humedecimiento y las otras a condiciones de secado, de la acción de congelamiento en climas fríos, de la corrosión del acero embebido en elementos reforzados o presforzados y a la acción física debida a la acción de las olas o de los objetos flotantes.

De aquí podemos decir que el concreto sometido a ambiente marino atacado por cualquiera de los agentes destructivos anteriores lo hará cada vez más permeable y por lo mismo más susceptible no solo al ataque de dicho agente sino que también otro tipo de ataque.

Pero ahora bien, el agua de mar aún con todos los agentes deletéreos que tiene podría considerarse no tan agresiva como parece en cuanto a las posibles reacciones de los sulfatos. El Reglamento de Construcciones ACI 318-95 clasifica a la exposición de sulfatos como moderada, pero en bahías, esteros o en agua de mar estancada puede llegar a tener una cantidad tal de sulfatos y por su disminución del PH que se podría considerar como severa.

El agua de mar por su alto contenido de cloruros que es un medio por el cual la etringita y el yeso productos de las reacciones de los sulfatos se disuelven y se evitan así las presiones que estos causan en los poros del concreto produciendo expansiones o desintegración de este, y extrayéndose por lixiviación causando un aumento en la porosidad del concreto, esto ocurre en concreto sumergido en el agua de mar.

Ahora bien, en la zona de marejada el concreto está sometido a la acción de los ataques químicos y físicos al someterse al humedecimiento y secado

provocando un efecto de desintegración producido por el aumento de volumen que experimentan las sales absorbidas al secarse; al cual se suman las acciones deteriorantes del oleaje (ver Fig. 4.2).

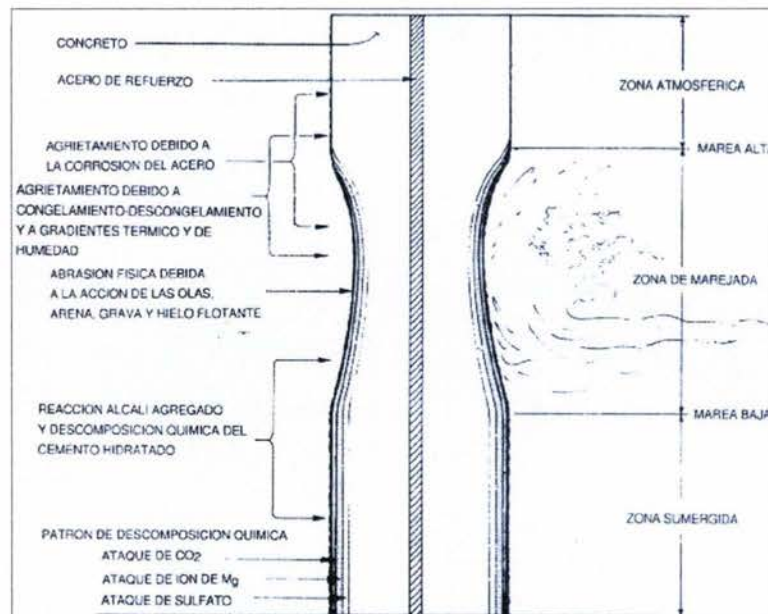


Fig. 4.2. Representación gráfica del deterioro del concreto sometido al agua de mar.¹¹

A continuación se presentan algunos casos de deterioro por el efecto del agua de mar en el Puerto de Mazatlán, Sinaloa:

¹¹ P. KUMAR MEHTA, *Performance of concrete in marine environment*, ACI SP-65, 1980, págs. 1 – 20 citado por P. KUMAR MEHTA, P. J. M. MONTEIRO, *Concreto: estructura, propiedades y materiales*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, D. F., 1998, pág. 126.



Fig. 4.3. Imagen del daño sufrido por el ataque de sulfatos de un dado de cimentación de un restaurante localizado en la playa norte.



Fig. 4.4. Fotografía del daño sufrido por el ataque de los sulfatos en una ménsula de un restaurante localizado en la playa norte.



Fig. 4.5. Fotografía de una viga en voladizo dañada por el ataque de sulfatos en un restaurante sobre la playa norte.



Fig. 4.6. Fotografía una parte del malecón dañada por el ataque de los sulfatos.



Fig. 4.7. Fotografía una parte de la estructura de la escuela de Ciencias del Mar de la Universidad Autónoma de Sinaloa dañada por los sulfatos.



Fig. 4.8. Fotografía una parte del malecón dañada por el efecto de los sulfatos.



Fig. 4.9. Fotografía la estructura de un edificio de la Escuela de Ciencias del Mar dañada por la acción de los sulfatos.

4.3. Conclusión.

En el concreto sometido a ambientes marinos, si no se toman las medidas adecuadas desde su fabricación hasta su colocación, sufre los daños mencionados anteriormente; ocasionando un gasto tanto para el dueño como para el constructor, además de causar un serio problema de seguridad y de menor escala de estética para la ciudadanía en general.

Por lo cual se concluye que es de suma importancia que el ingeniero estructurista y constructor, esté bien informado sobre la estructura y propiedades del concreto, así como de los daños que este sufre al estar sometido a diversos agentes deletéreos y saber que hacer para prevenirlos y crear así en el medio constructor una cultura de calidad y ética profesional que en la actualidad no existe en México.

Capítulo 5. Estudio de concreto fabricado con diferentes cementos y sometidos a diferentes condiciones.

5.1. Introducción.

En este capítulo se persigue el objetivo de comprender el comportamiento del concreto sometido al ataque de sulfatos del agua de mar, para alcanzar este objetivo este capítulo se divide en cinco puntos de los cuales este es el primero en el cual se establece lo que se pretende hacer, el segundo punto es exponer los tipos de cemento que se utilizaron y el porqué se utilizaron, el tercer punto es en el que se explica las condiciones a las que fueron expuestos los cilindros de concreto y el porqué se hizo, en el cuarto se presentan los resultados tanto de resistencia como la variación en las dimensiones que éstos sufrieron durante el período en el que estuvieron sometidos a la agresión, y el último punto es en donde se presenta la conclusión de las observaciones.

5.2. Concreto fabricado con diferentes tipos de cementos.

Para alcanzar el objetivo establecido en este capítulo se elaboraron 95 cilindros de concreto simple con una resistencia para uso estructural de 250 kg/cm². Esta resistencia fue elegida debido a que es la mínima recomendable para ambientes marinos si diseñamos de acuerdo a la relación agua/cemento de 0.45, que por recomendación de la norma NMX-C-403-ONNCCE-1999 y por las razones de la impermeabilidad que una relación agua/cemento reducida le proporciona al concreto, es la máxima recomendable.

La mezcla se realizó utilizando agregado existente en la región de Mazatlán, Sinaloa, que son grava y arena de río proporcionada por la planta de concreto de Cemex de Mazatlán, Sinaloa; y el agua utilizada fue agua potable de la misma localidad.

Los tipos de cementos aptos para la elaboración de concretos que son resistentes a la agresión de los sulfatos según la norma NMX-C-414-ONNCCE son los CPO con característica especial de resistencia a los sulfatos, el CPC, el CPP, el CPEG y el CEG, pero por los recursos limitados para este trabajo y por la carencia de algunos de estos tipos de cementos en esta región se emplearon los tipos CPO-RS, CPC 30R, CPO 40R y este mismo CPO 40R pero se le aumentó un 20% más de cemento para disminuir su relación agua/cemento y así hacerlo más impermeable.

Los cilindros fueron expuestos a tres tipos de condiciones como se verán en el siguiente punto y las cantidades que se sometieron a las diferentes condiciones fueron ocho de cada tipo a cada condición.

El desarrollo del proporcionamiento por el método del ACI de la mezcla de concreto se presenta a continuación:

Dosificación para un concreto $f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ con un revenimiento de 10 cm, con un tamaño máximo de agregado de 19.05 mm (3/4").

Datos:

Tipo de cemento:	CPO-RS, CPC, CPO 40 R Y CPO 40 + 20% más de cemento
Revenimiento (cm):	10.00
Densidad del cemento (kg/m^3):	3,075.00
T. M. A. (mm):	19.00
M. F.:	2.90
P. V. A. (kg/m^3):	1,650.00
P. V. G. (kg/m^3):	1,575.00
D_A (kg/m^3):	2,550.00
D_G (kg/m^3):	2,550.00
Humedad de la arena (%):	4.50%
Absorción de la arena (%):	2.15%
Humedad de la grava (%):	5.00%
Absorción de la grava (%):	1.20%

1.- Relación agua/cemento.

Tipo de exposición: **de severa a muy severa.**

Relación agua/cemento: **0.45**

2.- Cantidad de agua y cemento.

De la tabla 7-6:

Agua (kg): **202.00**

Cemento (kg): **448.89**

3.- Cantidad de grava.

De la tabla 7-5:

Proporción de grava: **0.61**

Grava (kg): **960.75**

4.- Cantidad de arena.

Se convierten las cantidades en peso (kg) a cantidades de volumen (m³).

Agua (m³): **0.2020**
 Cemento (m³): **0.1460**
 Grava (m³): **0.3768**
 Sumatoria: **0.7248**

Arena (m³): **0.2752**

Arena (kg): **701.76**

5.- Cantidad real de agua.

Grava (kg): **36.51**
 Arena (kg): **16.49**
 Agua (kg): **149.00**

Dosificación para 1 m³.

Material	Peso (kg)	Volumen (m ³)
Agua:	149.0001	0.1490
Cemento:	448.8889	0.1460
Grava:	960.7500	0.3768
Arena:	701.7600	0.2752

Dosificación para 8 cilindros de concreto f'c = 250 kg/cm² con un revenimiento de 10 cm con un 20% de desperdicio.

Volumen (m³): **0.0509**

Material	Peso (kg)	Volumen (m ³)
Agua:	7.5841	0.0076
Cemento:	22.8484	0.0074
Grava:	48.9022	0.0192
Arena:	35.7196	0.0140

Volumen (m³) + 20% más de cemento.

Material	Peso (kg)	Volumen (m ³)
Agua:	7.5841	0.0076
Cemento:	27.4181	0.0089
Grava:	48.9022	0.0192
Arena:	35.7196	0.0140

5.3. Tipos de condición: agua potable, agua de mar y en el terreno.

Los tipos de condición se seleccionaron para comparar las reacciones del concreto expuesto a diferentes ataques de sulfatos y estuvieron sometidos el tiempo indicado en cada tabla para posteriormente ser medidos y ensayados para obtener su resistencia a la compresión y comprobar las diferencias.

Cilindros para la condición de agua de curado normal.

Aquí los cilindros fueron sometidos a condiciones de curado normal en la planta de concreto de Cemex en Mazatlán, Sinaloa (ver Fig. 5.1).



Fig. 5.1. Cilindros de concreto sometidos a agua de curado normal.

Tipo de cemento	Cantidad	Revenimiento	Fecha de el.	Fecha de exp.	Observaciones	Tiempo
CPO - RS	6	12 cm a 12.50 cm	27/11/02	28/11/02	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999.	204 d
CPC - 30R	7	12 cm a 12.50 cm	27/11/02	28/11/02	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999.	204 d
CPO - 40R	5	12 cm a 12.50 cm	28/11/02	29/11/02	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999.	203 d
CPO - 40R + 20% C	-	20 cm	28/11/02	29/11/02	Los cilindros con este cemento salieron defectuosos por una mal relación agua/cemento, así que se eliminaron.	203 d
Total:	18					

Cilindros para condición de agua de mar.

En esta condición el concreto se expuso sumergido en el agua de mar, quedando expuesto al aire en ciertos días del año cuando la marea bajaba (ver Fig. 5.2). Estos cilindros estaban colocados debajo del muelle del puerto de Mazatlán, Sinaloa, y estuvieron expuestos a una concentración de los siguientes compuestos del agua de mar¹²:

Elemento	Cantidad
PH	7.91
Alcalinidad	8.00
Salinidad	40 o/oo
Conductividad	340 uMHOS x 100
Sodio	25,000 mg/l
Potasio	780 mg/l
Dureza total	0
Dureza de calcio	0
Magnesio	0
Silicatos	3.60 mg/l
Sulfatos	190 mg/l
Cloruros	14,999.58 mg/l



Fig. 5.2. Cilindros expuestos al agua de mar.

¹² Resultados de un análisis químico realizado en el laboratorio de la Sección de Ingeniería Ambiental de la DEPMI UNAM (ver anexo A).

Tipo de cemento	Cantidad	Revenimiento	Fecha de el.	Fecha de exp.	Observaciones	Tiempo
CPO - RS	8	9.00 cm	22/01/03	23/01/03	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999.	148 d
CPC - 30R	8	8.00 cm	22/01/03	23/01/03	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999.	148 d
CPO - 40R	8	7.50 cm a 8.00 cm	22/01/03	23/01/03	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999.	148 d
CPO - 40R + 20% C	8	9.50 cm	22/01/03	23/01/03	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999. Para que esta mezcla diera el revenimiento dentro de norma se le tuvo que agregar 1.50 litros de agua más de la que da el cálculo de la dosificación.	148 d
Total:	32					

Cilindros para condición de suelo cercano al mar.

En esta condición el concreto se expuso enterrado en un suelo cercano al mar (ver Fig. 5.3). Estos cilindros estaban colocados a un lado de una cimentación de una casa en el puerto de Mazatlán, Sinaloa, y estuvieron expuestos a una concentración de los siguientes compuestos del suelo¹³:

Elemento	Cantidad
PH	9.25
Alcalinidad	2.00
Salinidad	25 o/oo
Conductividad	480 uMHOS x 100
Sodio	5,000 mg/l
Potasio	30 mg/l
Dureza total	0.012 mg/l
Dureza de calcio	0
Magnesio	0.012 mg/l
Silicatos	9.20 mg/l
Sulfatos	360 mg/l
Cloruros	20,499.43 mg/l

¹³ Resultado de un análisis químico elaborado en el laboratorio de la Sección de Ingeniería Ambiental de la DEPMI UNAM (ver anexo A).



Fig. 5.3. Cilindros de concreto expuestos bajo un suelo cercano al mar.

Tipo de cemento	Cantidad	Revenimiento	Fecha de el.	Fecha de exp.	Observaciones	Tiempo
CPO - RS	8	8.00 cm a 9.00 cm	24/01/03	25/01/03	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999.	146 d
CPC - 30R	8	8.00 cm a 9.00 cm	24/01/03	25/01/03	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999.	146 d
CPO - 40R	8	7.50 cm a 8.00 cm	24/01/03	25/01/03	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999.	146 d
CPO - 40R + 20% C	8	9.50 cm	24/01/03	25/01/03	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999. Para que esta mezcla diera el revenimiento dentro de norma se le tuvo que agregar 1.50 litros de agua más de la que da el cálculo de la dosificación.	146 d
Total:	32					


Cilindros para condición de agua de curado normal faltantes.


Tipo de cemento	Cantidad	Revenimiento	Fecha de el.	Fecha de exp.	Observaciones	Tiempo
CPO - RS	2	-	27/01/03	28/01/03	No se checó revenimiento por la poca cantidad de mezcla que se veía con buena consistencia	143 d
CPC - 30R	-	-	-	-	No se elaboró la probeta.	143 d
CPO - 40R	3	-	27/01/03	28/01/03	No se checó revenimiento por la poca cantidad de mezcla que se veía con buena consistencia	143 d
CPO - 40R + 20% C	8	9.50 cm a 10.50 cm	27/01/03	28/01/03	Revenimiento dentro de norma según NMX-C-403-ONNCCE-1999. Para que esta mezcla diera el revenimiento dentro de norma se le tuvo que agregar 1.50 litros de agua más de la que da el cálculo de la dosificación.	143 d
Total:	13					

Siendo un total de cilindros elaborados de 95.

5.4. Resultados.


Los resultados obtenidos de este experimento se pueden apreciar en las siguientes tres tablas de reportes de resultados y en las gráficas comparativas, en las cuales se anotan los pesos volumétricos y resistencias a la compresión simple; ambos obtenidos después de la exposición y siendo comparadas las de la condición de agua de mar y suelo cercano al mar contra las de condición en agua de curado normal; y las mezclas A, B y D contra la mezcla C.

				Reporte de resultados de cilindros							
Cilindros expuestos a la condición de curado normal.											
Resistencia de diseño = 250 kg/cm ² .											
Fecha:											
Especimen No.	Fecha			Edad (días)	Peso (kg)	Volumen (m ³)	Peso vol. (kg/m ³)	Carga máx. (kg)	Area (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de mezcla
	Elaboración	Exposición	Ensaye								
1	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	13.00	0.00570	2,278.98	102,000	186.42	547.17	A
2	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	13.00	0.00570	2,278.98	102,000	186.42	547.17	
3	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	13.10	0.00570	2,296.51	100,988	186.42	541.74	
4	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	13.05	0.00570	2,287.75	102,000	186.42	547.17	
5	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	12.85	0.00570	2,252.69	103,428	186.42	554.83	
6	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	12.30	0.00547	2,247.46	87,108	181.82	479.08	
7	24-01-03	28-01-03	20-06-03	204	12.20	0.00547	2,229.19	86,700	181.82	476.84	
8	24-01-03	28-01-03	20-06-03	204	12.20	0.00547	2,229.19	84,660	181.82	465.62	
9	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	12.05	0.00545	2,209.12	88,740	181.82	488.06	
10	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	11.90	0.00547	2,174.38	93,840	181.82	516.11	B
11	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	12.05	0.00545	2,211.03	80,784	181.06	446.17	
12	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	12.05	0.00543	2,218.40	90,780	181.06	501.38	
13	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	12.05	0.00543	2,218.40	92,820	181.06	512.64	
14	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	12.05	0.00543	2,218.40	91,800	181.06	507.01	
15	27-11-02	28-11-02	20-06-03	204	12.05	0.00545	2,211.03	85,680	181.06	473.21	
16	28-11-02	29-11-02	20-06-03	203	12.90	0.00556	2,320.73	102,000	181.06	563.34	C
17	28-11-02	29-11-02	20-06-03	203	12.90	0.00574	2,246.77	90,780	186.42	486.98	
18	28-11-02	29-11-02	20-06-03	203	12.90	0.00572	2,254.09	98,940	186.42	530.75	
19	28-11-02	29-11-02	20-06-03	203	12.90	0.00572	2,254.09	96,900	186.42	519.81	
20	28-11-02	29-11-02	20-06-03	203	12.90	0.00574	2,246.77	94,860	186.42	508.86	
21	27-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.80	0.00576	2,222.14	99,960	186.42	536.22	
22	27-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.25	0.00567	2,161.63	86,700	186.42	465.09	
23	27-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.20	0.00549	2,221.81	85,680	181.82	471.23	
24	24-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.80	0.00561	2,280.45	81,600	181.06	450.67	
25	24-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.80	0.00576	2,222.14	89,760	186.42	481.51	D
26	24-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.80	0.00578	2,214.97	87,720	186.42	470.56	
27	24-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.75	0.00576	2,213.46	84,660	186.42	454.15	
28	24-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.75	0.00574	2,220.64	87,108	186.42	467.28	
29	24-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.75	0.00574	2,220.64	82,620	186.42	443.20	
30	24-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.75	0.00576	2,213.46	83,640	186.42	448.68	
31	24-01-03	28-01-03	20-06-03	143	12.85	0.00574	2,238.06	84,660	186.42	454.15	
Observaciones: A = mezcla hecha con CPO - RS B = mezcla hecha con CPC - 30R C = mezcla hecha con CPO - 40R D = mezcla hecha con CPO - 40R + 20% cemento											
Elaboró: Ing. Rigel Ruiz Osuna.						Aprobó: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes.					

				Reporte de resultados de cilindros							
				Cilindros expuestos a la condición de agua de mar.							
				Resistencia de diseño = 250 kg/cm ² .							
				Fecha:							
Especimen No.	Fecha			Edad (días)	Peso (kg)	Volumen (m ³)	Peso vol. (kg/m ³)	Carga máx. (kg)	Area (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)	Tipo de mezcla
	Elaboración	Exposición	Ensaye								
1	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.55	0.00562	2,234.93	76,500	184.11	415.51	A
2	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	13.10	0.00587	2,229.87	75,480	189.51	398.29	
3	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.50	0.00564	2,216.80	76,908	184.88	415.99	
4	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.60	0.00576	2,188.88	82,824	188.73	438.84	
5	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.50	0.00576	2,172.02	81,600	185.65	439.55	
6	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.50	0.00559	2,235.31	77,928	183.35	425.03	
7	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	13.10	0.00591	2,215.58	79,764	189.51	420.90	
8	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.50	0.00561	2,227.73	80,784	186.42	433.36	
9	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.50	0.00562	2,225.95	89,148	187.19	476.25	B
10	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.40	0.00554	2,239.45	88,740	183.35	484.00	
11	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.60	0.00564	2,234.53	84,252	184.88	455.72	
12	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.50	0.00556	2,246.26	86,700	184.88	468.96	
13	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.55	0.00556	2,255.24	93,228	184.88	504.27	
14	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.40	0.00554	2,239.45	85,068	183.35	463.97	
15	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.50	0.00554	2,255.61	87,720	184.11	476.45	
16	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.50	0.00552	2,263.12	77,724	184.11	422.16	
17	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.50	0.00578	2,163.05	74,460	186.42	399.43	C
18	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	13.00	0.00592	2,194.82	81,804	191.07	428.15	
19	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.40	0.00558	2,222.79	84,660	184.11	459.83	
20	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.30	0.00556	2,212.17	81,600	184.11	443.21	
21	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.40	0.00559	2,217.43	78,540	183.35	428.37	
22	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.40	0.00552	2,246.89	80,580	183.35	439.50	
23	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.35	0.00554	2,230.42	78,540	183.35	428.37	
24	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.55	0.00556	2,259.06	81,600	183.35	445.06	
25	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.90	0.00579	2,228.31	80,580	187.96	428.71	D
26	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.90	0.00579	2,228.31	76,500	187.96	407.00	
27	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.90	0.00579	2,228.31	76,500	187.96	407.00	
28	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.80	0.00575	2,227.40	78,540	187.19	419.58	
29	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.90	0.00579	2,228.31	78,948	187.96	420.03	
30	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.90	0.00579	2,228.31	78,132	187.96	415.69	
31	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.85	0.00579	2,219.68	73,848	187.96	392.89	
32	22-01-03	23-01-03	20-06-03	148	12.85	0.00578	2,221.63	78,744	187.19	420.67	

Observaciones:
A = mezcla hecha con CPO - RS
B = mezcla hecha con CPC - 30R
C = mezcla hecha con CPO - 40R
D = mezcla hecha con CPO - 40R + 20% cemento

Elaboró: Ing. Rigel Ruiz Osuna. Aprobó: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes.

				Reporte de resultados de cilindros							Tipo de mezcla
				Cilindros expuestos a la condición de suelo cercano al mar. Resistencia de diseño = 250 kg/cm ² . Fecha:							
Especimen No.	Fecha			Edad (días)	Peso (kg)	Volumen (m ³)	Peso vol. (kg/m ³)	Carga máx. (kg)	Area (cm ²)	Resistencia (kg/cm ²)	
	Elaboración	Exposición	Ensaye								
1	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.50	0.00550	2,272.56	77,600	183.35	423.24	A
2	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.50	0.00550	2,272.56	84,200	183.35	459.24	
3	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.50	0.00550	2,272.56	77,724	183.35	423.92	
4	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.50	0.00550	2,272.56	87,108	183.35	475.10	
5	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.50	0.00550	2,272.56	80,580	183.35	439.50	
6	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.35	0.00543	2,273.62	75,684	181.06	418.00	
7	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.50	0.00550	2,272.56	87,108	183.35	475.10	
8	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.50	0.00550	2,272.56	82,620	183.35	450.62	
9	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.20	0.00543	2,246.01	75,684	181.06	418.00	
10	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.30	0.00550	2,236.20	83,640	183.35	456.19	B
11	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.35	0.00550	2,245.29	82,008	183.35	447.28	
12	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.30	0.00545	2,254.96	74,460	181.82	409.52	
13	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.30	0.00545	2,254.96	73,644	181.82	405.03	
14	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.80	0.00580	2,205.84	85,680	187.19	457.73	
15	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.20	0.00543	2,246.01	77,112	181.06	425.89	
16	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.15	0.00543	2,236.81	75,888	181.06	419.13	C
17	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.15	0.00545	2,227.46	75,480	181.82	415.13	
18	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.15	0.00543	2,236.81	71,400	181.06	394.34	
19	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.20	0.00550	2,218.02	80,580	183.35	439.50	
20	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.80	0.00583	2,196.78	82,008	187.96	436.31	
21	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.75	0.00580	2,197.23	82,620	187.19	441.38	
22	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.15	0.00545	2,227.46	76,092	181.82	418.50	
23	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.30	0.00550	2,236.20	81,600	183.35	445.06	
24	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.80	0.00580	2,205.84	82,212	187.19	439.20	D
25	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.80	0.00577	2,220.17	76,908	187.19	410.86	
26	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.80	0.00580	2,205.84	80,580	187.19	430.48	
27	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.80	0.00580	2,205.84	80,968	187.19	432.66	
28	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.80	0.00580	2,205.84	74,460	187.19	397.79	
29	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.80	0.00580	2,205.84	79,968	187.19	427.21	
30	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.80	0.00580	2,205.84	87,108	187.19	465.36	
31	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.40	0.00559	2,217.43	80,968	183.35	441.72	
32	24-01-03	25-01-03	20-06-03	146	12.90	0.00577	2,237.51	82,212	187.19	439.20	

Observaciones:
A = mezcla hecha con CPO - RS
B = mezcla hecha con CPC - 30R
C = mezcla hecha con CPO - 40R
D = mezcla hecha con CPO - 40R + 20% cemento

Elaboró: Ing. Rigel Ruiz Osuna. Aprobó: Ing. Juan Luis Cottier Caviedes.

Tabla de medias y desviaciones estándar para la condición de curado normal.

Tipo de mezcla	f'c (kg/cm ²)		P. V. (kg/m ³)	
	Media	Desv. est.	Media	Desv. est.
Mezcla A	519.95	38.53	2,262.60	26.40
Mezcla B	492.08	25.13	2,208.68	15.66
Mezcla C	510.29	34.04	2,241.00	44.38
Mezcla D	458.78	12.99	2,227.98	22.64

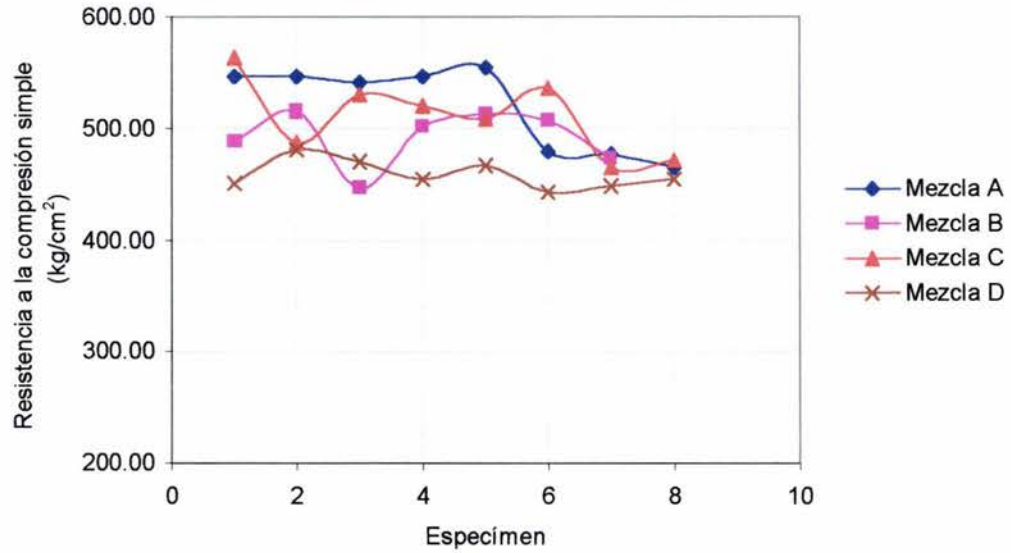
Tabla de medias y desviaciones estándar para la condición de curado de agua de mar.

Tipo de mezcla	f'c (kg/cm ²)		P. V. (kg/m ³)	
	Media	Desv. est.	Media	Desv. est.
Mezcla A	423.43	13.91	2,215.14	23.07
Mezcla B	468.97	23.82	2,244.95	12.43
Mezcla C	433.99	17.72	2,218.33	29.97
Mezcla D	413.95	11.18	2,226.28	3.53

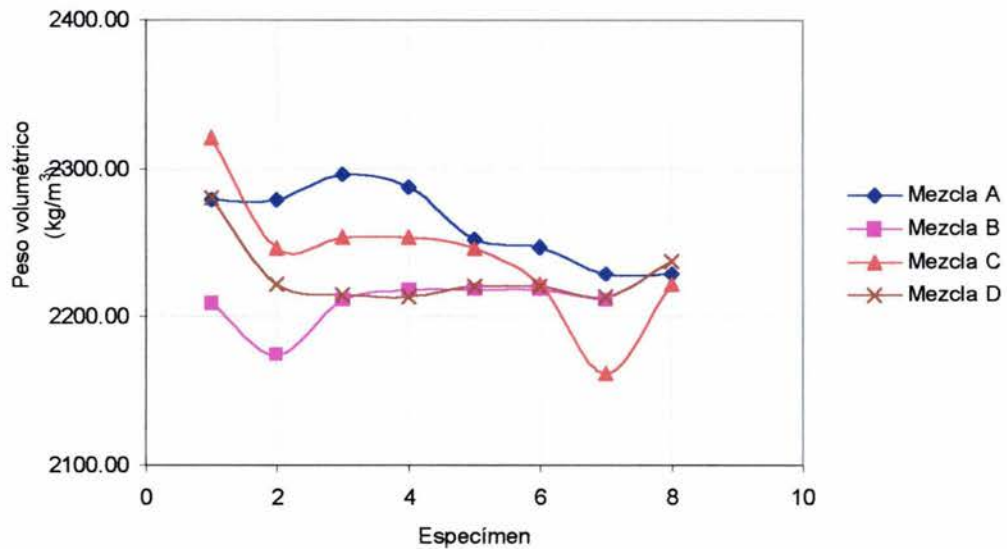
Tabla de medias y desviaciones estándar para la condición de curado en suelo cercano al mar.

Tipo de mezcla	f'c (kg/cm ²)		P. V. (kg/m ³)	
	Media	Desv. est.	Media	Desv. est.
Mezcla A	445.59	23.06	2,272.70	0.38
Mezcla B	429.85	20.96	2,240.76	15.74
Mezcla C	428.68	17.65	2,218.22	16.45
Mezcla D	430.66	20.31	2,213.04	11.51

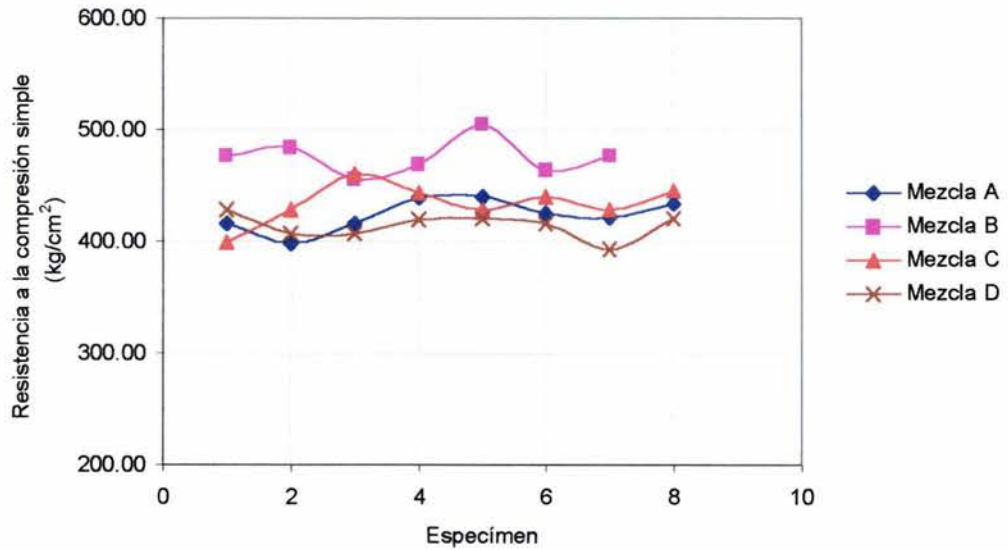
Comparación de las resistencias a la compresión simple de las cuatro tipos de mezclas para la condición de curado normal



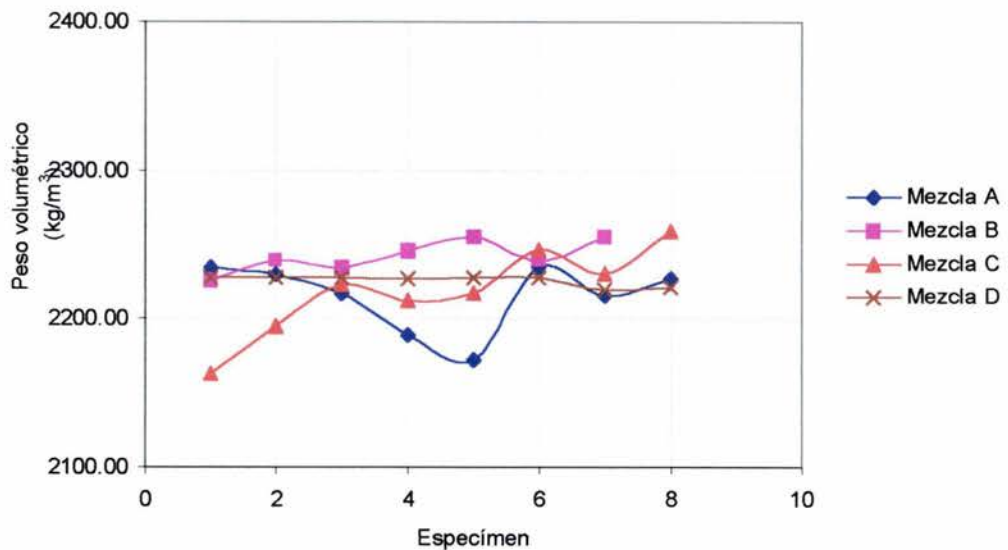
Comparación de los pesos volumétricos de las cuatro tipos de mezcla para la condición de curado normal



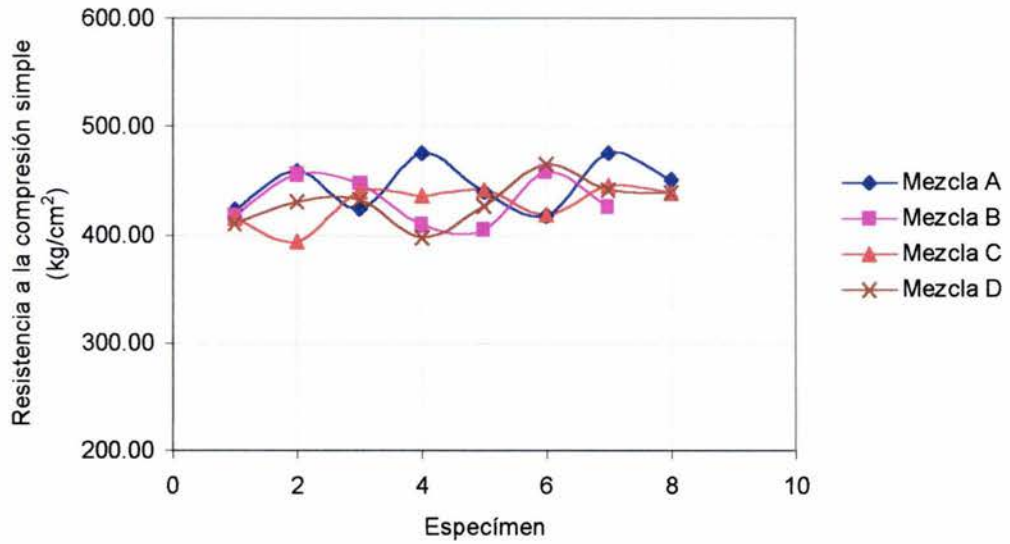
Comparación de las resistencias a la compresión simple de los cuatro tipos de mezclas para la condición de agua de mar



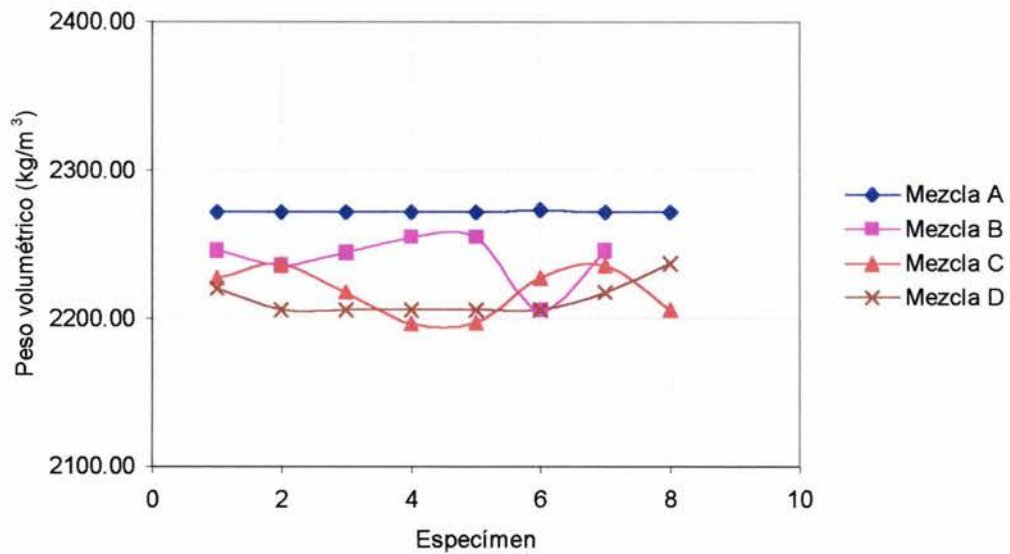
Comparación de los pesos volumétricos de las cuatro tipos de mezclas para la condición de agua de mar



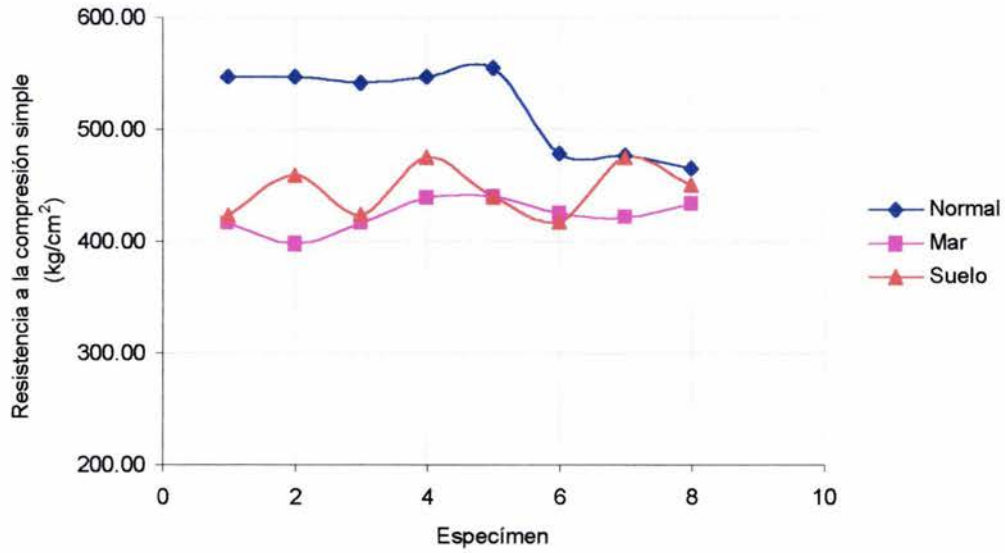
Comparación de las resistencias a la compresión simple de los cuatro tipos de mezclas para la condición de suelo cercano al mar



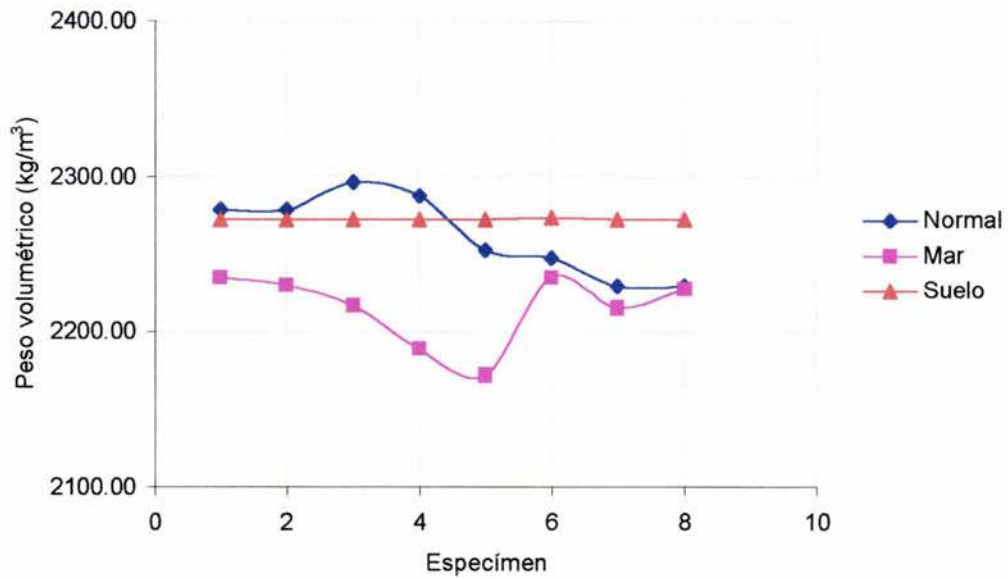
Comparación de los pesos volumétricos de los cuatro tipos de mezclas para la condición de suelo cercano al mar



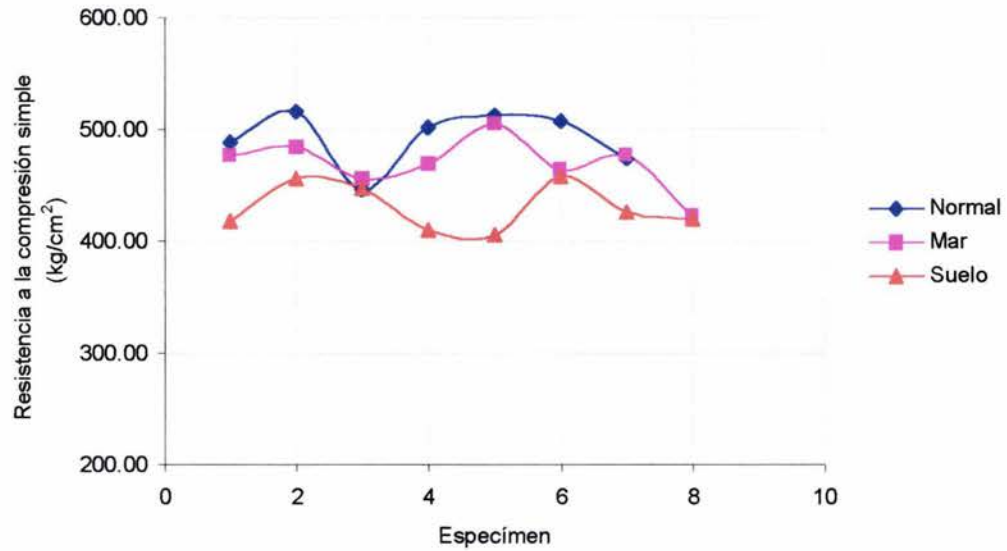
Comparación de las resistencias a la compresión simple de la mezcla A de las tres condiciones de curado



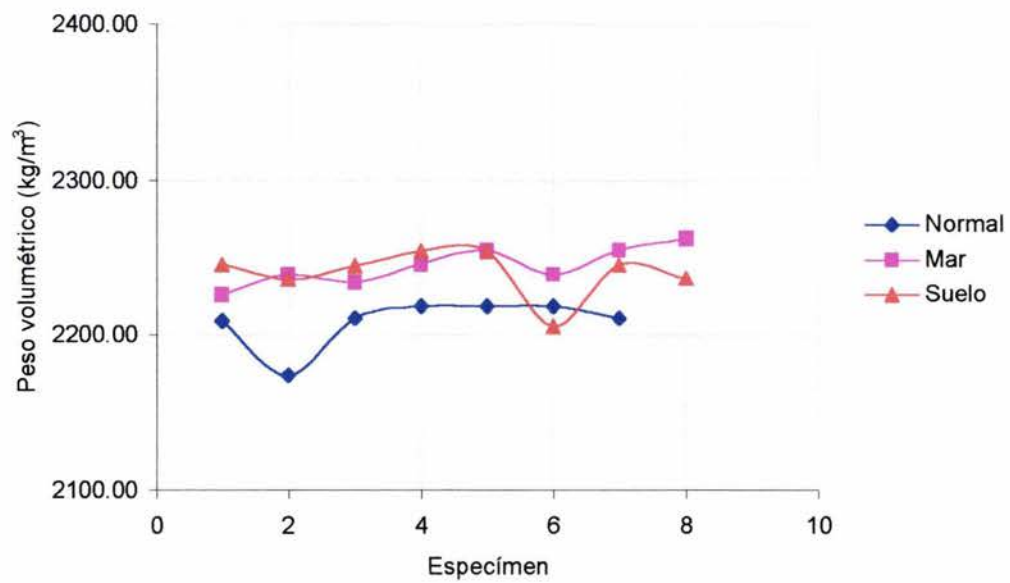
Comparación de los pesos volumétricos de la mezcla A de las tres condiciones de curado



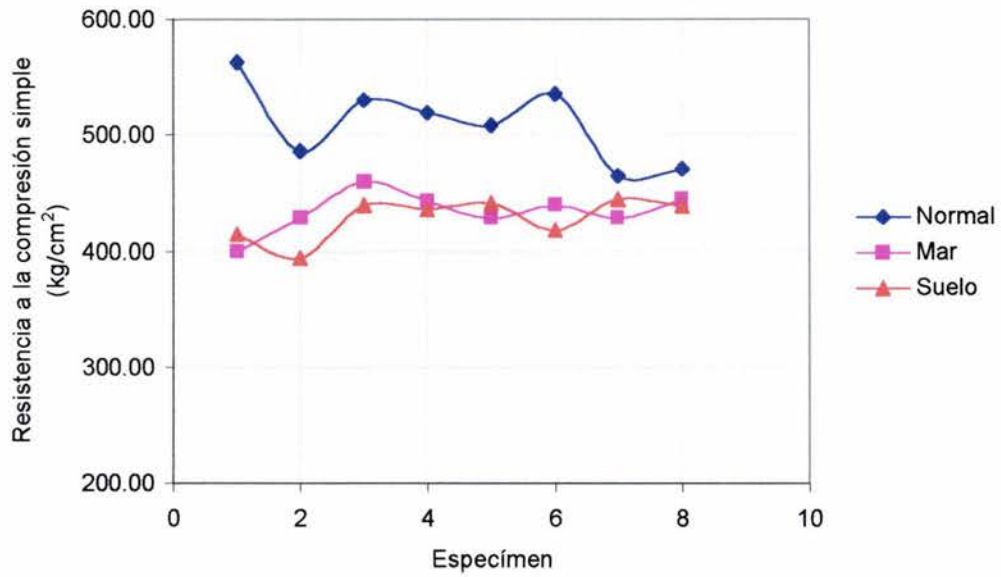
Comparación de las resistencias a la compresión simple de la mezcla B de las tres condiciones de curado



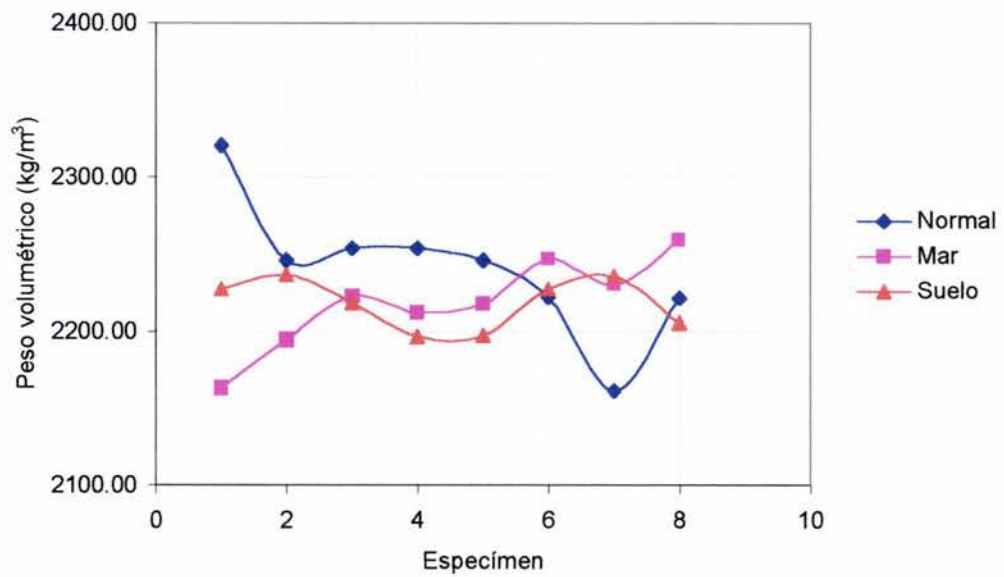
Comparación de los pesos volumétricos de la mezcla B de las tres condiciones de curado



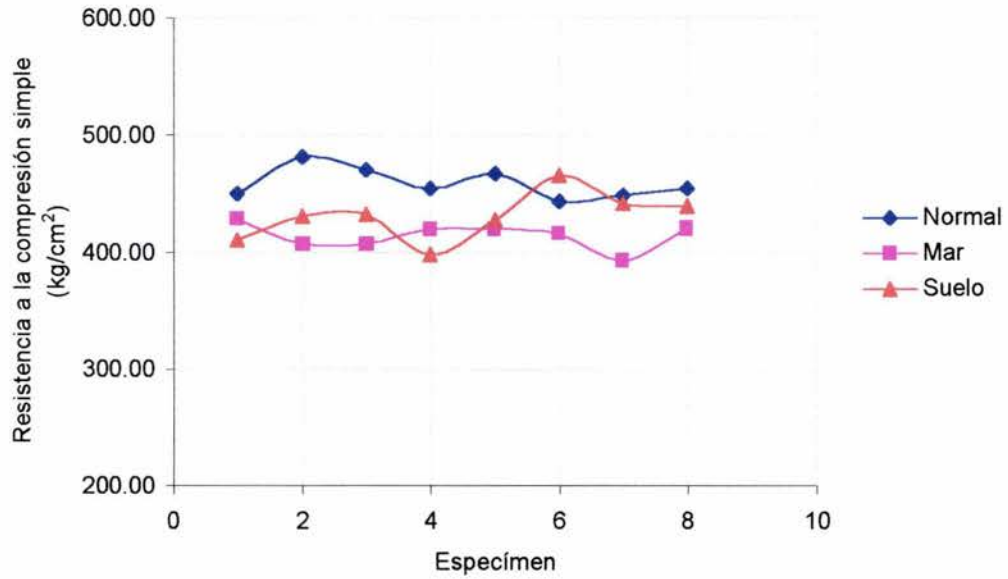
Comparación de las resistencias a la compresión simple de la mezcla C de las tres condiciones de curado



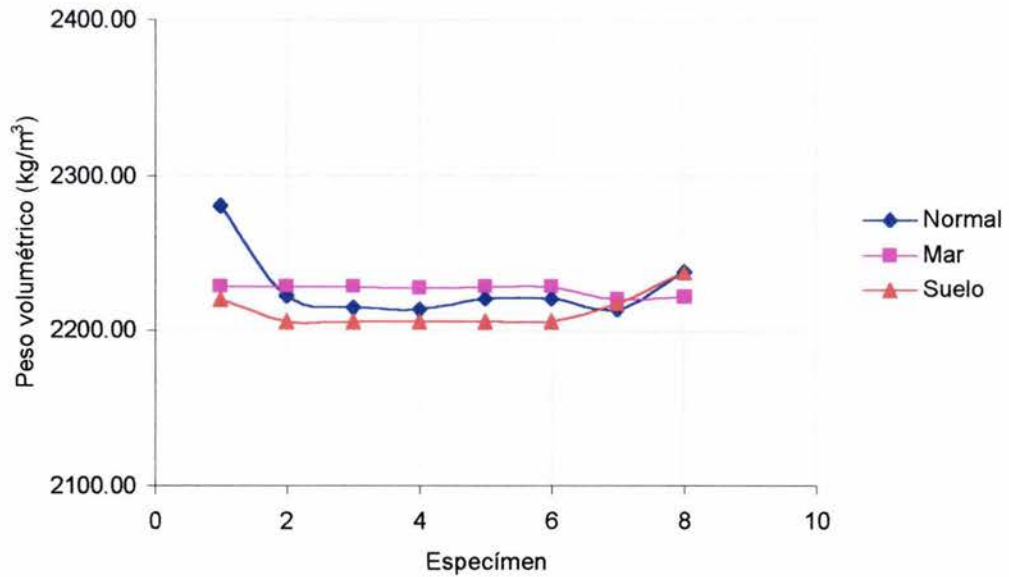
Comparación de los pesos volumétricos de la mezcla C de las tres condiciones de curado



Comparación de las resistencias a la compresión simple de la mezcla D de las tres condiciones de curado



Comparación de los pesos volumétricos de la mezcla D de las tres condiciones de curado



5.5. Conclusión.

En las gráficas de comparación de las resistencias a la compresión simple y de los pesos volumétricos de los cuatro tipos de mezclas para los tres tipos de condiciones, se observa que las mezclas A y B, hechas de Cemento Portland Ordinario con característica especial de Resistencia a los Sulfatos y Cemento Portland Compuesto respectivamente, tienen mejor comportamiento que las mezclas C y D hechas de Cemento Portland Ordinario y Cemento Portland Ordinario más un 20% más de cemento.

En las gráficas de comparación de las resistencias a la compresión simple y de los pesos volumétricos de cada mezcla de las tres condiciones de curado, se observa que la condición más agresiva es la de agua de mar seguida por la de suelo cercano al mar y después por la de curado normal. Esto se debe a que en la condición de agua de mar los cilindros estuvieron expuestos a humedecimiento y secado, la cual es la condición más crítica de exposición de un concreto sometido a un ambiente marino.

Cabe mencionar que las diferencias existentes entre la resistencia para la cual fueron diseñados los cilindros y las que resultaron al final, pueden deberse a un dato erróneo de los porcentajes de humedad del agregado grueso y fino, provocando que en el diseño se descontara más agua de la que debía de ser y se generó una relación agua/cemento menor.

Por lo tanto, puede concluirse que la hipótesis de que el daño se debe al ataque de los sulfatos queda comprobada.

Es importante mencionar que este estudio puede mejorarse contando con mayor tiempo de exposición y con mayores recursos económicos, dejando así una línea de investigación para posteriores estudios.

Capítulo 6. Evaluación de las normas vigentes sobre el uso de concreto en ambientes marinos.

En México el organismo encargado de la elaboración de la normativa para alcanzar una buena calidad en las estructuras de concreto es el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE). Este organismo se encarga de emitir las normas NMX ó normas mexicanas, que son las que regulan la calidad en la construcción.

En una revisión efectuada a las normas NMX, al Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y al Reglamento de Construcciones de Mazatlán, se encontró que no existe una normativa de calidad para el concreto utilizado en la construcción de estructuras sometidas a ambientes marinos. La única norma que hace alguna referencia al respecto es la norma NMX-C-403-ONNCCE-1999 titulada “industria de la construcción – concreto hidráulico para uso estructural”, que en sus apartados A. 1. al A.4.3.1.2. da algunos requisitos para alcanzar la durabilidad del concreto según el tipo de exposición al que estén expuestos, y en su apartado J.2.3.1 hace breves recomendaciones para el uso de un concreto sometido a la acción de los sulfatos; sin embargo no llega a ser una norma para concreto sometido a ambientes marinos.

Existen organismos nacionales como la Comisión Federal de Electricidad que han hecho algo de investigación al respecto, pero no se ha plasmado en una norma y divulgado.

Por lo cual, el objetivo de este trabajo es hacer una lista de recomendaciones alternativas para la prevención y el control del deterioro de las estructuras de concreto sometidas a ambientes marinos y comprobar que dicho daño se debe al ataque de los sulfatos, dejando las bases para que en un futuro sirva como guía para la elaboración de una norma.

Capítulo 7. Conclusiones.

Cuando se vaya a construir una estructura de concreto cercana al mar, es necesario tomar las siguientes medidas para la prevención y control del deterioro de dicha estructura a una corta edad.

1. Antes de construir, durante el proceso de proyecto de la estructura, se deben realizar estudios químicos, tanto del suelo con el que estará en contacto la cimentación y del agua a la que estará expuesta la estructura, como de las partículas suspendidas en el medio ambiente. Esto es para determinar el grado de agresividad al que estará expuesto el concreto.
2. Debe realizarse una mezcla de concreto con una relación máxima de agua/cemento igual a 0.45, para las estructuras que estarán expuestas a la agresión y a los cambios de temperatura del medio ambiente. Esto debe hacerse para que el concreto tenga una impermeabilidad adecuada ante los sulfatos.
3. Los tipos de cemento que se pueden utilizar en la elaboración del concreto para los ambientes marinos según la Norma NMX-C-414-ONNCCE son los siguientes:

Tipo	Denominación
CPO – RS	Cemento Portland Ordinario con característica especial de resistencia a los sulfatos en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa. Este tipo de cemento se puede encontrar comercialmente.
CPC	Cemento Portland Compuesto en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa en climas calurosos. Este tipo de cemento se puede encontrar comercialmente.
CPP	Cemento Portland Puzolánico en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa en climas calurosos. Este tipo de cemento se puede encontrar comercialmente.
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa en climas calurosos. Este tipo de cemento no se encuentra comercialmente, requiere fabricación especial.
CEG	Cemento con Escoria Granulada de alto horno en cualquiera de sus clases resistentes. Se puede emplear en concreto armado y en masa en climas calurosos. Este tipo de cemento no se encuentra comercialmente, requiere fabricación especial.

4. Debe usarse un agregado que cumpla con las siguiente características:

- Granulometría uniforme para lograr un buen acomodo de las partículas y evitar espacios vacíos.
- Tamaño máximo del agregado de 19 mm para evitar el sangrado interno del concreto que puede hacer porosa la zona de transición entre la pasta y el agregado.
- Libre de sustancias que puedan reaccionar con el concreto, como son los sulfatos.

5. El agua a utilizar para la fabricación del concreto debe ser potable para garantizar que no contenga sustancias deletéreas para el concreto.
6. Debe ponerse especial atención en el proceso de colocación del concreto, cuidando que la cimbra esté bien colocada y hermética para evitar que se pierda parte de la mezcla de concreto conocida como lechada y se pierda la relación agua/cemento con la que se diseñó la mezcla.
7. Durante el proceso de colocación del concreto debe hacerse un buen vibrado. Se recomienda capacitar a una persona para dicho trabajo y no seguir la costumbre de poner a un peón a que lo realice. Esto es para lograr el correcto acomodo de las partículas de este.
8. Se recomienda tener un buen curado del concreto, ya sea por la adición de aditivos o manteniéndolo húmedo durante su proceso de hidratación de 28 días.
9. Es necesario tener un buen departamento de control de calidad que se asegure de que el concreto cumpla con todas las normas de calidad como lo son el revenimiento y la resistencia de diseño.
10. Debe hacerse una revisión periódica de la estructura para verificar que esté cumpliendo con una vida útil adecuada.
11. El alcance de esta tesis es generar una guía que sirva de base para diseñar una norma de calidad para concretos sometidos a ambiente marinos.
12. Los resultados obtenidos en esta tesis permitieron comprobar la hipótesis de que el daño se debe al ataque por sulfatos, por lo cual se sugiere elaborar una norma exclusiva para concretos sometidos a ambientes marinos, elaborando experimentos similares al realizado para esta tesis, pero con más tiempo de exposición y mayores recursos económicos; lo anterior puede constituir una línea de investigación futura.

GLOSARIO.

Angstrom.-

Unidad de longitud que equivale a 10^{-10} metros, es decir, es una diez mil millonésima parte de un metro.

Etringita.

Sal que se forma por la reacción de iones sulfato con los aluminatos cálcicos hidratados del cemento, también conocida como sal de Candlot.

μm (Micrómetro).

Unidad de longitud que equivale a 10^{-6} metros, es decir, es una millonésima parte de un metro.

mm (Milímetro).

Unidad de longitud que equivale a 10^{-3} metros, es decir, es una milésima parte de un metro.

nm (Nanómetro).

Unidad de longitud que equivale a 10^{-9} metros, es decir, es una mil millonésima parte de un metro.

Anexo A



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
SECCIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL

FING/DEP/SA/048/2003

Asunto: Resultados de los análisis químicos
del agua de mar y suelo.

DR. ABRAHAM DÍAZ RODRÍGUEZ
Coordinador de la
Sección de Construcción – DEPTI
Presente.

A continuación le entrego los resultados de las muestras de suelo y agua que nos fueron entregadas con fecha de recepción 23 de mayo del año en curso, por el Ing. Rigel Ruiz Osuna, y que fueron analizadas en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental por la Lab. Livia E. Sánchez Rueda.

MUESTRAS DE AGUA Y ARENA DE MAR DEL ESTADO DE MAZATLÁN SINALOA

	AGUA	ARENA DE MAR	
Ph	7.91	9.25	
Alcalinidad	8	2	
Salinidad	40 o/oo	25 o/oo	
Conductividad	340 uMHOS x 100	480 uMHOS	
Sodio	25000 mg/l.	5000 mg/l	
Potasio	780 mg/l	30 mg/l	
Dureza Total	0	0.012 mg /l	
Dureza de calcio	0	0	
Magnesio	0	0.012 mg/l	
Silicatos	3.6 mg/l	9.2 mg / l	
Sulfatos	190 mg / l	360 mg/l	
Cloruros	14999.58 mg/l	20499.426 mg/l	

En espera de que esta información le sea de utilidad, estoy a sus órdenes para cualquier aclaración.

Atentamente.

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cd. Universitaria, a 11 de junio del 2003

LA JEFE DE LA SECCIÓN DE AMBIENTAL

M. EN ING. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ
AESM*esa

BIBLIOGRAFÍA.

Boletín de información No. 183 del COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON, *Durable Concrete Structures: Desing Guide*, Mayo 1992, 112 páginas.

MEHTA, P. K, J. M. MONTEIRO, *Concreto: estructura, propiedades y materiales*, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, México, D. F., 1998, 381 páginas.

SANJUÁN BARBUDO, M. A., CASTRO BORGES, P., *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, D. F., 2001, 46 páginas.

Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Ingeniería de la UNAM, *Manual de tecnología del concreto sección 1*, Ed. Limusa Noriega editores, México, D. F., 1994, 258 páginas.

Norma Mexicana NMX-C-403-ONNCCE-1999: "Industria de la construcción – concreto hidráulico para uso estructural.

Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999: "Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba.

H. KOSMATKA, S., C. PANARESE, W., *Diseño y control de mezclas de concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, D. F., 1992, 230 páginas.

GONZÁLEZ SANDOVAL, F., *Manual de supervisión de obras de concreto*, segunda edición, Ed. Limusa Noriega editores, México, D. F., 2000, 148 páginas.

COTTIER CAVIEDES, J. L., *El concreto bajo la influencia de los sulfatos*, XI Jornadas Chilenas del Hormigón en el Centro Tecnológico del Hormigón, Antofagasta, Chile, 16 – 18 de Octubre de 1996.

COTTIER CAVIEDES, J. L., *Alteración y durabilidad del concreto*, Seminario Internacional de Durabilidad, Patología y Reparación de Estructuras de Concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Monterrey, Nuevo León, México, 16 y 17 de Marzo de 1995.

A. O'REILLY, V., *Porosidad, permeabilidad y durabilidad del concreto*, Seminario Internacional de Durabilidad, Patología y Reparación de Estructuras de Concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Monterrey, Nuevo León, México, 16 y 17 de Marzo de 1995.

LÓPEZ SÁNCHEZ, P., *Durabilidad del hormigón en ambiente marino*, cuadernos Intemac No. 31, Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, España, 1998, 44 páginas.

M. LIBES, S., *An introduction to marine biogeochemistry*, Ed. John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 1992.

D. E., S., *Sulphate resistance of concrete. Measures to prevent sulphate-bearing ground and groundwaters*, Edición CLAS. TP240S5, Ed. Cement and Concrete Association, United States of America, 1983.

ANDRADE, C., ALONSO, M. C., *Vida útil y vida residual de obras en medios marinos*, Revista Cemento – Hormigón No. 788 del Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”, CSIC. Madrid, España, Septiembre de 1998.

URIBE AFFIF, R., *Un riguroso diseño estructural: ¿única garantía de durabilidad de las estructuras?, estudio de casos en México*, Centro de Tecnología Cemento y Concreto de Cementos Mexicanos, reproducido de la revista NOTICRETO No. 61, Oct. – Dic., 2001.

ANDRADE, C., *Vida útil de estructuras de hormigón armado: obras nuevas y deterioradas*, Revista Cemento – Hormigón No. 26 del Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”. CSIC. Madrid, España, Mayo – Agosto de 1994.

HOWLAND, J. J., *Práctica recomendada para el establecimiento de los requisitos de durabilidad del concreto premezclado*, Libro del XI Encuentro Nacional de la Industria del Concreto Premezclado, AMIC, Acapulco, Guerrero, México, 2000.

VIOLETTA, B., *Life-365 service life prediction model: program helps engineers, owners, and contractors choose the right corrosion protection system*, Concrete International Journal ACI Vol. 24 No. 12, United States of America, December 2002.

BHATTACHARJEE, B., *A life cycle cost model for concrete structure*, ICI Journal Vol. 1 No. 3, October-December 2000.

GÜEMEZ G., R., *Resistencia del concreto de cemento Portland a los sulfatos*, Revista IMCYC Vol. 10 No. S.57-58, Julio-Octubre 1972.

HARBOE, E. M., *Resistencia del concreto a los sulfatos: EXPERIENCIAS DE CAMPO*, Revista IMCYC No. 144, Abril 1983.

GASPAR-TEBAR, D., *Durabilidad del hormigón frente al agua de mar: estudio de dos cementos Portland*, Revista IMCYC No. 291, Junio 1977.

LAÑOUSEK, G. L., *Mechanism of sea water attack on cement pastes*, ACI Journal Vol. 67, No. 9, Septiembre 1970.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA