

T.  
620.11223  
C975

1

**CORROSION DEL CONCRETO EN AMBIENTES MARINOS**  
(Evaluación de parámetros de durabilidad mediante agresión simulada del agua de mar)

**FUAD CURI AHUMADA**  
**RAFAEL MARIMON PLANETA**

**S C I B**

~~0003~~1921

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**  
**CARTAGENA**  
**1995**

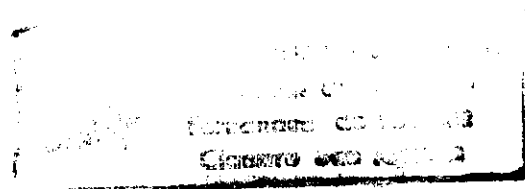
Donado por la F. de Ing. civil nov. 30 1995

“Si el honor y la sabiduría y la felicidad no son para mi, que sean para  
otros... que en un instante, en un ser, Tu enorme biblioteca se justifique.”

Jorge Luis Borges - “La Biblioteca de Babel”

Al espíritu del vino y de la risa, a la vida  
cuyo nombre es Hannia.

F. C.



## AGRADECIMIENTOS

Para la realización de este proyecto fue necesario contar con la colaboración y el apoyo de muchas personas e instituciones. A todas ellas presentamos nuestro sentimiento de gratitud:

ARMADA NACIONAL, al CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS en la ESCUELA NAVAL ALMIRANTE PADILLA.

CENTRAL DE MEZCLAS DE CARTAGENA, CEMCAR S.A.

CESAR PEREIRA CRESPO, Ingeniero Civil y Profesor del Área de Suelos de la UNIVERSIDAD DE CARTAGENA.

CARLOS COLLINS, Ingeniero Civil, Socio Fundador de la empresa ALVAREZ Y COLLINS Ltda. y CONCRETOS DEL CARIBE Ltda.

JOSE GABRIEL GOMEZ, Ingeniero Civil, M. Sc. y Profesor de Hormigón de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA EN BOGOTÁ.

INSTITUTO DE HIDRÁULICA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL DE LA UNIVERSIDAD DE CARTAGENA.

LABORATORIO DE SUELOS DE LA UNIVERSIDAD DE CARTAGENA.

LEONELLO MARTHE, Ingeniero Civil, Gerente de la Empresa CEMCAR S.A.

DALIA MORENO DE WOOD, Ingeniera Civil, Directora del INSTITUTO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD DE CARTAGENA.

GUSTAVO ROCA VIDES, Ingeniero Civil, Gerente de Ventas de la Empresa SIKA ANDINA S. A.

RAFAEL RUIZ ARANGO, Químico Farmacéutico y Profesor de la UNIVERSIDAD DE CARTAGENA.

SIKA ANDINA S. A. RALPH CARVAJAL y ANGELO MARTINEZ en los laboratorios de SIKA en Bogotá, CARLOS VILLALBA en Cartagena, ARTURO MANTILLA y JUAN CARLOS CARCAMO en Barranquilla.

A nuestras familias y amigos, quienes nos apoyaron y colaboraron en todo momento.

## **CONTENIDO**

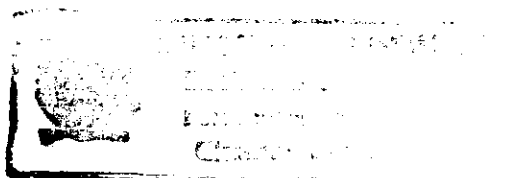
	<b>Pág</b>
INTRODUCCION	1
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECIFICOS	4
JUSTIFICACION	5
1. SUSTANCIAS Y AMBIENTES QUE ATACAN AL CONCRETO	7
1.1 ASPECTOS GENERALES SOBRE CORROSION DEL CONCRETO	7
1.2 CORROSION POR LIXIVIACION DEBIDA A LAS AGUAS BLANDAS	15
1.3 CORROSION DEL CONCRETO POR SUSTANCIAS AGRESIVAS	17
1.3.1 El efecto agresivo del ion sulfato	18
1.3.1.1 Efectos de los sulfatos sobre los silicatos cálcicos	19
1.3.1.2 Efectos de los sulfatos sobre los aluminatos cálcicos	20
1.3.1.3 Efectos de los sulfatos sobre el ferrito aluminato tetracálcico	21

	<b>Pág</b>
1.3.2 Ataques por magnesio	23
1.3.3 Efectos del cloro	26
1.3.4 Carbonatación	27
2. CORROSION POR AGUA DE MAR	35
2.1 GENERALIDADES	35
2.2 SULFATOS EN EL AGUA DE MAR	37
2.3 EL MAGNESIO Y EL DIÓXIDO DE CARBONO EN EL AGUA DE MAR	39
2.4 EL HIDRÓXIDO DE CALCIO	40
2.5 ZONAS DE ATAQUE	44
2.6 CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO	49
2.7 EXPERIENCIAS Y MEDIDAS PREVENTIVAS	57
3. AIRE INCLUIDO	70
3.1 GENERALIDADES	70
3.2 AIRE EN EL CONCRETO	72
3.3 EFECTOS DEL AIRE INCLUIDO EN EL CONCRETO	74
4. FASE EXPERIMENTAL	79
4.1 PRELIMINARES	79
4.2 CRITERIOS	80
4.3 MATERIALES	81
4.4 SELECCION DE PROBETAS	83
4.5 DISEÑO DE MEZCLAS	84

	<b>Pág</b>
4.6 PROCESO DE ELABORACION	88
4.7 AMBIENTE AGRESIVO	89
4.8 CICLOS DE ATAQUE	91
4.9 ENSAYOS	93
5. RESULTADOS Y OBSERVACIONES	98
5.1 PROCEDIMIENTO	99
5.2 CARACTERISTICAS INICIALES	101
5.2.1 Inclusion De Aire	101
5.2.2 Manejabilidad	103
5.2.3 Peso Unitario Fresco	105
5.3 PULSO ULTRASONICO	105
5.4 PESOS	116
5.5 RESISTENCIA A COMPRESION	133
5.6 ENSAYOS QUIMICOS	147
5.6.1 Cloruros Totales	148
5.6.2 Sulfatos Totales	155
5.7 SIGNOS EXTERNOS	157
5.8 ABSORCION	161
6. CONCLUSIONES	162
6.1 RESPECTO A LA INVESTIGACION	162
6.2 RESPECTO AL AIRE INCLUIDO	165



	<b>Pág</b>
6.3 RESPECTO A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO	168
7. RECOMENDACIONES	170
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	172
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA	174
ANEXOS	176



## GLOSARIO

**ACIDO:** Compuesto que contiene hidrógeno que, al ser sustituido por radicales o un metal, forma sales.

**ACIDO CARBONICO:** Disolución en agua de dióxido de carbono.

**ADICIONES:** Materiales que se agregan al cemento portland y que pueden tener propiedades hidráulicas o adquirirlas reaccionando con algunos productos de su hidratación.

**ADITIVO:** Son todos aquellos materiales distintos del agua, los agregados y el cemento hidráulico que se utilizan como ingredientes en concretos y morteros y se añaden a la mezcla inmediatamente antes ó durante su mezclado.

**AGREGADOS:** Son todos aquellos materiales que poseyendo una resistencia propia suficiente no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico, es decir que son inertes y garantizan una adherencia suficiente con la pasta de cemento endurecida.

**ALITA:** A base de  $C_3S$ , es la fase principal en la mayoría de los clínkeres portland y de ella dependen en una buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica; el  $C_3S$  endurece rápidamente y por tanto tiene mayor influencia en el tiempo de fraguado y en la resistencia inicial.

**ALUMINATO TRICALCICO:** Mineral del clinker a base de alúmina obtenido a partir de arcillas.

**ANION:** Ion cargado negativamente que bajo la influencia de la corriente eléctrica se dirige al ánodo.

**ARAGONITA:** Carbonato cálcico hidratado.

**BASE (Alcalis):** Sustancia que al hidratarse libera hidroxilo y se neutraliza al reaccionar con un ácido.

**BELITA:** Es usualmente la segunda fase en importancia del clinker. Su componente principal, el  $C_2S$ , se hidrata lentamente y su contribución al desarrollo de la resistencia empieza es a largo plazo.

**BICARBONATO:** Sal ácida del ácido carbónico.

**BRUCITA:** Hidróxido de magnesio poco soluble en agua.

**CAL:** Oxido cálcico.

**CAL APAGADA:** Hidróxido de calcio.

**CALCITA:** Carbonato de calcio.

**CAL LIBRE:** Cal presente en el concreto producto de la hidratación de los minerales del clinker.

**CARBONATACION:** Reacción de los minerales hidratados del clinker con ácido carbónico.

**CARBONATO:** Sal resultante de la combinación del ácido carbónico con un radical simple o compuesto.

**CATION:** Ión cargado positivamente.

**CEMENTO PORTLAND:** Material fino producto de la molienda del clinker que desarrolla propiedades aglutinantes al contacto con el agua, llegando a solidificar y endurecerse.

**CLINKER:** Producto del calentamiento a muy altas temperaturas (más de  $1000^{\circ}C$ ) de las materias primas del cemento (calizas, alúmina y sílice).

**CONCRETO U HORMIGON:** Mezcla de un material aglutinante (cemento Portland hidráulico), agua, agregados, aditivos y eventualmente adiciones, que al endurecer forman un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión.

**CURADO:** Conjunto de condiciones necesarias para que la hidratación de la pasta evolucione sin interrupción hasta que el cemento se hidrate y el concreto alcance sus propiedades potenciales.

**EFLORESCENCIAS:** Depósito de sal sobre la superficie del concreto producida por la lixiviación de la cal.

**ESCORIA (SLAG):** Masa vítrea obtenida en crisol durante la extracción de los metales.

**ETTRINGITA:**  $3\text{SO}_4\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO} \cdot 0.31\text{H}_2\text{O}$ . Producto de la reacción de sulfatos con aluminatos hidratados.

**FERRITO O FERROALUMINATO TETRACÁLCICO:**  $\text{C}_4\text{AF}$ . Uno de los minerales componentes del clínker.

**FRAGUADO DEL CEMENTO:** Es el cambio del estado plástico al estado endurecido de una pasta de cemento.

**GRANULOMETRIA:** Distribución de tamaños en una muestra de agregado.

**HIDROLISIS:** Reacciones químicas que consisten en la adición de agua a una sustancia compleja que se descompone en otras más sencillas.

**ION:** Partícula dotada de una carga eléctrica (positiva ó negativa) formada por un átomo o grupo de átomos.

**IONIZACION:** Formación de iones en un gas o en un electrolito.

**LIXIVIACION:** Operación mediante la cual, haciendo que un líquido determinado atraviese una sustancia en polvo, se logra extraer de ésta todos los elementos solubles (a través del líquido).

**MICROSILICA:** Pozolana sumamente fina y con altos contenidos de sílice.

**MORTERO:** Mezcla de pasta y agregado fino (arena).

**PASTA O PEGANTE:** Mezcla de cemento, agua, aire (naturalmente atrapado o intencionalmente incluido) y aditivos (cuando son añadidos).

**PIRITAS:** Sulfuro de hierro ( $\text{S}_2\text{Fe}$ ).

**PUZOLANAS:** Materiales silíceos y/o aluminicos con o sin capacidad cementante pero que finamente divididas y en presencia de agua e hidróxido de calcio forman compuestos con poder aglutinante.

**REACCION ALCALI-SILICA:** Expansiones producidas al reaccionar los álcalis del cemento con ciertos agregados silíceos (también se conoce como reacción álcali-agregado).

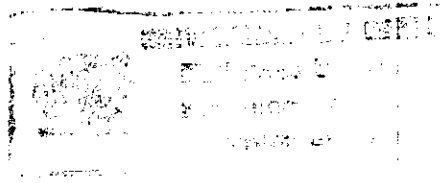
**RELACION AGUA/CEMENTO ó RELACION A/C:** Razón entre el peso del agua y el peso del cemento utilizado en la elaboración del concreto.

**SAL:** Compuesto químico que resulta de la neutralización de un ácido y una base y que en disolución se comporta como electrolito.

**SILICATO:** Compuesto que contiene en su molécula silicio, oxígeno y uno o varios metales.

**TRASS:** Puzolana natural empleada en la preparación de cementos hidráulicas.

**YESO:**  $\text{CaSO}_4$ . Sulfato de calcio que al mezclarse con agua endurece y aumenta de tamaño.



## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág</b>
TABLA 1. Disolución de la cal en concretos carbonatados y no carbonatados	31
TABLA 2. Tipos de mezclas elaboradas para los ensayos	97
TABLA 3. Cambio de peso para la relación A/C 0.42	129

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág</b>
FIGURA 1. Corrosión conjunta de aluminio y magnesio	24
FIGURA 2. Proceso de carbonatación	32
FIGURA 3. Patrones de ataque al concreto en el agua de mar	47
FIGURA 4. Presentación esquemática de la corrosión electroquímica	51
FIGURA 5. Acero pasivado y no pasivado. Corrosión inducida por grietas	55
FIGURA 6. Efectos de la microsilica en la durabilidad del concreto	61
FIGURA 7. Efectos de la microsilica en la durabilidad del concreto	61
FIGURA 8. Efectos de la microsilica en la durabilidad del concreto	61
FIGURA 9. Ciclo corrosivo del concreto reforzado expuesto al medio marino	68
FIGURA 10. Matriz de concreto sin aire incluido	75
FIGURA 11. Matriz de concreto con aire incluido	76

## LISTA DE GRAFICAS

	<b>Pág</b>
GRAFICA 1. Incorporación de aire vs cantidad de aditivo empleado	102
GRAFICA 2. Contenido de aire vs manejabilidad	104
GRAFICA 3. Contenido de aire vs peso unitario fresco	106
GRAFICA 4. Contenido de aire vs velocidad de pulso ultrasónico	107
GRAFICA 5. Velocidad de pulso ultrasónico vs Relación A/C - Patrón	110
GRAFICA 6. Velocidad de pulso ultrasónico vs Relación A/C - Agua de mar	111
GRAFICA 7. Cambio en la velocidad de pulso ultrasónico vs Contenido de aire	113
GRAFICA 8. Permeabilidad vs Contenido de aire	115
GRAFICA 9. Peso seco vs contenido de aire - Patrón a los 10 ciclos	118
GRAFICA 10. Peso seco vs contenido de aire - Patrón a los 20 ciclos	119
GRAFICA 11. Peso seco vs contenido de aire - Patrón a los 25 ciclos	120
GRAFICA 12. Peso seco vs contenido de aire - Agua de mar a los 10 ciclos	121
GRAFICA 13. Peso seco vs contenido de aire - Agua de mar a los 18 ciclos	122



	<b>Pág</b>
GRAFICA 14. Peso seco vs contenido de aire - Agua de mar a los 20 ciclos	123
GRAFICA 15. Peso seco vs contenido de aire - Agua de mar a los 25 ciclos	124
GRAFICA 16. Resistencia a la compresión . Serie 900	134
GRAFICA 17. Resistencia a la compresión . Serie 100	134
GRAFICA 18. Resistencia a la compresión . Serie 700	135
GRAFICA 19. Resistencia a la compresión . Serie 300	135
GRAFICA 20. Resistencia a la compresión . Serie 800	136
GRAFICA 21. Resistencia a la compresión . Serie 400	136
GRAFICA 22. Resistencia a la compresión . Serie 200	138
GRAFICA 23. Resistencia a la compresión . Serie 500	138
GRAFICA 24. Resistencia a la compresión . Serie 600	139
GRAFICA 25. Resistencia compresión vs contenido de aire Rel A/C 0.63-Patrón	142
GRAFICA 26. Resistencia compresión vs contenido de aire Rel A/C 0.63-Agua de mar	143
GRAFICA 27. Resistencia compresión vs contenido de aire Rel A/C 0.42-Patrón	145
GRAFICA 28. Resistencia compresión vs contenido de aire Rel A/C 0.42-Agua de mar	146
GRAFICA 29. Cloruros totales vs contenido de aire - Zona Externa	149
GRAFICA 30. Cloruros totales vs Relación A/C - Zona Externa	150
GRAFICA 31. Cloruros totales - Zona Externa	151

	<b>Pág</b>
GRAFICA 32. Cloruros totales vs contenido de aire - Zona Interna	152
GRAFICA 33. Cloruros totales vs Relación A/C - Zona Interna	153
GRAFICA 34. Cloruros totales - Zona Interna	154
GRAFICA 35. Sulfatos totales - Zona Interna	155

## RESUMEN

Durante años se ha estudiado el tema de la durabilidad del concreto en el medio marino. (En ciertos ambientes se han encontrado resultados positivos al utilizar aditivos incorporadores de aire en la fabricación del hormigón, particularmente cuando éste ha de verse sometido a ciclos de congelamiento y deshielo y al empleo de sales deshelantes.) Se ha realizado una investigación bibliográfica extensa y una serie de *visitas de campo* pruebas de laboratorio dirigidas a aclarar los fenómenos que se presentan en el interior del concreto sometido a los ataques del medio marino (y a medir ciertos parámetros indicadores de durabilidad) con el fin de evaluar los beneficios de la incorporación de aire a través de ensayos a corto plazo. Finalmente se ha realizado un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas a la luz de la teoría encontrada y se han propuesto recomendaciones para la elaboración de estructuras de hormigón en medios marinos y para el desarrollo de futuras investigaciones sobre el tema.

## INTRODUCCION

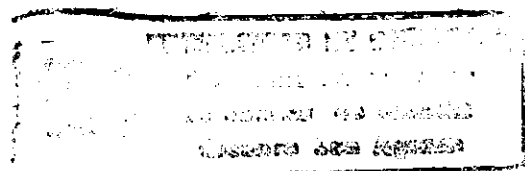
Al observar la naturaleza se puede apreciar cómo todo aquello que nos rodea es afectado de una u otra forma por su continua condición cambiante; algunas cosas con mayor intensidad, otras en menor grado o a mas largo plazo. Esta afirmación -que bien podría atribuírse a Heráclito- se confirma permanentemente en la experiencia cotidiana, comprometiendo en ocasiones el normal desarrollo de las actividades del hombre. La pretensión de realizar obras que soporten el paso del tiempo, antes que una aspiración artística o escatológica, es hoy una necesidad concreta y un problema económico y de seguridad que cada vez es mas difícil resolver ya que los avances tecnológicos e industriales -que, podría pensarse, facilitan la elaboración de estructuras mas durables- originan solicitudes aún mas exigentes para las construcciones y las someten a ambientes más agresivos.

El hormigón de cemento portland es el material por excelencia utilizado en las obras civiles. Hoy en día es difícil imaginar una construcción de cualquier tipo en la que no se emplee el concreto simple o reforzado, su uso es cada vez más extendido y más

variadas sus aplicaciones gracias a sus condiciones de manejabilidad, resistencia y durabilidad, las que ningún otro material combina en tan alto grado y que le permiten adaptarse a una amplia variedad de construcciones en condiciones muy diversas. Se sabe que el homigón no es un material del todo inerte y que, generalmente, los procesos que tienen lugar en su interior (por los cuales gana resistencia) se continúan durante toda la vida de la estructura. De igual forma, bajo ciertas circunstancias, su comportamiento no es tan satisfactorio como se esperaría

El ambiente marino ha albergado estructuras de concreto fabricado a base de cementos hidráulicos desde hace por lo menos dos mil años y en la actualidad, cuando en la búsqueda de nuevos recursos de todo tipo -energía, minerales, recreación, comunicaciones- se mira hacia los océanos, el concreto de cemento portland parece ser el material mas apropiado para la construcción de edificaciones, plataformas, muelles, tanques, y estructuras en general.

Por otra parte, en los ambientes marinos el concreto presenta problemas de durabilidad que son bastante complejos debido a la cantidad de factores involucrados: la combinación en general de varios elementos (agua, arena, cemento, piedra, hierro) para conformar un material, la variedad de los procesos que éste sufre: ataques químicos de diversa índole, acciones físicas, la condición cíclica de algunos de estos procesos, su simultaneidad, la multiplicidad de medidas que podrían tomarse al respecto y sus distintas repercusiones.



En algunos ambientes la incorporación de aire al concreto ha mostrado resultados positivos en lo referente a la durabilidad de las estructuras, particularmente cuando éstas se hallan sometidas a ciclos de congelamiento y deshielo. En estos casos el uso de concretos con aire incorporado se ha generalizado y es recomendado por los códigos de construcción. Se cree que esta práctica reduce la permeabilidad del concreto, lo cual es para muchos investigadores autorizados la clave para conseguir la durabilidad ya que impide el ingreso de las sustancias agresivas al interior del hormigón. Sería conveniente, en este orden de ideas, conocer mejor la influencia del aire incorporado en concretos en zonas tropicales, donde los procesos son diferentes a los de los climas fríos.

Este estudio está basado en la teoría de la durabilidad del concreto desarrollada hasta hoy. Consiste en primer lugar en una revisión de la recopilación realizada por Imre Biczók, editada por primera vez en 1956, en la que presentó los hallazgos de investigadores anteriores como Bogue, Le Chatelier, Thorvaldson, Kind, Steopoe, Candlot, Michelis, Moskvín y muchos otros, cuyos trabajos son clásicos del estudio de la corrosión. Igualmente, se han recogido aportes de autores más recientes: Mather, Metha, Gjorv, Hime, Erlin..., los trabajos y opiniones de investigadores como José Gabriel Gómez y sus colaboradores en la Universidad Nacional de Bogotá y Gustavo Roca Vides en Sika Andina, algunos de los trabajos de Del Vasto y Mejía en la Universidad del Valle, así como la opinión de ingenieros y químicos, algunos de los cuales son asesores de este trabajo.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el comportamiento de probetas de concreto en un ambiente que simule, en corto tiempo, la acción agresiva del agua de mar sobre las estructuras de hormigón por medio de parámetros relacionados con la durabilidad y las condiciones de servicio, a saber: apariencia externa, cambios de volumen y peso, resistencia a la compresión, pH, absorción, penetración de cloruros.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Evaluar la influencia de la relación A/C de diseño sobre los parámetros de durabilidad y servicio seleccionados, durante seis meses de prueba.

Comparar el desempeño de concretos elaborados con diferentes contenidos de aire incluido ante las mismas condiciones de exposición al medio marino simulado .

## JUSTIFICACION

El hormigón de cemento portland es el material por excelencia utilizado en las obras civiles; pero este material, contrario a lo que pudo haberse pensado en primera instancia, no es un material inerte sino que sufre transformaciones a través del tiempo.

La corrosión del concreto, a nivel mundial, es aún un tema de investigación y de discusión y no existen ensayos normalizados que tengan una total aceptación por parte de los investigadores.

El hecho de vivir en un país con casi tres mil kilómetros de costas nos hace pensar que es de suma importancia conocer los efectos que podría tener el medio ambiente marino sobre las estructuras de concreto que en el se emplacen, lo que podría repercutir en beneficios desde el punto de vista de prevención de daños, reparaciones y finalmente seguridad y economía para los usuarios de dichas construcciones.



La ciudad de Cartagena presenta, por su condición de puerto y por poseer una zona industrial importante, un panorama particularmente crítico en lo que a la durabilidad de estructuras de concreto se refiere; y aunque hasta ahora el tema comienza a ser preocupante, principalmente por algunos casos aislados en empresas de la zona industrial, no se ha abordado su estudio de la forma que la situación lo requiere.

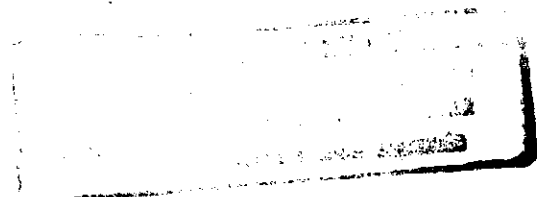
Este proyecto de grado pretende despertar el interés hacia la corrosión como una línea de investigación y ser un aporte en el conocimiento de dicho fenómeno y en la búsqueda de soluciones al mismo.

## **1. SUSTANCIAS Y AMBIENTES QUE ATACAN AL CONCRETO**

### **1.1 ASPECTOS GENERALES SOBRE CORROSION DEL CONCRETO**

En general, en los procesos de corrosión del concreto intervienen factores intrínsecos - propios de la mezcla de hormigón en sí- como también factores externos según los cuales un medio ambiente es más agresivo que otro.

Los primeros factores se refieren a las calidades de los materiales, tales como el tipo de cemento, el agua utilizada tanto en la elaboración como en el curado, el tipo y condición de los agregados, su granulometría, los aditivos empleados; la forma de elaboración del concreto: proporciones de los diferentes componentes, relación agua-cemento, dosificación de aditivos; los métodos constructivos: mezclado, colocación, compactación, acabado; los cuidados proporcionados al elemento construido: curado, protección de la superficie -quienes trabajan con concreto afirman que cualquier tratamiento que proteja su superficie externa, por ejemplo pintarlo, aún con cal, ayuda



a su conservación.<sup>1</sup> Por otra parte, tienen incidencia en el comportamiento del concreto otras condiciones inherentes a la estructura misma como su tamaño y dimensiones, la forma del elemento (en particular la relación superficie-volumen), el refuerzo y su colocación, la edad del concreto.

Los factores anteriormente descritos actúan simultáneamente con las características del medio externo en el cual el concreto vive, la combinación de ambos determina la mayor o menor durabilidad de una estructura. Generalmente sólo se tiene control sobre los primeros (excepción hecha de los diferentes condicionamientos de diversa índole que una obra de ingeniería puede tener) ya que es muy difícil, en ocasiones imposible, poco práctico o demasiado costoso modificar el ambiente a que se halla sometida una estructura. Es preciso, pues, conocer o predecir muy bien las condiciones del medio para llegar a una correcta selección de los factores internos.

Entre los factores externos Imre Biczók (1967,146) destaca:

- La composición y concentración del agua agresiva, así como la manera en la cual el fluido actúa sobre la estructura de concreto.
- El movimiento o estancamiento de las aguas subterráneas.

---

<sup>1</sup> Conversación con el ingeniero Miguel García en febrero de 1994

- La temperatura.
- La altura capilar.
- Las diferencias de presión.

El medio en que se encuentra una estructura de concreto, las sustancias agresivas presentes y sus concentraciones, la forma como éstas se renuevan y como entran en contacto con el concreto, la coincidencia en un lugar de varios de estos factores, determinan ambientes corrosivos casi que únicos en los que se llevan a cabo procesos diferentes, para cada uno de los cuales los esfuerzos encaminados a preservar el estado y funcionamiento adecuados de las estructuras han de ser igualmente particulares. Distintos investigadores coinciden en afirmar que no existen recetas universales para combatir la corrosión del hormigón y que cada caso debe ser abordado de una forma singular: “Las investigaciones han demostrado que los resultados obtenidos en el estudio de un determinado proceso de corrosión no podrían traspasarse a otro proceso, aún cuando los signos externos fuesen aparentemente iguales.” (Biczók, 1967, 149).

La corrosión del concreto es, de una naturaleza compleja y usualmente se debe a la acción simultánea de varios factores. Igualmente lo es la intensidad del proceso, lo que hace particularmente difícil la tarea de predecirla y casi que imposible, determinar

la vida útil de las estructuras. Refiriéndose a este carácter complejo de la corrosión

Imre Biczók afirma:

“La corrosión del concreto sigue un intrincado proceso en el que las propiedades del medio, tales como concentraciones de ácidos, bases o sales, están igualmente involucradas. La rata a la cual el concreto se deteriora está también gobernada por una multitud de factores... Bajo ciertas circunstancias las aguas agresivas no atacan el concreto sino que, por el contrario, lo hacen más resistente. Por ejemplo, el ácido carbónico actuando en la superficie tiende a carbonatar la capa externa de concreto y crear así una capa protectora. En presencia de dióxido de carbono agresivo de mayores concentraciones la destrucción es segura. Los efectos químicos pueden, pues, actuar en sentidos opuestos.” ( Biczók,1967,102)

En palabras de otro autor:

“El estudio de los problemas de durabilidad reviste una serie de inconvenientes que son específicos del tema. a) No existe un ensayo ‘universal’ que permita evaluar de manera certera, ni siquiera medianamente precisa, la durabilidad del material y generalmente se recurre a mediciones indirectas (absorción, permeabilidad, desgaste, porcentaje de pérdida de peso, etc) que no siempre resultan suficientes. b) Ante el relativo

desconocimiento del tema es difícil establecer límites precisos para considerar la concentración de una sustancia como peligrosa. Concurren muchos factores que pueden alterar la dinámica de las reacciones... Adicionalmente, es frecuente encontrar presencia de varias sustancias en un ambiente ... [en tales situaciones]... no es válido el principio de superposición al cual somos tan proclives los ingenieros, puesto que en muchos casos las sustancias se 'estorban' mientras en unos pocos se 'refuerzan' en el ataque al material. c) Por las mismas razones anteriormente mencionadas, es difícil (y en ocasiones aventurado) establecer modelos matemáticos que permitan intuir el comportamiento del material." (Gómez,1994,2).

Según H. Le Chatelier, H. Kühl, W. Watson, V. M. Moskvín, el deterioro del concreto sujeto a un medio agresivo puede deberse a los siguientes factores (Biczók,1967,146):

1. Lavado de la cal libre o corrosión por lixiviación.
2. Corrosión por intercambio de los compuestos solubles.
3. Corrosión por expansión o formación de cristales hidratados de yeso y sulfoaluminatos de calcio.

Se define así una clasificación general de la corrosión del hormigón en tres tipos.

La corrosión del primer tipo está gobernada por la alta rata a la cual es lixiviado el hidróxido de calcio, siendo más grave en cuanto mayor sea el poder disolvente del agua y haya renovación de la misma. Es así como las aguas muy puras son altamente perjudiciales para el concreto. Este tipo de corrosión es mas frecuente en concretos porosos y dificilmente se da en concretos densos como los elaborados con cemento de trass o puzolanas, en los que el hidróxido de calcio reacciona con los componentes de la adición formando compuestos con capacidad cementante, mucho menos solubles que la cal libre.

La corrosión del segundo tipo ocurre por una reacción de “intercambio de base” entre los componentes solubles de la piedra de cemento y la solución agresiva. De esta forma los compuestos cementantes sufren cambios en sus propiedades y se hacen fácilmente lavables o bien permanecen en la mezcla habiendo perdido su poder aglutinante. El caso típico es la corrosión por sales de magnesio. El cloruro de magnesio ( $MgCl_2$ ), por ejemplo, reacciona con el hidróxido de calcio del concreto ( $Ca(OH)_2$ ) formando cloruro de calcio ( $CaCl_2$ ) e hidróxido de magnesio ( $Mg(OH)_2$ ). Este último constituye un precipitado gelatinoso que se deposita en los poros y puede cumplir una función selladora en ciertas circunstancias, siendo en otros casos fácilmente removible por medios mecánicos como el oleaje en el caso de estructuras en el agua de mar.

La corrosión del tercer tipo es propia de los ataques de sales agresivas como los sulfatos. Los poros y vacíos del concreto son llenados por cristales que inicialmente incrementan su densidad, permitiendo observar un fortalecimiento del elemento. Sin embargo, posteriormente estos cristales tienden a expandirse dando origen a esfuerzos internos que terminan por destruir el concreto.

V.V. Kind añade a esta clasificación la corrosión ácida, en la que actúan altas concentraciones del ión hidrógeno por medio de un ácido que descompone los compuestos de calcio, y la corrosión ácido-carbónica, causada por la acción de  $\text{CO}_2$  agresivo, que es esencialmente una corrosión ácida con algunas características especiales. (Biczók, 1967,148).

Otra clasificación de la corrosión bastante acertada ha sido propuesta por Popovics y es presentada por Gómez (1994, 3).

**CLASE I :** Causada por aguas que contienen altos contenidos de ácido carbónico ó alta dureza de carbonatos. Usualmente sólo causa daños notables a concretos porosos. Puede producir eflorescencias.

**CLASE II :** Reacciones no ácidas entre los componentes cálcicos de la pasta y los componentes de líquidos agresivos. Estos procesos debilitan el hormigón y lo hacen más poroso ( corrosiones debidas a sales de magnesio, grasas, animales o azúcares).



CLASE III : Reacciones altamente expansivas.

CLASE III A : Ataque de sulfatos.

CLASE III B : Reacción Alkali-Agregado.

CLASE IV : Reacción con aguas ácidas en la que se descomponen los componentes cálcicos del cemento hidratado. La pasta es atacada.

CLASE V: Deterioros por causas físicas mas que mecánicas.

CLASE V A: Cristalización de sales por penetración de soluciones salinas y ciclos de humedecimiento y secado.

CLASE V B: Agrietamiento por congelamiento del agua de capilares superficiales.

CLASE VI: Deterioros por causas mecánicas.

CLASE VI A: Abrasión (Tráfico intenso, acción de partículas sólidas, oleaje, etc..)

CLASE VI B: Agrietamiento (Retracción de secado, expansiones térmicas, sobrecargas, restricción al movimiento, etc..)

## 1.2 CORROSION POR LIXIVIACION DEBIDA A LAS AGUAS BLANDAS

La corrosión del concreto puede deberse no sólo a las aguas que contienen sustancias químicamente agresivas. Las aguas totalmente puras, libres de sales, al entrar en contacto con el concreto tienden a lavar la cal liberada en la hidratación.

Las consecuencias de este proceso inicial son incrementos en la porosidad y permeabilidad del concreto, que lo hacen más débil y permiten que el ataque continúe al interior de la estructura.

Posteriormente, si el proceso continua, es lixiviada la cal de los compuestos cementantes (Silicatos y aluminatos) por la acción hidrolítica del agua. Estos compuestos son estables sólo en una solución de hidróxido de calcio de una cierta concentración, que se conoce como “concentración límite”, y con altos valores de pH. El silicato tricálcico no hidratado ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), por ejemplo, requiere para su estabilidad una solución que contenga 1.1g de CaO por litro, lo mismo que el silicato monocálcico hidratado. En general los concretos de cemento Portland son fuertemente atacados y sufren deterioros si el contenido de CaO determinado analíticamente es reducido por la lixiviación en mas del 20%. (Biczók, 1967,151).

Es así como la pérdida del hidróxido de calcio, al reducir el contenido de  $\text{CaO}$ , conduce a la descomposición de los otros constituyentes del concreto: hidrosilicatos, hidroaluminatos e hidroferritos cálcicos, responsables de sus propiedades cementantes.

Según Steopoe, con el lavado de la cal los productos de la hidratación de los minerales del clinker se debilitan, siendo los resultados finales de tal proceso compuestos carentes de resistencia y cualidades aglutinantes: gel de ácido silícico ó sílica gel ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), gel de hidróxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) y gel de hidróxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ). (Biczók, 1967,147).

Se ha determinado que la presencia de sales de calcio en el agua tiene un efecto retardante en los procesos de lixiviación , mientras que las sales alcalinas aumentan la solubilidad de la cal del concreto, incrementando el proceso destructivo.

La corrosión de este tipo es influenciada por los siguientes factores (Biczók, 1967,151):

1. La dureza del agua.
2. El estado de movimiento o estancamiento del agua.
3. Las diferencias de presión.

4. La temperatura del agua blanda.
5. El tipo de cemento.
6. La densidad del concreto.
7. Las condiciones de la superficie.
8. Las dimensiones y edad del concreto.

### **1.3 CORROSION DEL CONCRETO POR SUSTANCIAS AGRESIVAS**

Las sustancias potencialmente agresivas para el concreto constituyen diferentes ambientes donde éste se encuentra sometido por lo general a la acción conjunta de más de una de ellas. En general estas sustancias, para ser nocivas al concreto, requieren encontrarse en forma de vapor, fluido o solución y principalmente en condiciones de ionización (Biczók, 1967, 161).

Son agresivos para el concreto los ácidos, bases y sales, en mayor o menor grado. Este estudio se limita a aquellos que pueden estar presentes en el ambiente marino, excluyendo otros que en diferentes circunstancias ocasionan graves daños al concreto tales como los compuestos de amonio y los ácidos orgánicos e inorgánicos que pueden llegar a tener efectos altamente destructivos en el hormigón (Gómez destaca la

agresividad del ácido acético, que es mayor incluso que la del ácido sulfúrico (1994, 50), así como otros procesos reconocidos como nocivos para el concreto como la reacción alkali-sílica.

**1.3.1 El efecto agresivo del ion sulfato** Quizás los agentes agresivos para el concreto más estudiados sean los sulfatos. Presentes en el agua de mar, en casi todos los suelos aluviales y arcillosos donde se hallan piritas, limolitas y yeso, en las aguas subterráneas, productos de la descomposición biológica de sustancias orgánicas o resultados de las actividades humanas en aguas de desecho doméstico o como residuos industriales, los sulfatos entran en contacto muy a menudo con las estructuras de hormigón ya se trate de cimentaciones, muelles, conducciones de agua, estructuras hidráulicas, plantas industriales o edificaciones situadas en ciertos ambientes particularmente agresivos.

De acuerdo con Biczók los sulfatos más peligrosos para el concreto son el sulfato amónico, el cálcico, magnésico y sódico. Son menos peligrosos el sulfato potásico, el cúprico y el aluminico, mientras que los sulfatos de plomo y bórico, insolubles en agua, son inofensivos para el concreto. (1967,163).

Las aguas con sulfatos son particularmente agresivas; su contacto con la piedra de hormigón puede conducir a corrosión de los tres tipos mencionados anteriormente, en la sección 1.1. En primer lugar, debido a la alta capacidad humectante de dichas aguas

y a que incrementan la solubilidad de los productos hidratados del cemento, que son muy inestables al interior de una solución sulfatada, se verifica una corrosión del primer tipo (lixiviación). Por otra parte, la presencia de sulfatos puede llevar a una reacción de intercambio en la que el catión acompañante del sulfato sea reemplazado por un ión  $\text{Ca}^{+2}$ , iniciándose una corrosión del segundo tipo. Con frecuencia, al reaccionar el sulfato con algunos componentes del concreto, en especial los aluminatos y la cal, se forman compuestos que cristalizan absorbiendo agua y aumentando su volumen, generando así una corrosión por expansión (tercer tipo).

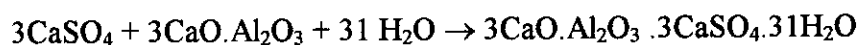
**1.3.1.1 Efectos de los sulfatos sobre los silicatos cálcicos** Según Shelton la alita ( $\text{C}_3\text{S}$ ) es atacada por el sulfato en mayor grado que la belita ( $\text{C}_2\text{S}$ ). (Biczók, 1967,173). Este hecho puede deberse a que la alita al hidratarse produce una mayor cantidad de hidróxido de calcio, que es el componente del concreto mas susceptible de ser atacado no sólo por el sulfato sino por muchas otras sustancias agresivas (magnesio, carbonatos).

Bogue encontró que con altos contenidos de aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), el  $\text{C}_3\text{S}$  (alita o silicato tricálcico) resulta benéfico ya que favorece la obtención de resistencias tempranas del concreto, mientras que Thorvaldson verificó que estos compuestos son atacados por los sulfatos pero de una manera bastante compleja. (Biczók, 1967, 173).

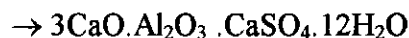
En el caso de la corrosión por sulfatos la atención debe ser puesta más que en los silicatos, en la cal libre resultante de la hidratación ya que de la reacción de ésta con los sulfatos presentes en el agua se forma yeso, el cual cristaliza tras la absorción de agua. Este proceso va acompañado de aumentos de volumen, que Bogue determinó en un 17.7%. En presencia de magnesio el hidróxido resultante puede llevar a expansiones de alrededor del 19.6%. (Biczók, 1967, 173).

**1.3.1.2 Efectos de los sulfatos sobre los aluminatos cálcicos** El contenido de aluminato tricálcico está relacionado directamente con la corrosión del concreto debida al ataque de sulfatos. Su participación en el proceso corrosivo es de primera importancia.

El aluminato reacciona con el yeso presente en las aguas sulfatadas o formado por la reacción de los sulfatos con el hidróxido de calcio (cal libre), formando un sulfoaluminato hidratado de naturaleza compleja, insoluble en el agua, que cristaliza absorbiendo 31 moléculas de agua y dando origen a grandes cambios de volumen y altas presiones internas en la matriz de concreto. Este compuesto se conoce como sal de Michaelis-Candlot-Deval o “ettringita”. Según E. Candlot (Biczók, 1967, 174) el proceso químico correspondiente puede describirse así:



o en presencia de yeso, según Bogue y Lerch, para un pH diferente:



El producto de la reacción es el trisulfoaluminato tricálcico hidratado (trisulfato), que sólo se forma, según Candlot, para ciertos valores de pH; o en el segundo caso, el sulfoaluminato tricálcico hidratado (monosulfato).

El trisulfato forma cristales aciculares que se expanden hasta en un 227% del volumen original. Estos cristales, por su forma de agujas y su acción perjudicial para el concreto son conocidos como “bacilos del cemento.” (Biczók, 1967, 174).

**1.3.1.3 Efectos de los sulfatos sobre el ferrito aluminato tetracálcico** De acuerdo a experimentos llevados a cabo por Bogue, Lerch y Thorvaldson (Biczók, 1967, 175 ) estos componentes son menos reactivos que el aluminato tricálcico ante los sulfatos, aunque también pueden sufrir expansiones, si bien en menor grado.

El ferroaluminato tetracálcico o brownmillerita ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) es menos vulnerable que el  $\text{C}_3\text{A}$  a los sulfatos. El Cemento Ferrari, altamente resistente al ataque de sulfatos, fundamenta su excelente comportamiento ante estos ambientes en un bajo contenido de cal libre, un mayor contenido de silicatos bicálcicos que de alita y principalmente en que el aluminato tricálcico está presente en menos del 1%. La casi totalidad del



aluminio, necesario para la síntesis de los minerales silíceos del clinker y para la manejabilidad y fraguado temprano del concreto, se encuentra en estos cementos en forma de ferroaluminato tetracálcico.

Los efectos de los sulfatos son especialmente dañinos cuando el cemento utilizado es rico en  $C_3A$  pero podrían evitarse si el aluminato se hidratara completamente y el sulfoaluminato se formara durante el fraguado, antes que el concreto alcanzara su rigidez. De esta manera las expansiones no producirían deterioro. Esto se puede conseguir mediante una apropiada adición de yeso al cemento. Por otra parte se sabe que el cloruro de sodio hace mas soluble el  $C_3A$ , por lo que reduce los peligros de formación de ettringita, o sus eventuales reacciones expansivas, aún cuando ésta se presente. Esta constatación es de suma importancia cuando se trata de concretos sometidos a ambientes marinos.

Los reemplazos de cemento por adiciones reducen el contenido de  $C_3A$  y de cal libre en la mezcla, lo que hace esperar un mejor comportamiento ante los sulfatos, dependiendo, de otros factores como la composición misma de la adición. A este respecto, Gómez afirma a partir de estudios de Metha que “Se ha encontrado que el principal factor que hace que una ceniza volante aumente o disminuya la resistencia del cemento al ataque de sulfatos es su contenido de óxido de calcio y la composición del aluminato de calcio en la fase amorfa de la ceniza” (Gómez, 1994, 8 ).

En realidad deben darse ciertas circunstancias para que una corrosión por sulfatos se lleve a cabo, por ejemplo un contenido mínimo que guarde relación con las condiciones que rodean la estructura. Grün en 1937 ( Biczók, 1967, 186 ) determinó este valor entre 500 y 600 mg/lit de  $\text{SO}_3^-$ . Otros investigadores designan un mínimo de 300 mg/lit de  $\text{SO}_3^-$  para que un agua sulfatada produzca daños al concreto. Gómez afirma:

“El sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4$ ) es considerado una de las sustancias más agresivas para el concreto, por la acción simultánea del magnesio y el sulfato. Para concentraciones menores de 4000 mg/lit la agresión principal es la del sulfato, para concentraciones entre 4000 y 7500 mg/lit el ataque es debido principalmente al magnesio. La agresión por acción del magnesio es más rápida que la producida por el sulfoaluminato”. ( Gómez, 1994, 7 ).

El proceso se aprecia de manera gráfica en la figura siguiente.

**1.3.2 Ataques por magnesio** El magnesio está presente en las aguas que entran en contacto con el concreto en las formas de  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$  y  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ , provenientes de las rocas dolomíticas, de algunos minerales del tipo de los silicatos de magnesio, de la descomposición de residuos vegetales. En el agua de mar se hallan en proporciones menores (1.3 mg/lit) en la forma de sulfatos y cloruros.

Todas las sales de magnesio (salvo los hidrocarbonatos) son destructivos para el concreto, y mas agresivos que, por ejemplo, los sulfatos de calcio y sodio ya que no sólo reaccionan con el hidróxido de calcio sino que atacan los otros minerales de calcio produciendo corrosión por reacción de intercambio (corrosión del segundo tipo).

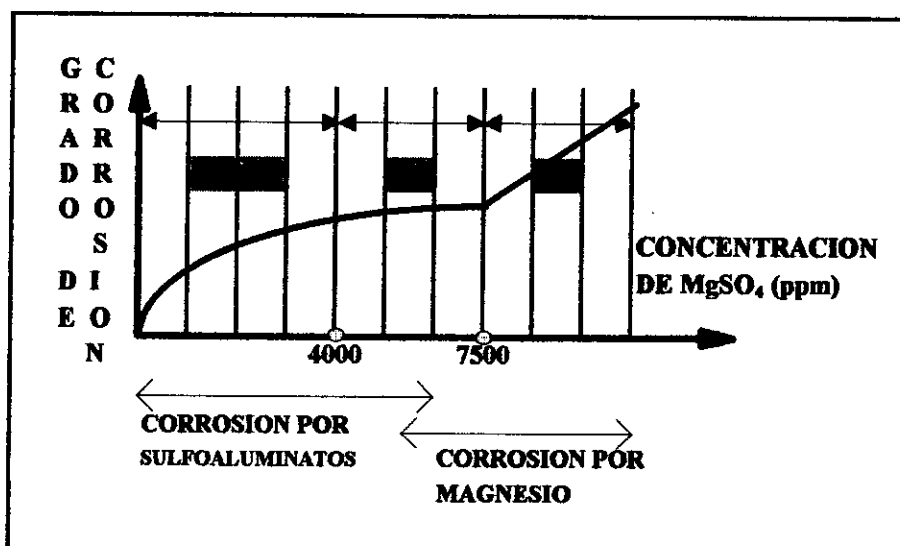
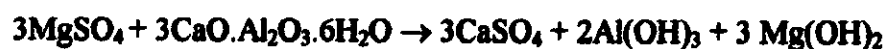


Figura 1. Tomada de Biczók, 1967, 173

El magnesio desplaza el calcio en el conglomerante, de acuerdo con V. V. Kind (Biczók, 1967, 221):



El yeso ( $\text{CaSO}_4$ ), producto de la reacción, puede conducir a corrosión por expansión.

El magnesio en pequeñas proporciones y si no alcanza a profundizar en el hormigón, cumple una función protectora ya que el hidróxido de magnesio o brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ) es insoluble en el agua e impide la difusión de otras sustancias agresivas obstaculizando el desarrollo de la corrosión.

Al presentarse la corrosión por cambio de base (segundo tipo) y ser retirado el calcio de los componentes del concreto, éstos pierden sus características conglomerantes y de resistencia. Este tipo de corrosión afecta en mayor grado a cementos de trass o puzolánicos que a cementos portland normales ya que en los últimos el magnesio reacciona primero con el hidróxido que con los silicatos cálcicos, formando además un residuo insoluble en el agua (brucita) que se constituye en un sellante, de cuya acción protectora carecen los concretos elaborados con las adiciones mencionadas en razón de sus menores contenidos de cal libre disponible para reaccionar con el magnesio. En éstos concretos, al reaccionar el magnesio con la poca cal libre residual, la alcalinidad puede descender peligrosamente, provocando la inestabilidad de los compuestos cementantes mas importantes: hidrosilicatos e hidroaluminatos de calcio.

El sulfato de magnesio tiene efectos destructivos para concretos elaborados con cementos Portland, así como para concretos con adiciones de trass o puzolanas. El cloruro de magnesio, por su parte, causa efectos nocivos sobre el acero de refuerzo.

**1.3.3 Efectos del cloro** Los cloruros se hallan principalmente en el agua de mar; su presencia en los suelos es escasa.

Algunos cloruros tales como  $MgCl_2$  y  $AlCl_3$  reaccionan con la cal formando compuestos solubles en agua, resultando nocivos para el concreto. Los cloruros de metales alcalinotérreos,  $NaCl$  y  $KCl$ , no reaccionan con la cal aunque favorecen su lixiviación, al hacerla mas solubles.

En general los cloruros favorecen la resistencia del concreto ante los sulfatos, de acuerdo al catión acompañante: ya sea por el incremento de la solubilidad del sulfoaluminato tricálcico hidratado, como en el caso de los cloruros de calcio y sodio, o porque reaccionan con los aluminatos formando sales bastante solubles (cloroaluminatos).

Según Kind el incremento de la resistencia del cemento Portland ante los sulfatos por causa de los cloruros se debe a tres factores ( Biczók, 1967, 131 ):

1. Incremento en la solubilidad de los sulfoaluminatos de calcio, en presencia de  $NaCl$ .
2. Reducción de la concentración del  $Ca(OH)_2$ . Cuando se presenta  $MgCl_2$ , acompañado por pequeñas cantidades de  $CaCl_2$ .

3. Transformación de los aluminatos hidratados en cloroaluminatos. En presencia de  $\text{CaCl}_2$  con  $\text{MgCl}_2$  en pequeñas cantidades.

Tal interacción de cloruros y sulfatos hace complejos los procesos corrosivos en los ambientes marinos, donde ambas sales están presentes.

El cloruro de sodio incrementa de igual manera la solubilidad de los restantes componentes del concreto, la del  $\text{Ca(OH)}_2$ , por ejemplo, en un 40 %, actuando en menor grado sobre las superficies carbonatadas.

La presencia de cloruros, por otra parte, constituye un peligro para la estabilidad del refuerzo del concreto.

**1.3.4. Carbonatación.** El proceso de carbonatación es uno de los mecanismos de deterioro mas frecuentes en el concreto expuesto al aire libre o al agua de mar. Se debe a la acción del dióxido de carbono presente en la atmósfera o de su disolución en agua (ácido carbónico). La corrosión por ácido carbónico es un caso particular de la corrosión por ácidos con ciertas características que lo distinguen.

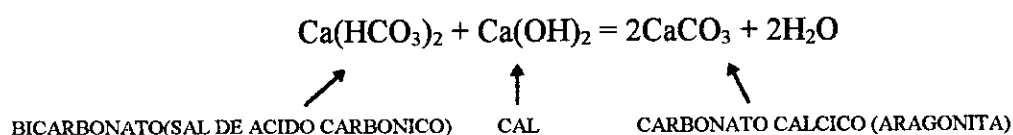
Los ácidos disuelven con facilidad la capa de carbonatos del concreto permitiendo la lixiviación de la cal desde el interior, siendo de esta forma mas agresivos que las aguas blandas. Generalmente forman, con la cal del concreto ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), sales solubles en

el agua que luego son lavadas, a excepción de los ácidos oxálico, fosfórico e hidrofluorsilícico, que forman sales insolubles que además no presentan aumento de volumen. El resultado final de la acción de los ácidos es gel de ácido silícico (sílica gel) así como las sales cálcicas y aluminicas correspondientes (en caso de que ataquen a los aluminatos). La intensidad de la acción de los ácidos está gobernada por el carácter del anión constituyente, la concentración de iones de hidrógeno y la solubilidad de la sal de calcio formada. En tal sentido, el ácido mas agresivo para el concreto, según Biczók, es el ácido sulfúrico (que suma los efectos del sulfato a los del hidrógeno), el ácido clorhídrico, nítrico, sulfuroso, el carbonato, que forman sales solubles:  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{HS})_2$ ,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Los ácidos fuertes actúan sobre los aluminatos hidratados formando sales solubles, los ácidos medios forman con éstos sales insolubles que permanecen en el hormigón, mientras que los ácidos débiles no reaccionan. Los ácidos orgánicos también atacan al concreto y en ocasiones sus efectos son bastante destructivos como se ha mencionado. (Ver sección. 1.3.).

Las aguas con ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) constituyen las aguas ácidas naturales que atacan al concreto. Según Biczók (Gómez, 1994, 10) el contenido de estas aguas oscila entre 15 y 40 mg de  $\text{CO}_2$  por litro, pero pueden hallarse concentraciones hasta de 150 mg/lit. De esta cantidad sólo una mínima parte (aproximadamente el 1%) está en forma de ácido carbónico agresivo, el resto permanece en forma de  $\text{CO}_2$  gaseoso disuelto.

De acuerdo con I. Biczók (1967, 287), quien recoge los trabajos de Papp, el efecto agresivo de esta sustancia se debe a la disolución del catión del agente cementante del concreto ( $\text{Ca}^{++}$ ) y se caracteriza porque sólo forma sales con la cal y no con la alúmina -efecto propio de los ácidos débiles-. Las aguas con ácido carbónico son agresivas cuando se presentan con pH menor de 7 y la presencia de ácido carbónico agresivo.

Mediante el proceso de carbonatación, el hidróxido de calcio reacciona con el  $\text{CO}_2$  que alcanza al concreto ya sea a través de la atmósfera o disuelto en agua, resultando carbonato cálcico y agua:

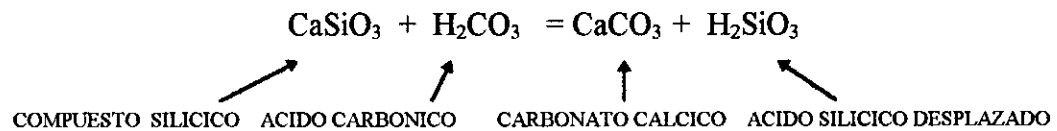


Las consecuencias de este proceso son múltiples y variadas, presentando efectos de índole tanto favorable como desfavorable para la estabilidad del hormigón y los elementos que lo acompañan, en especial el acero.

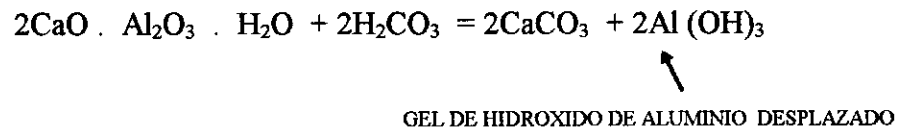
Por un lado, al reaccionar con la cal libre, el ácido carbónico reduce el pH del concreto. Si esta reacción alcanza otros minerales hidratados del cemento la estructura sufre un debilitamiento y puede presentarse su colapso. Biczók (1967, 290) cita las afirmaciones de Papp quien por su parte, basado en el principio básico de la química según el cual los ácidos débiles son desplazados de sus combinaciones por



ácidos más fuertes, afirma que la acción del  $\text{CO}_2$  afecta los silicatos y aluminatos cálcicos hidratados del concreto. En este caso el ácido silícico es desplazado de los minerales hidratados del concreto:



o bien :



De esta manera el ácido carbónico puede llevar al concreto a pérdidas importantes de  $\text{CaO}$ . A este respecto agrega Gómez (1994, 13) que prácticamente todos los constituyentes hidratados del cemento (en esto, al igual que Papp, incluye los aluminatos) pueden sufrir carbonatación.

Según Steopoe (Biczók, 1967, 290) el ácido carbónico comienza por disolver el hidróxido de calcio para luego atacar los silicatos cálcicos hidratados, dejando finalmente sólo el ácido silícico insoluble (sílica gel). Al perder cal, la estructura se afloja llegando a destruirse cuando esta pérdida alcanza niveles de 25 a 30 % de su contenido de  $\text{CaO}$ .

La carbonatación, por otra parte, reduce la permeabilidad del hormigón al ser el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) alrededor de cien veces menos soluble que la cal libre ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Este hecho ha sido incluso utilizado en ciertos casos como una medida protectora que Biczók llama “carbonatación artificial”. Afirma este autor que, por ejemplo, un tipo de cemento de Hungría (Tata C600) puede de esta forma convertirse en resistente a los sulfatos, al incrementarse su densidad entre 1 y 4 % y su resistencia entre 50 y 100 %, gracias a la carbonatación artificial. (Biczók, 1967, 429).

Advierte Biczók que la carbonatación acelerada o artificial es perjudicial para el concreto fresco y sólo debe llevarse a cabo varios días después de de la fabricación del mismo. Refiriéndose a los efectos deseables de la carbonatación, señala que el  $\text{CaO}$  es disuelto de la piedra de cemento por el agua en menor cantidad como carbonato que como hidróxido (Biczók, 1967, 291):

Disolución del Calcio	En forma de:	
	$\text{CaCO}_3$ (mg/l)	$\text{Ca(OH)}_2$ (mg/l)
A partir de concretos de cemento Portland		
No carbonatado.....	65.0 .....	517.9
Carbonatado.....	7.4 .....	69.5

**Tabla 1. Tomada de Biczók, 1967, 291.**

El carbonato de calcio sella los poros del concreto permitiendo una ganancia inicial de resistencia.

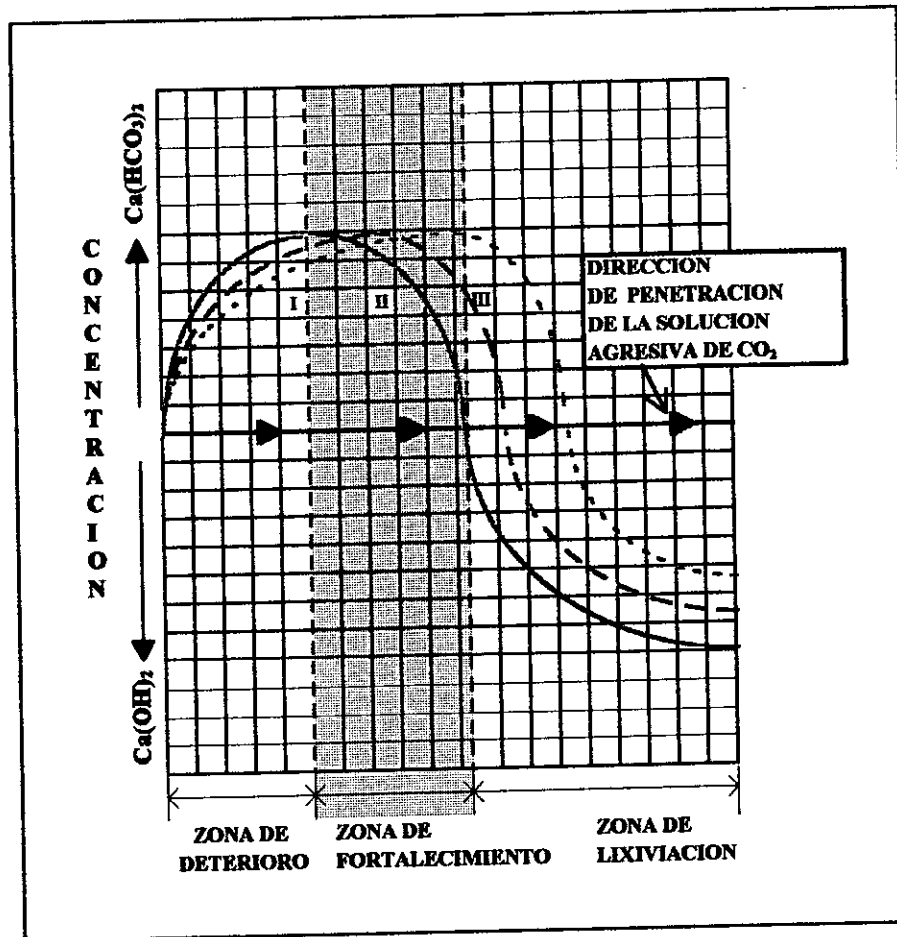
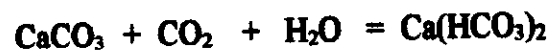


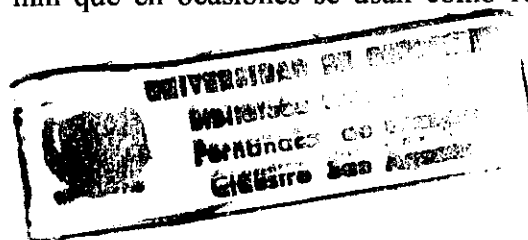
Figura 2. Tomada de Biczók, 1967, 285

Este efecto, sin embargo, es sólo temporal en la medida en que nuevas cantidades de  $\text{CO}_2$  alcancen al concreto conduciendo a nuevas reacciones (Biczók, 1967, 289):



En este caso, reacciones adicionales con el gas carbónico convierten el carbonato en bicarbonato, que es soluble en agua y por lo tanto fácilmente lavable. Estas reacciones conducen a un proceso de deterioro del hormigón hacia el interior del elemento (ver figura 2), según Moskvín y Biczók (1967, 285-287), en el cual el agua con altos contenidos de  $\text{CO}_2$  encuentra una superficie carbonatada y se satura de bicarbonato de calcio que luego es lavado quedando sólo los residuos no cementantes de los minerales hidratados del clinker. A esta primera zona se le llama "zona de deterioro". El bicarbonato reacciona a su vez con nuevas cantidades de cal formando carbonatos de calcio poco solubles en una región que registra incrementos en su densidad: "zona de compactación". Mas allá de esta segunda zona el agua pura (Libre de ácido carbónico) que se interna en el concreto disuelve sus componentes y genera ocasionalmente eflorescencias (Corrosión por lixiviación). Las zonas descritas van progresando gradualmente hacia el interior del concreto y los residuos de los procesos pueden llegar a aparecer por la cara opuesta al ataque por ácido carbónico.

Gómez, afirma que la velocidad de avance de la carbonatación depende de factores como la cantidad de  $\text{CO}_2$  disponible, la humedad relativa del medio (La carbonatación se da a mayores tasas entre un 50 y 75%, disminuyendo para contenidos mayores y menores de humedad), el tipo de cemento, las características de la mezcla y la permeabilidad. Anota además, que su avance se da de acuerdo a una ley logarítmica según la cual para los hormigones usuales en nuestro medio bastarían 10 años para que este proceso alcance los 25 mm que en ocasiones se usan como recubrimiento del



acero. Esto es particularmente peligroso en cuanto a la estabilidad del refuerzo ya que como se ha dicho la carbonatación reduce el pH del concreto, lo que favorece su corrosión. (Gómez, 1994, 14).

## 2. CORROSION POR AGUA DE MAR

### 2.1 GENERALIDADES

En el ambiente marino se verifica una cantidad de procesos sobre el concreto debido a la presencia simultánea de agentes químicos como cloruros y sulfatos, álcalis, magnesio, dióxido de carbono tomado de la atmósfera, con otros de naturaleza física.

El agua de mar está compuesta por alrededor de un 88 a 89.5 % de cloruros y un 8 a 10 % de sulfatos. Sin embargo, la acción conjunta de estos factores es compleja y en alto grado contradictoria: "La multitud de soluciones de sal en el agua de mar es menos dañina de lo que podría esperarse a partir de la cantidad de iones agresivos presentes." (Biczók, 1967, 353).

En primer lugar, la concentración de sulfatos (3.7 g/lit, el 10 % del total de sales), podría ser suficiente para propiciar corrosión por expansiones; pero ésta en presencia de cloruros se presenta a tasas mucho menores de lo que lo haría si el sulfato actuara

S C I B  
00031921

aisladamente. Kind, Yung y Moskvín (Biczók, 1967, 355) demostraron que la propensión a que se formen cristales de sulfoaluminato de calcio hidratados (ettringita) se ve reducida en presencia de cloruro de sodio. Yung, por otra parte, propuso que la formación de sulfoaluminatos en presencia de sales de magnesio se veía impedida por el hecho de que el sulfato de magnesio disuelve el aluminato tricálcico. Adicionalmente se sabe, que los cristales de sulfoaluminato son destruidos rápidamente en soluciones de sales de magnesio. Estas circunstancias que efectivamente se presentan en el agua de mar tienden a retardar los procesos de corrosión.

Por otro lado el cloruro de sodio incrementa la solubilidad de los hidróxidos de calcio y magnesio por lo que podrían esperarse altas tasas de corrosión por lixiviación (corrosión del primer tipo). El poder disolvente del cloruro de sodio afecta también al yeso de manera que impide su posible cristalización. En realidad el peligro que acarrea la penetración de cloruros al interior del concreto, consiste en que éstos favorecen la corrosión del refuerzo metálico. Está claro, pues, que la acción de los diferentes elementos presentes en el ambiente marino no es igual a la de cada uno de ellos por separado, ni mucho menos a la suma de sus efectos potenciales, como anotaba Gómez ( ver sección 1.1.).

Las sales de magnesio (aproximadamente 1.3 g/lit) crean condiciones favorables para corrosión por intercambio de base. Sin embargo, su peligro puede atenuarse en ciertas

condiciones ya que, según I. Biczók (1967, 355), se encuentra en tan pocas cantidades que sólo ataca a la cal, alcanzando a precipitar en forma de  $Mg(OH)_2$  insoluble. Esta posición ha sido reevaluada, e investigadores mas recientes como Metha (1980, 8) reconocen al magnesio un poder destructivo de primera importancia dentro de los procesos que tienen lugar en el ambiente marino.

Por otra parte, de acuerdo con Biczók (1967, 354), la corrosión por lixiviación no se desarrolla a menos que la estructura sea expuesta a diferencias de presión y a filtraciones.

La condición del agua de mar de estar en movimiento permanente tiende a incrementar los procesos de deterioro por cuanto las partes debilitadas del concreto son fácilmente removidas exponiendo el interior del concreto a la acción directa del agua agresiva. Así mismo la temperatura afecta la durabilidad del concreto en aguas marinas, siendo la resistencia a los ciclos de congelamiento el factor que gobierna la durabilidad del hormigón en algunas regiones. De este modo se conjugan aquí factores mecánicos y físicos con procesos químicos para crear un marco bastante complejo.

## **2.2 SULFATOS EN EL AGUA DE MAR**

La corrosión por sulfatos es de las mas dramáticas que se presentan en el concreto. Esto llevó en un momento a centrar la atención en los posibles deterioros que estas



sustancias podían ocasionar al concreto en el agua de mar, aunque su poder destructivo, al menos en lo que se refiere a los procesos expansivos es menor en este tipo de ambientes. Brian Mather en 1982 (Mather, 1982, 30) mantenía un enfoque dirigido hacia el peligro de los sulfatos, aunque anotaba que, por hallarse éstos en forma de sulfatos de magnesio en su mayoría y no como sulfatos de calcio o sodio - mas frecuentes en otros ambientes-, las reacciones químicas con los componentes de la pasta hidratada de cemento eran de algún modo, diferentes.

Aunque no haya total claridad al respecto y aún se presente confusión en la literatura los trabajos de muchos investigadores Regourd, Metha y Haines, Fluss y Gorman (Metha, 1980, 9) corroboran lo afirmado antes por Kind, Yung y Mosvin: se ha encontrado un excelente comportamiento a altas edades de concretos con bajas relaciones agua-cemento, aún con altos contenidos de  $C_3A$  (12 - 17 %) y raras veces ha podido demostrarse que la ettringita haya sido la causa de deterioros en estructuras de concretos expuestas al agua de mar; ésto debido a que la presencia de cloruros inhibe los fenómenos expansivos asociados con el trisulfoaluminato.

Metha (1980, 9) hace referencia a los trabajos de Lea y Bata, según los cuales las reacciones relacionadas con la formación de ettringita y yeso no están acompañadas en el agua de mar de expansiones del mismo grado que las que se presentan en soluciones puras de sulfatos de sodio o aún de magnesio ya que ambos, ettringita y yeso, son mas solubles cuando el cloro está presente en la solución.

Por su parte Gómez afirma que: “ Se ha encontrado que en presencia de cloruros de Na y Mg el sulfoaluminato de calcio se forma en cantidades menores y en forma de cristales más débiles, la acción favorable se debe al ión cloro”. (Gómez, 1994, 9)

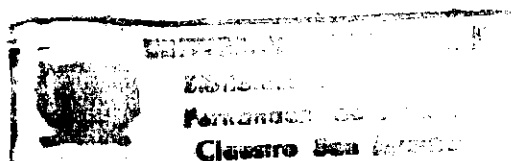
### **2.3 EL MAGNESIO Y EL DIÓXIDO DE CARBONO EN EL AGUA DE MAR**

En concordancia con Metha (1980, 12) el magnesio es el agente cuya presencia en el agua de mar la hace más agresiva para los compuestos hidratados del concreto. Este tiende a retirar el calcio de la cal y, eventualmente, de los silicatos y aluminatos hidratados.

Se cree que si bien el cloro presente en el agua de mar es un factor de primera importancia en cuanto a corrosión del acero de refuerzo, es el magnesio -hallándose en menor proporción - el elemento que ocasiona los mayores daños en los componentes hidratados del cemento, dentro del agua de mar. Los procesos que se verifican en los ataques del magnesio al concreto han sido tratados en la sección 1.3.2.

Como resultado de la reacción entre la cal libre y las sales de magnesio se obtiene hidróxido de magnesio. Este compuesto, como se ha dicho, es relativamente insoluble y dadas ciertas condiciones conforma una película que impermeabiliza el concreto:

“Afortunadamente, para concretos de alta calidad la penetración de los iones de magnesio está normalmente confinada a una zona externa delgada cercana



a la superficie de concreto, ya que debido a la formación de un precipitado denso de  $\text{Mg(OH)}_2$  en la superficie, la permeabilidad del concreto es reducida considerablemente. De acuerdo a Gjorv y Vennesland, en tales casos los iones de magnesio en el agua de mar no ejercen efectos significativos en la reducción de la alcalinidad en concretos de alta calidad". (Metha, 1980, 12).

En cuanto al ataque del gas carbónico disuelto se pueden hacer observaciones similares: El  $\text{CO}_2$  ocasiona reducción en el pH del concreto, que pone en peligro además la estabilidad del acero de refuerzo, sin embargo no es frecuente que la carbonatación alcance profundidades importantes en concretos de buena calidad. Al igual que ocurre con el magnesio, sus efectos son controlables si se proporciona al refuerzo un apropiado espesor de recubrimiento.

La zona en que se presente el ataque determina la permanencia o no de los efectos secundarios favorables que se han mencionado. (ver sección 2.5).

## **2.4 EL HIDRÓXIDO DE CALCIO**

Metha afirma al respecto de los compuestos hidratados del cemento Portland: "La primera lección proveniente de los casos históricos de daños del concreto en el agua de mar es que los concretos de cementos Portland invariablemente contienen el

germen de un potencial deterioro.” (Metha, 1980, 7). En especial se refiere al hidróxido de calcio, que por su naturaleza básica es susceptible de sufrir cambios químicos al entrar en contacto con ciertos componentes del agua de mar, particularmente el cloruro y sulfato de magnesio y el dióxido de carbono ( $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{MgSO}_4$  y  $\text{CO}_2$ ). Pues bien, las pastas de cemento Portland puro contienen alrededor de un 24% en peso de hidróxido de calcio.

Por otra parte, los productos de las reacciones del hidróxido cálcico son en general solubles en el agua de mar o, en caso contrario, susceptibles de ser retirados por otros medios, por ejemplo el oleaje. Estos hechos conducen a una gradual remoción del hidróxido de la pasta, lo que ocasiona debilitamiento del material a la vez que se incrementa la permeabilidad del concreto, facilitando así el ingreso de nuevas sustancias agresivas, y consecuentemente la ocurrencia de nuevos y mayores procesos de corrosión.

El papel que juega la cal es aún mas complicado: El hidróxido de calcio es el principal responsable de la alta alcalinidad del concreto (pH entre 12.5 y 13.5) que permite la estabilidad de los silicatos y aluminatos hidratados, y sobre todo protege de la corrosión al acero de refuerzo, proporcionándole un medio en el que se encuentra en estado pasivado.

Gjorv y Vennesland (1976, 1), en concordancia con otros investigadores, afirman que para una buena protección del refuerzo el pH del concreto no debe bajar de 11.5 y que, así mismo, a medida que aumenta el pH el concreto puede tolerar mayores cantidades de ión cloruro sin que el acero sea afectado. En este sentido, estos autores recomiendan mantener una “reserva de basicidad” en el concreto. El mismo P. K. Metha -partidario del uso de puzzolanas- reconoce la importancia de tal “reserva” proporcionada por la cal libre para la estabilidad del refuerzo (1980, 9); pero insiste en que, siendo la permeabilidad -según sus apreciaciones- la característica más importante para la protección tanto del acero como del concreto, es deseable sacrificar un poco del potencial de basicidad (consistente en cal libre) con miras a lograr un concreto mas impermeable a través de adiciones, por ejemplo, siempre y cuando no se afecte drásticamente la alcalinidad del concreto: “simples cálculos muestran que una adición del 15%, en peso de cemento, de una puzolana de buena calidad a una mezcla de cemento Portland podrá remover sólo la mitad de la cal libre potencial de la pasta.” (Metha, 1980, 9)

Aunque remover la mitad de la cal libre no parece ser tan inocuo, la medida es efectiva en la medida en que se reduce notablemente la posibilidad de ingreso de sustancias agresivas al concreto. En cualquier caso el hidróxido de calcio resultaría fácilmente atacable y podría ser removido del hormigón de no ser, éste, lo suficientemente impermeable. Una reserva de basicidad por si sola, en el mejor de los casos, no haría mas que retardar la corrosión del refuerzo. Las adiciones puzolánicas, por su parte,

permiten la elaboración de mezclas mas densas y menos permeables. Durning y Hicks (1991, 42) comprobaron el excelente comportamiento de adiciones de microsilica ante los ácidos sulfúrico, acético, fórmico y fosfórico. ( Ver sección 2.7.).

Metha (1980, 9) cita los trabajos de Regourd en los que señala que los cementos que contienen silicatos en la forma de belita, en mayor proporción, son más resistentes al agua de mar que aquellos que poseen mayores cantidades de alita ya que la hidratación de aquella libera cal en menor cantidad y anota: “En general los cementos puzolánicos y de escoria que contienen menos cal libre, producto de la hidratación, que los cementos Portland puros mostraron mejor resistencia al agua de mar.” ( Metha, 1980, 4).

El hidróxido de calcio es también altamente vulnerable a la acción del ácido carbónico con el cual forma carbonato cálcico insoluble y agua, por lo que el pH del concreto se reduce notablemente. El agua de mar, por su parte, tiene un pH de 8, pero en condiciones de alta carbonatación alcanza un pH de 7 ó inclusive menor. Normalmente tales contenidos de CO<sub>2</sub> disuelto no se presentan en el agua de mar; sin embargo se han reportado casos de rompeolas totalmente sumergidos hasta 12 metros que presentaron luego de 5 años un estado de alto deterioro y para los cuales se determinó, por análisis químico, una pérdida considerable de cal libre y altos contenidos de MgO y CO<sub>2</sub>. Otro investigador, Feld, reportó casos graves de daños de

pilotes en Virginia y New Jersey, luego de 21 y 25 años, debidos a concentraciones anormalmente altas de  $\text{CO}_2$  en el agua de mar. (Metha, 1980, 3 - 5).

Brian Mather anota que la carbonatación decrece con la disminución de la relación superficie/masa (1982, 30). Esto es común en todos los procesos corrosivos que proceden desde la superficie del hormigón hacia su interior y es por eso que en estructuras masivas los daños no son tan apreciables como en miembros esbeltos.

## **2.5. ZONAS DE ATAQUE**

“Otra lección tomada de los casos históricos de daños del concreto en agua de mar es que, dependiendo de las líneas de marea, los procesos individuales de deterioro tienden a limitarse a sí mismos a diferentes partes de una estructura.” ( Metha,1980, 10 ). En consecuencia los daños a estructuras sometidas al ambiente marino pueden dividirse de acuerdo a zonas de ataque tanto en sentido vertical, (de acuerdo con los límites definidos por la marea) , como también en sentido horizontal, hacia el interior del elemento.

Las normas norteamericanas (ACI), europeas y asiáticas (FIP) dividen, en efecto, el concreto sometido al ataque del agua de mar en tres zonas: Zona sumergida, Zona de salpicaduras y Zona atmosférica (Metha, 1988, 6), ya que la severidad y el tipo de ataque son diferentes en cada una de ellas. En todas, sin embargo, es de suma

importancia la permeabilidad de la mezcla ya que ésta afecta tanto la resistencia a los ataques físicos como químicos. (ver figura 3).

En atmósferas cercanas al agua de mar el aire contiene altos contenidos de sal y ataca al concreto. La agresividad de estos ambientes guarda estrecha relación con la humedad del medio según se ha observado en las zonas templadas del planeta donde la corrosión es más pronunciada en otoño e invierno, cuando el aire es más húmedo y está más saturado de sales. Fernández Cánovas define como ambiente marino la zona que se extiende hasta cinco kilómetros en tierra firme. (Vargas y Horrillo, 1989, 3).

La importancia de los factores físicos se evidencia en el hecho de que la corrosión en estructuras se da de manera más severa por encima de las fluctuaciones de marea, ya que el agua del mar asciende en el interior del elemento por la acción de las fuerzas capilares. Igualmente se producen en esta zona ciclos de humedecimiento y secado al variar el nivel del mar, favoreciendo la cristalización de sales que generan esfuerzos expansivos al interior del hormigón. Las partes constantemente sumergidas de las estructuras marítimas de concreto raras veces presentan signos de este tipo de corrosión.

La parte superior de las estructuras, que permanece por encima del nivel de la marea alta, no está expuesta directamente al agua de mar; lo está, sin embargo, al aire atmosférico, a vientos que transportan sales y a fenómenos de congelamiento. En esta

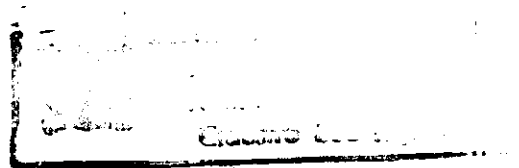


zona predominan los agrietamientos por corrosión del acero y por congelamiento y deshielo en algunas regiones.

En la zona de mareas, el concreto no sólo es vulnerable a agrietamientos y expansiones debidas al humedecimiento y secado, congelamiento y corrosión del refuerzo, sino también a la descomposición química de los productos de la hidratación del cemento y a la abrasión producto de los impactos del oleaje, cuerpos flotantes, arenas y gravas.

El concreto que permanece sumergido -por debajo del nivel de mareas- puede sufrir disminución de su resistencia y pérdidas de material debido a las reacciones químicas de los minerales hidratados del cemento y los componentes del agua de mar. En esta zona no se presenta acción de congelamiento, ni hay oxígeno disponible para una corrosión del acero (la que, sin embargo, no puede descartarse del todo).

En la zona sumergida los productos insolubles de las reacciones entre los diferentes agentes agresivos y los componentes del concreto reducen la permeabilidad del elemento, cumpliendo una acción protectora. Esto no ocurre en la zona de salpicaduras, donde los agentes mecánicos se encargan de retirar los productos depositados en los poros, como también las partes debilitadas del hormigón, quedando el concreto del interior expuesto al ataque directo del medio.



Hacia el interior del hormigón el ataque del medio marino también presenta zonas con características diferentes. Biczók (1967, 357-359) y Metha (1980, 10-11) dividen los procesos según el patrón que se muestra a continuación y que fue propuesto inicialmente por Moskvín. (ver figura 3)

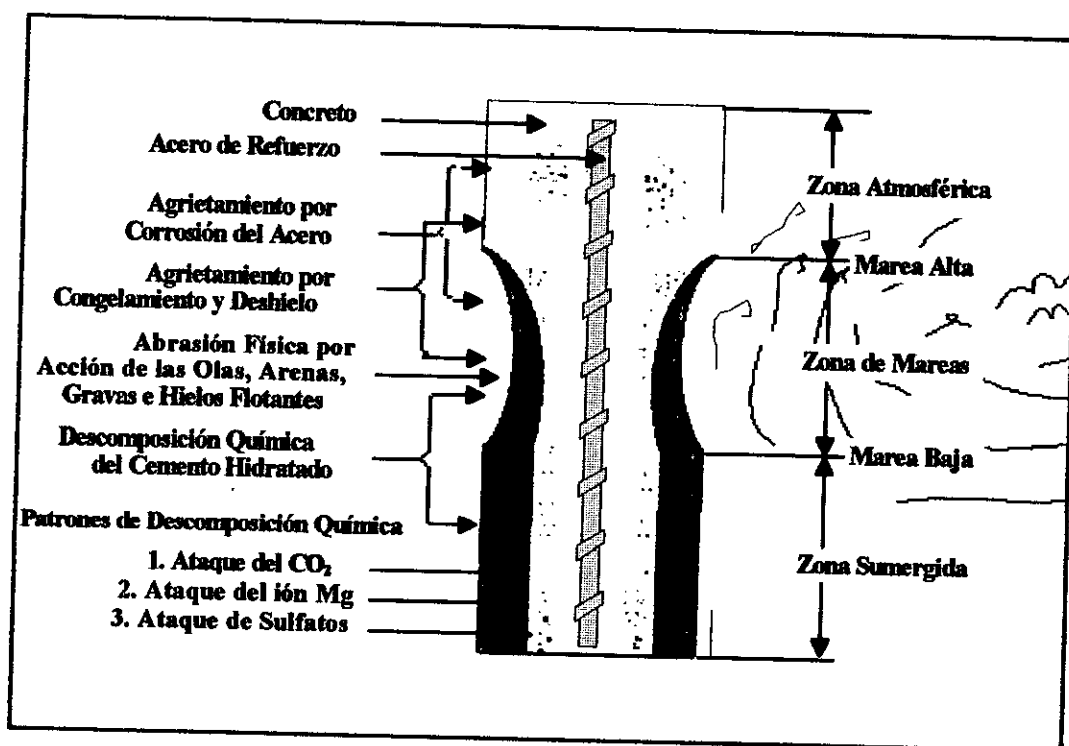


Figura # 1

Figura 3. Tomada de Metha, 1980, 19

El agua penetra en el concreto actuando en primer lugar el gas carbónico atrapado de la atmósfera y originándose una zona en la que la cal es disuelta. De la superficie del concreto son extraídos los iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{OH}^-$  y se precipita aragonita (carbonato de calcio), de acuerdo a un proceso de carbonatación (ver sección 1.3.4). En aguas de

mar altamente carbonatadas la aragonita es trasformada en bicarbonato que, siendo soluble, es lixiviado. Sin embargo la acción del  $\text{CO}_2$  se limita generalmente a la superficie y a los procesos que se llevan a cabo hacia el interior del hormigón tienen un carácter diferente.

En la zona siguiente la cal es transformada ya sea en cloruros solubles o sulfatos insolubles, bajo la acción de las sales de magnesio, de modo que se presentan reacciones de las cuales resulta hidróxido de magnesio y cloruro de calcio. Estos residuos se depositan en los poros y grietas del concreto formando una lechada de color blanco. En esta zona, según Biczók, el sulfato puede hallarse en forma de yeso, mas no en forma de sulfoaluminatos debido a la presencia de magnesio. El magnesio, por su parte, no puede atacar otros componentes del concreto mientras halla cal disponible, de acuerdo a Kalousek y Benton (Metha, 1980, 10). La segunda zona corresponde, pues, a un ataque de magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ) y en ella frecuentemente se encuentran precipitados de brucita ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ).

Los sulfatos ( $\text{SO}_4^-$ ) y cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) continúan hacia el interior del concreto donde, en la zona siguiente, han de formarse cloroaluminatos y sulfoaluminatos hidratados.

Los sulfatos, libres de magnesio, al penetrar forman yeso y ettringita. Eventualmente penetra hasta aquí agua libre de ácido carbónico, sales de magnesio y sulfatos, promoviendo la lixiviación de los componentes del concreto. En esta tercera zona la

formación de yeso y ettringita ocasiona la remoción del ión sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ) del agua de mar.

Los iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) siguen penetrando aún más en el hormigón. Aún cuando el aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ), si está presente, puede removerlos del agua de mar en forma de cloroaluminatos, estos son inestables en ambientes sulfatados y terminan por convertirse en ettringita liberando los cloruros.

En esta división de los procesos Kalousek y Benton encontraron razón a las mayores tasas de ettringita encontradas muy al interior de las pastas del hormigón, donde también se han hallado, eventualmente, cloruros. Esto explica también la ausencia de cloroaluminatos en el exterior de la pasta aún en cementos con alto contenido de  $\text{C}_3\text{A}$  (Metha, 1980, 11).

Los límites de estas zonas no son estables y en cambio se desplazan hacia el interior del concreto a medida que avanza al proceso.

## **2.6 CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO**

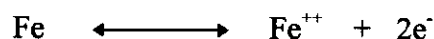
Dentro de los fenómenos involucrados en la corrosión de elementos de concreto en el agua de mar merece atención especial el comportamiento del acero de refuerzo de las estructuras.

Hace 30 años poco se habían estudiado los daños sufridos por estructuras debido a la corrosión de metales, hoy en cambio, debido al deterioro de puentes, muelles, tanques, etc, se llevan a cabo numerosos esfuerzos por conocer y combatir este problema, que ocasiona pérdidas estimadas en billones de dólares por año. (Hime y Erlin, 1987, 2).

El concreto de cemento portland en condiciones normales provee, de alguna forma, una excelente protección para el acero de refuerzo. En otros casos se observan daños que reducen drásticamente la vida útil de estructuras. Hime y Erlin (1987, 2) han intentado explicar estos procesos con el objeto de aclarar ciertos malentendidos que han dado lugar al uso de medidas equivocadas, en ocasiones contraproducentes para la protección de estructuras contra una posible corrosión de refuerzo.

En primer lugar los fenómenos de corrosión de metales al interior del hormigón tienen un carácter electroquímico (ver figura 4). Los átomos de los metales poseen una leve tendencia a perder electrones para convertirse en iones. Los iones, por su parte, tienden a ganar electrones y convertirse en átomos de metales. Este doble proceso se conoce como semicelda y no implica ninguna reacción neta. (Hime y Erlin, 1987, 2).

En el caso del hierro, por ejemplo:



La reacción que ocurre de izquierda a derecha hace más positivo el elemento -en términos químicos, se oxida- y lo convierte en un electrodo (ánodo). Se conoce, pues, como reacción anódica. En la corrosión electroquímica es el ánodo quien se corroe; sin embargo la continuidad del proceso requiere la presencia de otro electrodo que tome los electrones que son liberados en la reacción anódica.

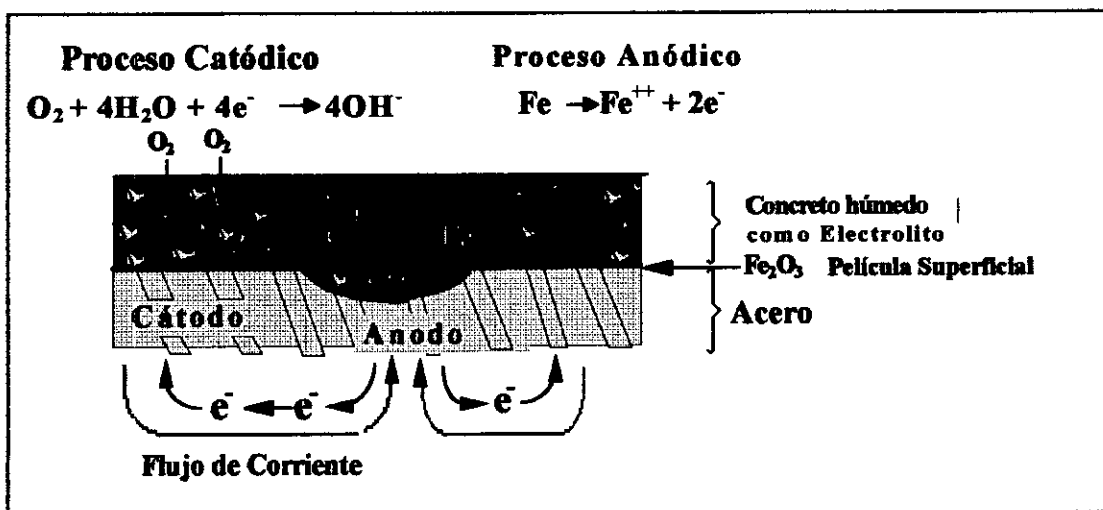
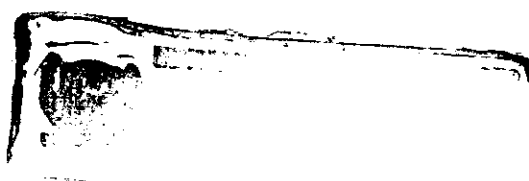


Figura 4. Presentación esquemática de la corrosión electroquímica  
 Tomada de Metha, 1988, 29

Esta última reacción se conoce como catódica y usualmente se presenta en el concreto reforzado de la siguiente forma:



Para que se cumpla esta reacción y se lleve a cabo la corrosión del ánodo se requiere la presencia de oxígeno y agua. Según Hime y Erlin este hecho es, frecuentemente,



fuentes de confusión ya que se asocia la corrosión con la herrumbre. Aclaran ellos que los productos de la corrosión y los procesos que se realizan en el ánodo no incorporan el oxígeno y el agua que sí intervienen en la reacción catódica. “El óxido rojo de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) frecuentemente aparece, sólo, luego de que los productos de la corrosión, debido a su gran tamaño comparado con el del hierro metálico, han ocasionado grietas (por expansión) en el concreto permitiendo al oxígeno penetrar y reaccionar con ellos.” (Hime y Erlin, 1987, 4).

De esta naturaleza electroquímica de la corrosión se derivan las siguientes consecuencias:

Debido a que los concretos son permeables a los gases, y que tanto el agua como el oxígeno pueden hallarse fácilmente en ese estado, es muy probable que se forme un cátodo cuyo tamaño gobierna los procesos corrosivos, ya que por lo general las zonas anódicas -carentes de oxígeno- son mucho mayores. Los métodos encaminados a reducir la presencia de agua y oxígeno y, por lo tanto, el tamaño del cátodo son de especial importancia en los posibles casos de corrosión del refuerzo.

Para completar una celda de corrosión, además del ánodo y del cátodo debe existir un conductor metálico para los electrones -generalmente el mismo refuerzo- y un electrolito que transporte los iones -normalmente lo es el concreto húmedo.

Puntualizan Hime y Erlin (1987, 5) que:

- Anodo y cátodo están siempre separados, no importando la distancia.
- La presencia de oxígeno no está relacionada con el sitio de corrosión. La presencia de oxígeno en el ánodo puede, al contrario, prevenir o limitar la corrosión.
- La celda puede romperse y detener la corrosión mediante:

El corte del metal conductor.

El impedimento del acceso de oxígeno al cátodo.

El mantenimiento de una zona seca entre cátodo y ánodo.

Al interior del concreto reforzado se cumple un proceso que ha permitido su uso en zonas donde existe riesgo de corrosión metálica. Este proceso se conoce como pasivación y consiste simplemente en que la reacción anódica del acero se detiene en medios altamente alcalinos, como lo son los morteros y hormigones de cemento portland: “El hierro es pasivado por el electrolito de alto pH, a menos que se presenten suficientes concentraciones de un agente despasivante.” (Hime y Erlin, 1987, 5).

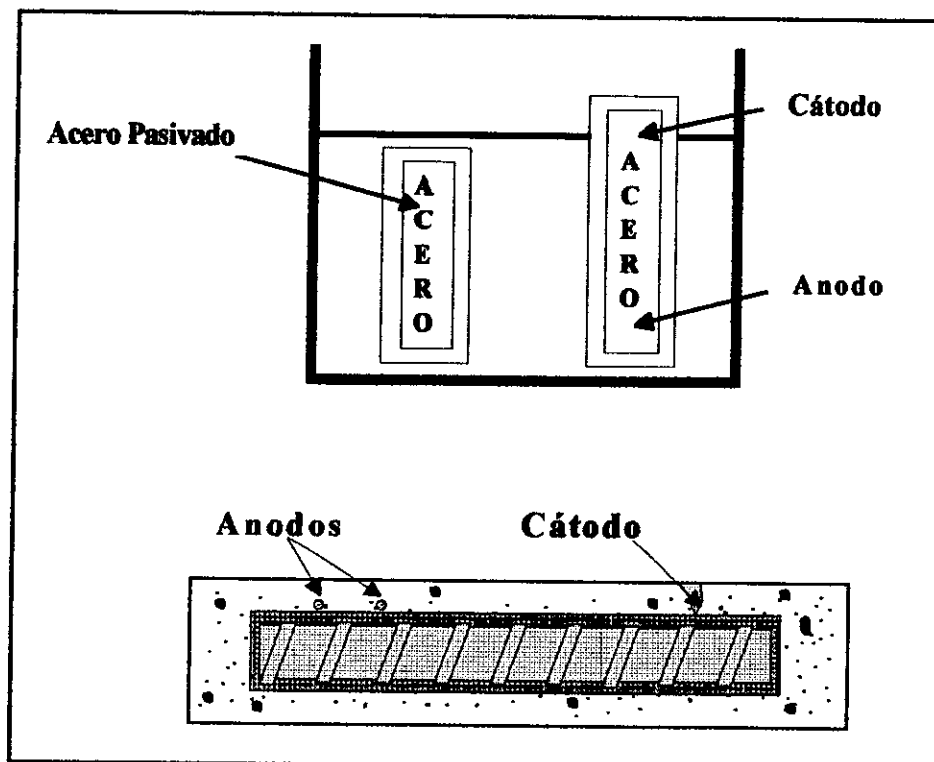


Existen dos agentes que reducen y suprimen la pasivación del hierro en el concreto. Por un lado el  $\text{CO}_2$  reduce el pH del hormigón por medio de un proceso que en realidad es sumamente lento (a razón de unos pocos milímetros por año). De igual manera la presencia de iones agresivos, comunmente cloruros, constituye un mecanismo por el cual el acero pierde su carácter pasivo, especialmente en el ambiente marino donde se hallan abundantemente.

Estudios en el estado de California (Hime y Erlin, 1987, 6) han permitido determinar que concentraciones de 0.2% de cloro por peso de cemento causan despasivación del refuerzo, lo que ha sido erróneamente atribuido a una reducción del pH causada por el cloro según presentan Hime y Erlin (1987, 6) y Gjorv y Vennesland (1976, 512). Estos últimos afirman además que el pH del concreto no debe bajar de 11.5 para permitir un estado pasivado de la armadura de refuerzo, y que en la medida en que este pH sea mas alto el concreto podrá tolerar cantidades mayores de cloruros sin comprometer el estado del acero en su interior. El mismo concepto es expresado por Metha (1980, 12) a partir de la relación  $\text{Cl}^-/(\text{OH}^-)$ , la cual debe superar un mínimo de 0.63 para que se de inicio a un proceso de corrosión del acero. Para Haussman este valor límite es de 0.6 (Delvasto y Mejía, 1990, 3).

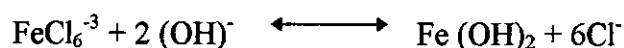
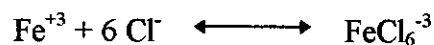
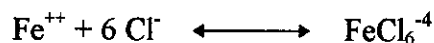
En ocasiones la experiencia parece contradecirse. Es extraño, por ejemplo que se puedan verificar corrosiones de refuerzos en la parte totalmente sumergida de una estructura. Según lo expuesto por Hime y Erlin la parte expuesta a la atmósfera de

estructuras semi-sumergidas funciona como cátodo para permitir la corrosión del acero por debajo del nivel del agua (ánodo). La figura 5 ilustra este hecho, así como el de una posible corrosión del refuerzo producida por la presencia de grietas que generan zonas anódicas y catódicas en el acero.



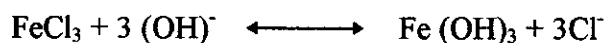
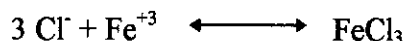
**Figura 5. Tomada de Hime y Erlin, 1987, 11**

El ión cloruro se convierte en un elemento de cuidado en lo que respecta a la corrosión del acero de refuerzo, actuando de manera compleja, de acuerdo a reacciones como las siguientes (Hime y Erlin, 1987, 7-8):



Esta última reacción produce herrumbre y libera ión cloruro (anión) que queda disponible para nuevas reacciones con el catión de hierro.

El, proceso, según Del Vasto y Mejía (1990, 3) es:



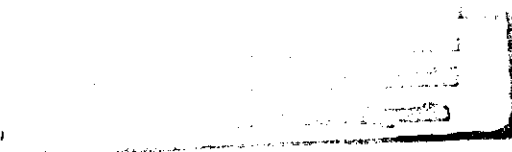
Otras causas promotoras de corrosión de metales al interior del hormigón son las producidas por discontinuidades y diferencias ya sea en el medio que rodee al metal o en el metal mismo. Estas diferencias llevan a la polarización de diferentes zonas de metal tornándose unas catódicas, otras anódicas; estas últimas sufren corrosión. Un caso típico es el contacto de diferentes materiales constituyendo una celda galvánica. Vega presenta posibles casos en los que se originan este tipo de celdas: “Tales diferencias potenciales se crean entre metales diferentes puestos en contacto o sumergidos en un electrolito, falta de homogeneidad, imperfecciones superficiales,

orientación de cristales, diferencias en la composición de los suelos, diferencias en la dirección de los suelos y diferencias en el contenido de humedad de los suelos.” (Vega, 1985, 15).

## **2.7 EXPERIENCIAS Y MEDIDAS PREVENTIVAS**

Los requisitos para la elaboración de concretos en el mar son cada vez mayores en la medida en que nuevos usos imponen condiciones de servicio más severas, presiones hidrostáticas diferenciales, abrasión por impactos de embarcaciones y de hielos flotantes, bajas y altas temperaturas, ataque químico, etc.

Las exigencias al concreto desde el punto de vista de la durabilidad son hoy en día más estrictas, que las que se refieren a sus solicitaciones de resistencias a las cargas. La clave de la durabilidad del hormigón está en su capacidad para impedir la entrada de sustancias agresivas a su interior. La permeabilidad, según Metha (1980, 14), (1988, 20), más que la composición interna del concreto, es el factor que determina su capacidad para resistir los ataques del medio ambiente. Las medidas dirigidas hacia la fabricación de estructuras impermeables deben involucrar desde la selección correcta de los componentes de la mezcla hasta el uso adecuado de la estructura y los cuidados durante su vida útil.



En algunos medios la confluencia de ambientes agresivos marino e industrial, por ejemplo, impone condiciones más severas desde el punto de vista de la durabilidad, a estructuras tales como silos , tanques de almacenamiento o muelles. Todo esto hace de la elaboración de un hormigón resistente a los ataques del medio una verdadera industria, sumamente exigente en cuanto se refiere a la calidad de los materiales, procesos constructivos, usos, mantenimiento y eventuales reparaciones. En 1989, durante un estudio de un caso de corrosión en una tubería de concreto reforzado y en las plantas de crudo y viscorreductora de la refinería de Ecopetrol en Cartagena, Vargas y Horrillo encontraron concentraciones de 591 ppm de  $Mg^{++}$  , 6250 ppm de  $SO_4^{=}$  y 14889 ppm de  $Cl^-$  , además de un pH de 7.8 a 8.5 al interior de la tubería, e inferior a 9.5 en la superestructura. Adicionalmente detectaron la presencia de gases agresivos en el ambiente (amoníaco) que habían llevado a un estado de deterioro crítico a las estructuras mencionadas y al colapso de la tubería, luego de 35 años de servicio. ( Vargas y Horrillo, 1989, 4-5)

A partir de las normas ACI y FIP (1984) y la práctica constructiva corriente en el mar del norte (1986-87) P. K. Metha realizó una revisión de la tecnología del concreto en su momento. Según este autor la experiencia de estudios en laboratorio y la inspección de estructuras ha mostrado que las limitaciones que hasta la norma ACI 357R de 1984 se hacían al contenido de  $C_3A$  en el cemento estaban equivocadas. Afirma Metha, basado en la evidencia histórica, estas restricciones (máximo 10% en las normas ACI) se basaban en la errada suposición de que los concretos en agua de

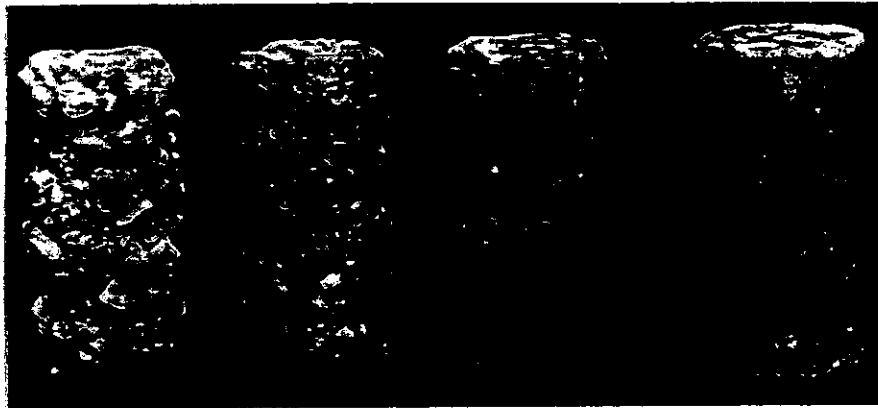
mar eran susceptibles de sufrir ataque por sulfatos (Metha, 1988, 6-15). Los efectos de los sulfatos en el agua de mar no son de ninguna forma similares a los que se verifican en otros ambientes (ver sección 1.4.2). Está claro que en presencia de cloro las reacciones expansivas debidas a ellos no se llevan a cabo.

Contrariamente a aquella restricción del aluminato tricálcico, estudios de Page y Rasheeduzzafar (Metha, 1988, 8) muestran que el uso de cementos con bajos contenidos de  $C_3A$  (cemento tipo V) permite una mayor rata de difusión de iones cloruro que en cementos tipo I ó II, resultando, la norma mencionada, contraproducente. La presencia de aluminato tricálcico permite la remoción del cloro agresivo por la formación de cloroaluminato, que de todas formas no es estable en presencia de sulfatos, siendo ésta una solución sólo temporal cuando se trata de un concreto altamente permeable.

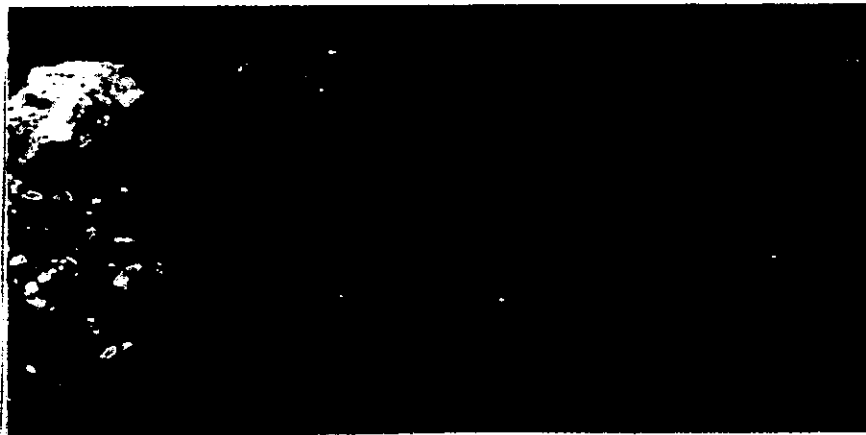
Vargas y Horrillo reportaron que durante las reparaciones realizadas en la refinería de Ecopetrol en Cartagena en 1989 se diseñó para la tubería de reemplazo una mezcla con bajos contenidos de  $C_3A$ , que presentaba ciertos efectos adversos para la estabilidad de las armaduras de acero, cuando se mezclaba con algunos aditivos; por lo que fue preciso emplear un inhibidor superficial de corrosión para el refuerzo (Vargas y Horrillo, 1989, 9).

La prescripción de un tipo de cemento u otro se debe mas bien a su compatibilidad con las adiciones y aditivos empleados, como ha ocurrido, por ejemplo, en los muelles Noruegos de Gullfaks C, donde se cambió un cemento tipo I por otro tipo II en vista de su mayor afinidad con el aditivo superplastificante que se utilizó (Metha, 1988, 11). Prácticamente sólo se descartan los cementos tipo III (por los altos calores de hidratación generados, que conducen a agrietamientos) y los tipos V por su mayor permeabilidad ante los cloruros.

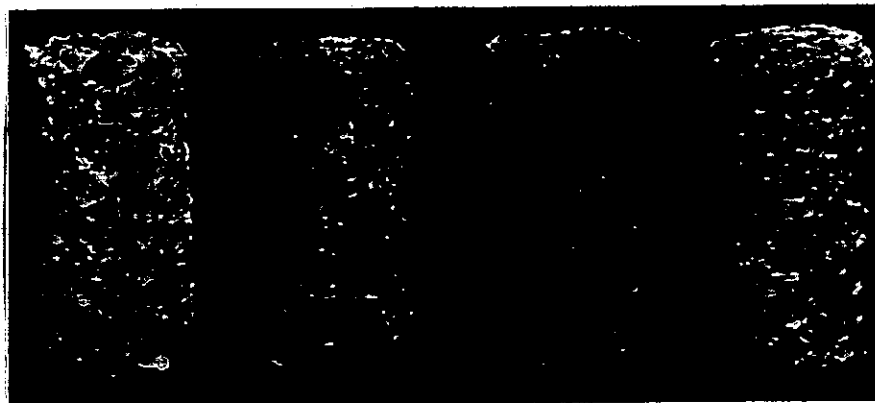
Las adiciones puzolánicas y de microsílica favorecen en la mayoría de los casos la resistencia del concreto al ambiente agresivo ya que reducen los calores de hidratación, mejoran la interacción de la pasta con los agregados, permiten mayor homogeneidad en la mezcla y construyen una microestructura más rígida. Además, estas adiciones, reaccionan con la cal libre -que es el elemento más atacable del concreto- reduciendo su contenido; lo que es conveniente siempre y cuando no se comprometa (al emplearse las proporciones adecuadas) la alcalinidad de la mezcla, necesaria para la estabilidad del acero de refuerzo. Durning y Hicks comprobaron que las adiciones de microsílica mejoraban la durabilidad de los concretos ante los ataques de los ácidos sulfúrico, acético, fosfórico y fórmico. Estos autores sometieron mezclas de concreto con diferentes proporciones de sílica fume a ciclos de humedecimiento y secado en soluciones de 1 y 5 % de ácido sulfúrico, y de 5 % de los ácidos acético, fórmico y fosfórico, así como a abrasión por cepillado, por espacio



**Figura 6.** Probetas sometidas seis meses (12 ciclos) a solución de 5% de ácido acético. De izquierda a derecha: 0, 7.5, 15, 30% de microsilica. Tomado de Durning y Hicks, 1991, 47.



**Fig 7.** Probetas sometidas nueve meses (18 ciclos) a solución de 5% de ácido fórmico. De izquierda a derecha: 0, 10, 20, 30% de microsilica. Tomado de Durning y Hicks, 1991, 47.



**Fig 8.** Probetas sometidas seis meses (12 ciclos) a solución de 1% de ácido sulfúrico. De izquierda a derecha: 0, 7.5, 15, 30% de microsilica. Tomado de Durning y Hicks, 1991, 47.



de dos años al final de los cuales comprobaron el excelente comportamiento de los concretos con adiciones de microsilica (Durning y Hicks, 1991, 42-48).

En cuanto a los aditivos, los superplastificantes permiten mejor trabajabilidad, reduciendo la relación Agua/Cemento requerida para un grado de manejabilidad dado, lo que permite elaborar mezclas mas densas. La incorporación de aire al concreto es de uso obligatorio cuando se espera que estos se vean sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo y es recomendable, incluso, cuando existe la posibilidad de que ocurran reacciones alcali-sílica. Tsuchiya y Ardila encontraron que los incorporadores de aire mejoraban la manejabilidad del concreto, la cual aumentaba en forma exponencial al incrementar el contenido de aire (Ardila y Tsuchiya, 1991, 79). Así mismo determinaron que aún cuando ciertos contenidos de aire -que variaban de acuerdo a las especificaciones de la mezcla- producían aumentos en la permeabilidad de los especímenes, para contenidos mayores de aire incorporado la tendencia era a recuperar y en algunos casos a superar las condiciones originales de impermeabilidad (las obtenidas en mezclas sin incorporador de aire): En estos casos comprobaron que al bajar la permeabilidad se mejoraba la durabilidad de los concretos sometidos al ataque por sulfatos, empleando para sus experimentos sulfato de magnesio en concentraciones de 0, 3000 y 6000 ppm. (Ardila y Tsuchiya, 1991, 105-125). En el desarrollo de este trabajo investigativo se pudo observar el aumento de la manejabilidad del concreto a medida que se le incorporaba aire.

El uso de aditivos que contienen cloruros de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ) ha sido descartado de la práctica constructiva ya que favorece la corrosión del refuerzo.

Entre los agregados se prefieren los agregados calizos y livianos (lightweight) ya que forman mejores uniones con la pasta y presentan coeficientes de expansión térmica más compatibles con los de esta. Holm, Bremner y Newman (1984, 49-54) comprobaron el comportamiento satisfactorio de estos agregados en varios puentes de Estados Unidos, así como en embarcaciones fabricadas con concreto de agregados livianos. Según ellos y de acuerdo a las afirmaciones de Khokrim el mejor comportamiento de este tipo de agregados se debe a una mejor interacción con la pasta, ya que no forman con ésta una interfase rígida sino que se interactúan tanto en forma física como química generándose una especie de tercer material entre ellas. Estos agregados presentan además una mayor compatibilidad elástica y térmica con la pasta y una menor formación de grietas que cuando se usan agregados de otro tipo, reduciendo así la permeabilidad a las sustancias agresivas.

Cuando la resistencia de los agregados es varias veces mayor que la de la pasta se presentan concentraciones de esfuerzos en la interfase agregado-pasta, dando lugar a grietas que incrementan la permeabilidad. Este desajuste entre la pasta y los agregados densos se incrementa con la incorporación de aire al concreto, según Holm, Bremner y Newman. (1984, 51).

Durante el desarrollo experimental de este trabajo se encontraron mezclas mas densas en las cuales el contenido de cloruros totales, bajo ciertas condiciones, era mayor que en otras de menor relación agua/cemento. Esto se observó con contenidos de aire del 6% del volumen. La razón de este fenómeno puede estar relacionada con la incompatibilidad entre la pasta y los agregados silíceos que mencionan Holm, Bremner y Newman si se tiene en cuenta que los especímenes fueron sujetos a secados a altas temperaturas (80 °C).

Por otra parte son recomendables las relaciones altas agregado grueso /agregado fino. Esta relación debe ser por lo menos de 65% grueso y 35 % fino (Metha, 1988, 10).

En cuanto a las prácticas de construcción Metha hace énfasis en las primeras edades del concreto:

“En la medicina se reconoce que para llegar a ser una persona saludable, un recién nacido necesita especial atención durante el período de crecimiento temprano. Algunas veces, esto se aplica al concreto, los tecnólogos del concreto están de acuerdo en que las deficiencias adquiridas por el concreto fresco por pérdidas de trabajabilidad antes o en el momento de la colocación, segregación y sangrado durante la consolidación y tasas anormales de asentamiento y endurecimiento pueden dañar permanentemente el concreto y reducir su vida útil.” (Metha, 1988, 12).

En cuanto las prácticas constructivas es importante que se logre una buena homogeneidad durante el mezclado y colocación del concreto. Se sabe que el bombeo reduce la manejabilidad y el contenido de aire incluido en el hormigón. La colocación por tubo embudo Tremie ha mostrado ser especialmente crítica en cuanto se refiere a segregaciones y formación de zonas débiles en el concreto (Metha, 1980, 5) (Metha, 1988, 4).

El contenido de cemento debe ser alto para la consecución de mezclas densas. Sin embargo debe regularse para evitar agrietamientos por altas temperaturas debidas a los altos calores de hidratación. Metha (1988, 11) presenta ejemplos tomados de la práctica corriente en el mar del norte: En la construcción de las estructuras de Beryl A Condeep (1970), se utilizaron 430 kilogramos de cemento por metro cúbico de concreto ( $\text{Kg/M}^3$ ). Posteriormente, en Statfjord C (1981) el contenido de cemento se limitó a  $380 \text{ Kg/M}^3$  para evitar agrietamientos por las altas temperaturas, sin embargo el uso de un cemento mas fino, agregados mas pequeños y el empleo de un superplastificante permitieron aumentar las resistencias en un 20 % con respecto a Beryl A. En 1986 se construyó Gulfaks C y se logró mejorar la resistencia hasta un 50% con respecto a Beryl A usando esta vez  $430 \text{ Kg/M}^3$ , así como un 5% de puzolana (Silica fume), además de la puesta en práctica de medidas adecuadas para el control de los gradientes de temperatura. La densidad de la mezcla es mayor cuanto menor sea la relación agua-cemento, como se pudo comprobar durante este estudio.

El vibrado debe ser hecho correctamente. En este caso es mejor pecar por exceso que por defecto, incluso se recomienda practicar el revibrado, que, según Welton es la última oportunidad para neutralizar los efectos de los capilares que se producen durante la exudación del concreto (Metha, 1988, 13). El acabado que se dé a la superficie también es importante, aún en estructuras masivas.

El curado del concreto es fundamental en su durabilidad. Según Metha (1988, 14) no debe hacerse con agua de mar, más aún, en la práctica noruega sólo se permite sumergir en el mar los elementos de concreto de alta resistencia después de 3 días de haber sido elaborados.

Otra práctica que no puede omitirse es la de proveer al refuerzo de un adecuado recubrimiento: las normas FIP y ACI requieren que se coloquen en la zona sumergida 50 mm para acero de refuerzo y 75 mm para tendones preesforzados, en la zona de salpique y atmosférica los recubrimientos recomendados son de 65 mm y 90 mm respectivamente. Para estribos se requiere un recubrimiento de 13 mm menos que en los anteriores (Metha, 1988, 14-15).

Las juntas en el concreto deben ser bien preparadas y cuidadosamente elaboradas, lo deseable es que sean reducidas al mínimo. El control de grietas en las estructuras es de particular relevancia. Deben tomarse medidas para reducir la presencia de gradientes térmicos durante la colocación del concreto, tales como el uso de adiciones

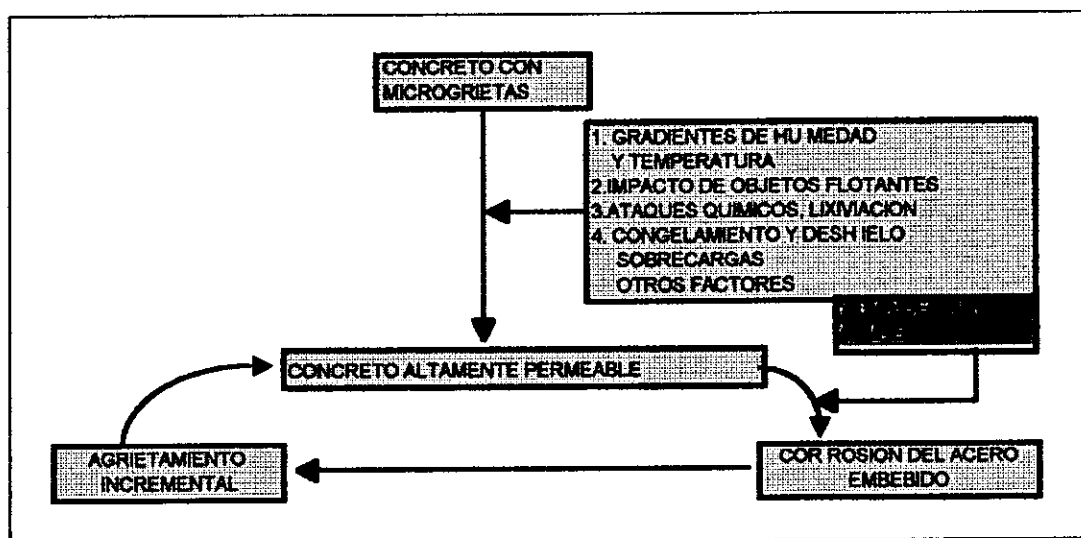
para reemplazar parte del cemento de la mezcla. El enfriamiento del agua de amasado y el aislamiento de la formaleta no son medidas extrañas en las prácticas constructivas del mar del Norte.

Muchos autores como Metha, Gerwick, Idorn (Metha, 1988, 3) están de acuerdo en que las grietas son las principales responsables de la permeabilidad de las estructuras. El ingreso de cloruros en el concreto por difusión es un proceso muy lento. Por otra parte, el agua salina que entra por capilaridad permite el acceso rápido del agente atacante al interior del hormigón si éste encuentra una red de grietas internas que lo facilite. Las grietas están siempre presentes en el concreto; pero para que se verifiquen efectos destructivos se requiere que éstas se extiendan internamente formando una red de ingreso para las sustancias agresivas

El carácter cíclico de los procesos a que se ven sometidas las estructuras (humedecimiento-secado, carga-descarga, congelamiento-deshielo...) favorece la formación de grietas y el aumento de la permeabilidad del concreto. El proceso corrosivo se hace aún mas crítico por su naturaleza retroalimentativa, ya que la corrosión facilitada por la presencia de grietas promueve, a su vez, mayores y nuevos agrietamientos, originándose un ciclo que destruye finalmente la estructura (figura 9).

En cuanto a los cuidados del concreto ya endurecido Metha afirma: "El control del agrietamiento del concreto en servicio es tan importante como el control de la

permeabilidad a través de las mezclas apropiadas y las prácticas correctas de colocación.” (Metha, 1988, 6). En este sentido, son causas de agrietamientos los usos inapropiados y los accidentes durante la vida útil de la estructura, como cargas prematuras, asentamientos o impactos.



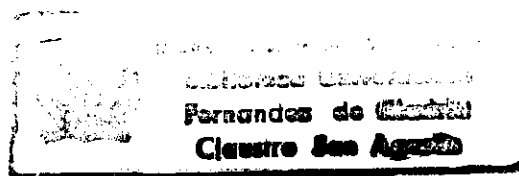
*Figura 11.5.*

**Figura 9. Ciclo Corrosivo del Concreto Reforzado Expuesto al Medio Marino  
Tomada de Metha, 1988, 27**

La permeabilidad, se ha dicho, es el factor mas importante en cuanto a corrosión del concreto se refiere. El razonamiento al parecer es simple: Si las sustancias extrañas que reaccionan de una u otra forma con los componentes del concreto y con el refuerzo no son capaces de entrar en el concreto, no podran causarle daño: “Los casos históricos mostraron claramente que aunque la pasta de cemento contenía los gérmenes de deterioro potencial, estos gérmenes no fructificaron, ni se convirtieron en

productos que causaron deterioros serios a menos que el agua de mar fuera capaz de penetrar al interior del concreto” (Metha, 1988, 14).

Por simple que parezca, no hay mejor forma de combatir la corrosión que impidiendo el acceso de los agentes agresivos. A este respecto Gómez alude: “Si en algún tópico de la ingeniería es aplicable la máxima de que se debe pensar por adelantado o que es preferible ‘prevenir que tener que lamentar’ es precisamente en el de la durabilidad de las estructuras de concreto...” (Gómez, 1994, 2).





### **3. AIRE INCLUIDO**

#### **3.1. GENERALIDADES**

La incorporación de aire al concreto ha mostrado resultados bastante positivos en cuanto a durabilidad se refiere, particularmente en los casos en que se presentan ciclos de congelamiento y deshielo, que generan condiciones sumamente agresivas para el hormigón.

El descubrimiento de esta tecnología al parecer fue casual y obedeció a la notable capacidad de observación de algunos y muy seguramente a un excelente manejo de la información y de registros de construcciones. Según Adam Neville (1989, 61) con el fin de ayudar a la molienda del cemento, se le añadió en algunos casos sebo de res, observándose que los concretos elaborados con tales cementos eran más durables que otros de diferente origen -el sebo de res pertenece al grupo de las grasas y aceites animales, que constituye uno de los tipos de agentes empleados para incluir aire al concreto-. El efecto de aquella adición al cemento durante la molienda, que mejoró su resistencia al medio ambiente agresivo, debió haber sido ni mas ni menos la

incorporación de las pequeñas burbujas de aire que hoy se emplean invariablemente en los concretos de climas fríos, sometidos a congelamientos y deshielos (las estructuras que se fabrican en el Mar del Norte para la explotación petrolera, por ejemplo).

Carlos Ardila y Juan Carlos Tsuchiya, en su trabajo “Efectos de un incorporador de aire en las propiedades físicas del hormigón” presentan otra versión del descubrimiento de estos aditivos:

“ Hacia el año 1930 se observó en los Estados Unidos que algunos pavimentos de concreto mostraban una mejor resistencia al deterioro que otros, a pesar de haber sido fabricados en la misma época, con materiales similares y de estar trabajando en idénticas condiciones.

El estudio de dicho fenómeno mostró que lo único que diferenciaba a dichos concretos eran unas pequeñas burbujas de aire distribuidas homogéneamente en la masa de los concretos mas durables. La aparición de dichas burbujas se debía a las sustancias (jabones y aceites) con las cuales se limpiaban las bolas de acero que se empleaban en la molienda del clínker para la fabricación de cementos. Se comprobaba así el poder de algunas sustancias para generar aire en el concreto y se empezaron a evaluar sus efectos.”(Ardila y Tsuchiya, 1991, 1)

Además de las grasas y aceites vegetales y animales, y sus ácidos grasos, los agentes inclusores de aire se fabrican a base de resinas naturales de madera y agentes humectantes como las sales de álcalis de compuestos orgánicos sulfatados o sulfonatados, conformando una extensa gama de productos que deben cumplir la norma ASTM C 260.

### **3.2. AIRE EN EL CONCRETO**

El aire presente al interior del concreto puede estarlo de formas diferentes: aire atrapado, aire incluido, poros de gel y de agregados y poros capilares.

El aire atrapado corresponde al que posee el hormigón por efecto del mezclado, manipulación y colocación, no ofrece efectos favorables al concreto y su contenido varía entre el 0.5 % y el 2.0 % del volumen del concreto de acuerdo al tipo de agregado y al grado de compactación. Su tamaño es variable.

El aire ocluido o incorporado intencionalmente al concreto se halla en forma de burbujas bastante pequeñas - hasta de 75 micras de diámetro - y en cantidades que van desde quinientos a ochocientos millones en un metro cúbico de hormigón, representando un 3 a 6 % del volumen total (Ardila y Tsuchiya, 1991). Según Neville los tamaños de tales burbujas están entre 0.05 y 1.25 mm. (Neville, 1989). Este se

incluye artificialmente al concreto, a través de aditivos y presenta en ocasiones efectos favorables para su durabilidad.

Ardila y Tsuchiya (1991, 7) citan a Arcila, para quien el agente inclusor de aire debe provocar una tensión superficial en las burbujas, de forma que se cree una membrana elástica que ayude a su permanencia al interior del concreto, durante su manipulación.

Existen además los poros de los agregados que no cumplen una función específica en el concreto. Ardila y Tsuchiya dicen que su efecto “puede ser similar al del aire ocluido.” (1991, 4). Esta afirmación es confirmada por la evidencia del uso de concretos elaborados con agregados livianos y porosos, que presentan un mejor comportamiento que otros mas densos según se ha expresado en el capítulo anterior. Holm, Bremner y Newman explican que los poros de estos agregados han servido aparentemente como reservas para acomodar la expansión de algunos materiales, que de otra forma serían destructivos para el concreto. (1984, 49).

Los poros de gel son bastante pequeños y no causan efectos sobre el concreto. Están presentes en el gel de la pasta de los diferentes hormigones.

En el concreto endurecido se presenta una red de capilares, producto del sangrado de la pasta. Según autores como Metha, Idorn, Holm y otros (Metha, 1988, 3) es esta la principal causa de la permeabilidad del concreto y, por ende, de su deterioro. Según

Powers (Ardila y Tsuchiya, 1991, 20) el flujo de un fluido a través del concreto está asociado mas con la capilaridad que con la porosidad misma.

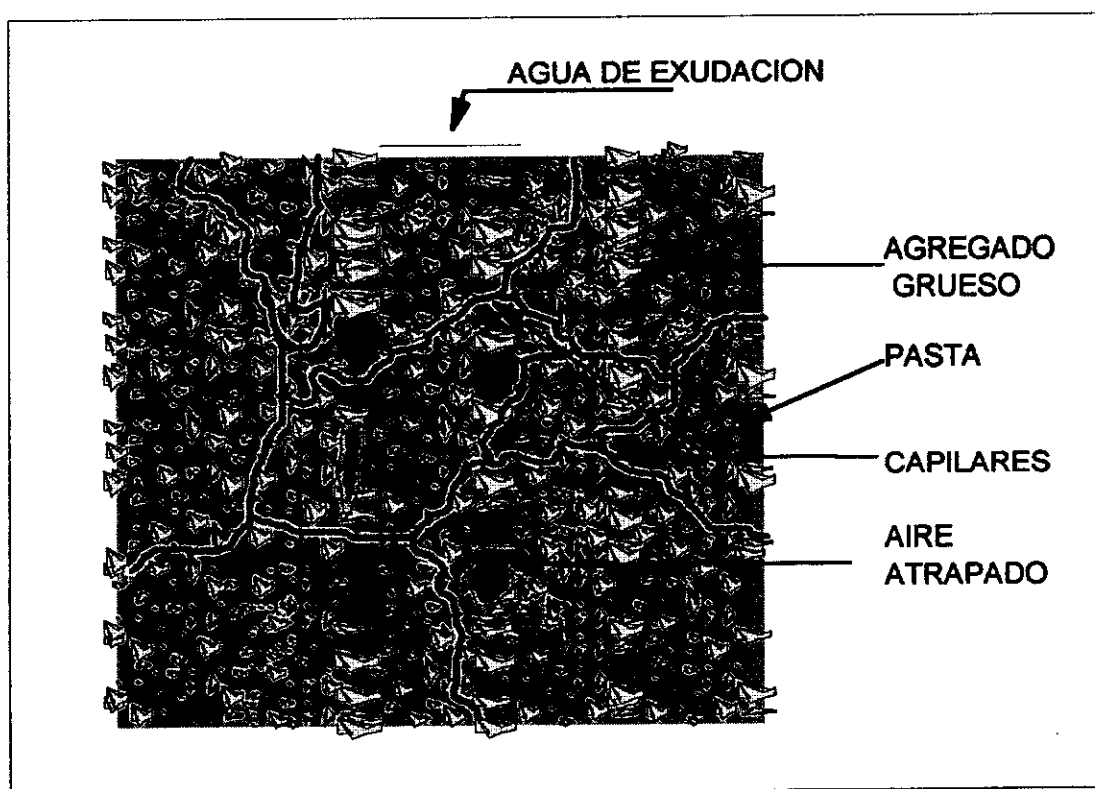
### **3.3. EFECTOS DEL AIRE INCLUIDO EN EL CONCRETO**

Los aditivos incorporadores de aire tienen varios efectos sobre la mezcla que guardan relación con su resistencia a los ambientes agresivos.

En primer lugar se observa que la incorporación de aire incrementa la manejabilidad del concreto. El aire ocluido conforma esferas diminutas que actúan como “rodamientos” dentro del concreto (Ardila y Tsuchiya, 1991, 8). Según los autores citados la inclusión de aire al concreto mejora la granulometría de los agregados haciendo las veces de arena. En su estudio, Ardila y Tsuchiya observaron un incremento exponencial en la manejabilidad del concreto a medida que se le incorporaba mas aire. En el desarrollo de este proyecto, con materiales diferentes, se ha observado un incremento de la manejabilidad de forma variable de acuerdo a la relación agua/cemento de la mezcla, presentando una tendencia lineal para la relación más baja (0.42) y casi que logarítmica para la relación agua/cemento de 0.63 (ver gráfica 1).

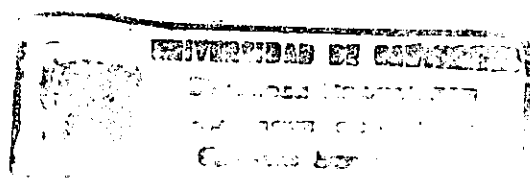
Este aumento de la manejabilidad puede ser aprovechado para reducir la relación agua/cemento, y la resistencia de la mezcla, sin afectar su facilidad de colocación.

Esto permitiría la elaboración de estructuras mejor compactadas; sin embargo la durabilidad de las estructuras depende de muchos otros factores que interactúan entre sí, por lo que este solo hecho no permite llegar a conclusiones al respecto.



**Figura 10. Matriz de Concreto sin Aire Incluido.**  
Tomado de Ardila y Tsuchiya, 1991

Adicionalmente, como pudieron comprobar Ardila y Tsuchiya (1991, 10), el aire incluido disminuye la exudación de la pasta, reduciendo su capilaridad. Sin embargo no observaron una relación directa entre este factor y la permeabilidad del concreto.



**S C I B**  
00031921

Ardila y Tsuchiya advierten que no todos los diseños de mezclas se benefician con la inclusión de aire (1991, 1). Horm, Bremner y Newman señalan que en concretos con agregados densos el aire incorporado hace aún mas diferentes las propiedades elásticas y térmicas de agregado y pasta, lo que hace al concreto más vulnerable a los ataques del medio. (1984, 68).

La densidad y la resistencia a la compresión del concreto se reducen por la incorporación de aire. Esto puede tener repercusiones negativas en la durabilidad por lo que la incorporación debe ser tratada cuidadosamente para lograr un equilibrio que mejore las características del hormigón en general. Tanto en estructuras sometidas al agua de mar y congelamientos, como en carreteras, donde se utilizan sales deshelantes durante el invierno no existe duda sobre la conveniencia del aire ocluido en la mezcla. En este estudio se observó que las mezclas mas densas se comportaban mejor ante el ataque de agua de mar; sin embargo, para la relación agua cemento 0.63 las probetas con contenido de aire intermedio fueron atacadas mas duramente por el ambiente agresivo, lo que se evidenció tanto en la apariencia externa como en las pérdidas de resistencia.

Como se pudo comprobar en el desarrollo de la parte experimental de este trabajo, la inclusión de aire en el concreto se ve afectada por muchos factores: El contenido de cemento, los agregados, su granulometría y proporciones, el agua (calidad y cantidad), la relación agua-cemento, la temperatura, el tiempo y tipo de mezclado, la dosificación

del aditivo inclusor de aire y otros aditivos empleados, el transporte, manejo y colocación del concreto. Son tantas las variables que, de acuerdo a Neville (1989, 69) es preciso comprobar la cantidad de aire incluido en realidad por medio de pruebas al elemento construido.

Según Neville para cada mezcla existe un volumen mínimo de cavidades, requerido para dotar al concreto de protección contra el congelamiento. Klieger determinó esta cantidad en un 20% del “volumen de mortero” (1989, 69). Neville explica igualmente que el principal factor que controla el comportamiento del aire ocluido es el espaciamiento entre las burbujas, que debe ser del orden de 0.25 mm. El tamaño de las partículas también es importante, el cual, medido como superficie específica, está entre 16 y 24  $\text{mm}^{-1}$  para el aire incluido, llegando hasta 32  $\text{mm}^{-1}$ . Para el aire atrapado el valor es menor de 12  $\text{mm}^{-1}$ . Según Ardila y Tsuchiya las partículas mayores de 200 micras se comportan como aire atrapado (1991, 7).



## **4. FASE EXPERIMENTAL**

### **4.1 PRELIMINARES**

El diseño de los ensayos a realizar obedeció a un proceso de estudio consistente básicamente en revisiones bibliográficas y consultas a investigadores dedicados al tema. Se definió de esta forma que se trabajaría con dos relaciones Agua/Cemento: alrededor de 0.4 y 0.6, con tres contenidos de aire: 0, 3.5 y 6 % en volumen y con dos ambientes de exposición, a saber, agua de mar preparada y agua potable. Igualmente se fijó el tipo de ataque a utilizar: inmersión de las probetas en agua de mar o agua patrón por el tiempo necesario para su saturación, para ser extraídas y secadas posteriormente en un horno a 80°C durante un período de 24 horas al final del cual las probetas habrían de ser sometidas a un cepillado con cerdas de acero por todas sus caras, regresando nuevamente al ambiente de saturación para completar así un ciclo de ataque. Inicialmente se pretendió someter los especímenes a 30 ciclos durante la prueba; se consiguió finalmente efectuar entre 24 y 28 ciclos para las probetas estudiadas.

El proceso descrito había sido utilizado anteriormente por Ardila y Tsuchiya (1991, 71), según quienes es una aplicación del ensayo de durabilidad para suelo-cemento. Dicho procedimiento reúne características de ensayos acelerados de durabilidad del concreto practicados desde la década del 50 por investigadores como V. V. Kind (Biczók, 1967, 127) y guarda relación con ensayos mas recientes como los de Durning y Hicks en el estudio de adiciones de microsilica. (1991, 46).

## 4.2 CRITERIOS

Para la selección de los ensayos se tuvieron en cuenta consideraciones de diversa índole, que incluyeron básicamente los objetivos del estudio y las restricciones a lo que se podía realizar. A lo largo de la preparación y desarrollo de las pruebas se realizaron ajustes que llevaron a la forma definitiva de la fase experimental de la investigación.

En este orden de ideas, los objetivos planteados requerían la realización de ensayos a corto plazo lo que hizo indispensable el uso de especímenes con una alta relación superficie-volumen, permitiendo una considerable área de exposición al ataque por unidad de volumen de la muestra. Este criterio es el mas aceptado para la aceleración de los procesos corrosivos y va de acuerdo con las observaciones de campo sobre estructuras atacadas. (biczók, 1967, 124 - 134).

El uso de probetas pequeñas tenía ciertas ventajas adicionales ante las limitaciones de espacio, lo que era un factor crítico en la cantidad y tamaño de los hornos requeridos para el secado, la cantidad de material a utilizar en la elaboración de las muestras y el tiempo empleado en ello (la medida de la resistencia a la compresión de probetas por medio de pruebas destructivas hizo necesaria la elaboración y ensayo de un alto número de aquellas).

El tamaño de los especímenes estuvo limitado a un mínimo por cuestiones prácticas de elaboración y por requisitos de confiabilidad de los ensayos. Se verificó, entonces, que la mínima dimensión fuera al menos tres veces el tamaño máximo de los agregados a utilizar, cumpliendo la norma ASTM C 192-76. De esta forma se evitaba el “efecto pared” que impide una total compactación de las probetas y ocasiona la formación de cavidades en sus caras exteriores. (Neville, 1989, 172).

Los diseños de las mezclas utilizados, por su parte, debían permitir la incorporación al concreto de los contenidos de aire predeterminados.

#### **4.3 MATERIALES**

El tipo de material a utilizar quedó determinado por razones de disponibilidad del mismo y de la posible utilidad de la investigación. Esto último es particularmente cierto al tratarse de concretos con aire incorporado en los que los resultados

obtenidos varían notablemente de acuerdo a muchos factores, entre ellos los materiales empleados, lo que no es extraño al estudio de la corrosión del hormigón, ya que como se ha dicho, cada situación es única. En este sentido, utilizar los materiales comunmente usados en el medio tiene toda la justificación.

Hubo también razones de tipo práctico: la disponibilidad de los materiales y equipos de la planta de CEMCAR fue factor determinante en su escogencia.

Fue así como se emplearon agregados provenientes de la cantera de Ingeniesa, localizada en Arroyo de Piedra (Atlántico). Estos agregados son extraídos de un manto de material sedimentario que consiste en un 50% de arena y un 50% de gravas, siendo lavados, triturados y clasificados durante su explotación. Las características del material se pueden observar en el Anexo D.

El cemento utilizado fue Cemento Caribe, escogido por disponibilidad de suministro y por su amplio uso en la región de la costa norte colombiana. Este es un cemento del tipo II, con contenidos de  $C_3A$  que fluctúan entre 4.5 y 7.5 y una finura Blaine entre 4100 y 4500.

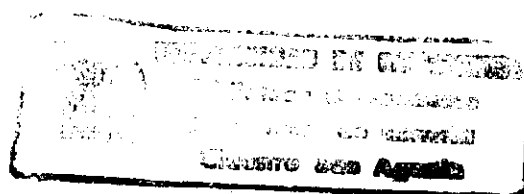
El agua empleada es el de uso normal en la planta de CEMCAR, en Mamonal (Cartagena). Es un agua que recircula siendo sometida a un proceso de pretratamiento, además no contiene sales en cantidades que puedan afectar la calidad de los concretos.

Los aditivos empleados son usados extensamente en la zona del estudio. Además del aditivo inclusor de aire fue preciso utilizar un plastificante. Para esto se empleo Plastiment VZ de SIKA. Como inclusor de aire se empleó Sika Aer D (SIKA), aditivo que cumple la norma ASTM C-260. Ninguno de los aditivos empleados contiene cloruros. Para la obtención de los contenidos de aire predeterminados fue preciso utilizar dosificaciones de incorporador de aire algo superiores a las especificadas por el fabricante.

#### 4.4 SELECCION DE PROBETAS

Se fabricaron en moldes cilíndricos de PVC, de dimensiones 3" \* 6" (diámetro y altura respectivamente). Para la selección del tipo de moldes se tuvieron en cuenta diferentes factores:

- 1- La mayor relación superficie/volumen con respecto a otros tipos de probetas empleadas comunmente, que es de importancia fundamental al tratarse de acelerar los procesos de deterioro.
- 2- La economía del material, que permitió tener muchos moldes disponibles para la fabricación de las probetas que fuesen necesarias, sin que su fabricación significase mayores dificultades, ni demoras, ni gastos.



3- El tamaño máximo del agregado, que pudo haber restringido las dimensiones de la probeta en razón de las dificultades para la fabricación y compactación de los especímenes. Los moldes se ajustaban estrechamente al tamaño máximo del agregado: 1/2" nominal, presentándose hasta 3/4". De esta manera no fue preciso tamizar el agregado grueso, lo que hubiera significado una alteración de las características originales del material empleado.

4- Las probetas guardaban una relación de 2:1 en sus dimensiones (altura y diámetro) lo que facilitó su utilización para medir resistencias a la compresión.

#### **4.5 DISEÑO DE MEZCLAS**

Se definió que las mezclas a ensayar debían comprender dos relaciones Agua/Cemento, a saber 0.4 y 0.6, así como tres contenidos de aire incluido: 0, 3.5 y 6% del volumen de la mezcla. Se obtuvieron finalmente relaciones A/C de 0.42 y 0.63, así como contenidos de aire dentro de los rangos descritos, como se muestra en la tabla.

El proceso de elaboración de los especímenes se inició con el diseño de las mezclas, que se hizo de acuerdo al método gráfico de Fuller-Bolomey. Para los materiales empleados se obtuvo una proporción de 60 % agregado grueso y 40% arena. Esta mezcla probó ser poco manejable por el alto contenido de materiales gruesos y se

modificó a 55% agregado grueso y 45% agregado fino, diseño que presentó problemas similares. Se estableció, entonces, una mezcla de 50 % arena 50 % agregado grueso. Hasta ese momento no se emplearon aditivos ya que se deseaba tener el menor número de variables involucradas en el estudio.

El paso siguiente fue la determinación de la cantidad de aditivo necesaria para lograr las incorporaciones de aire deseadas; lo que se hizo por medio de un proceso de ensayo y error.

Se ensayaron algunos diseños con mayores cuantías de arena que el definido inicialmente pero se comprobó que al aumentar ésta la inclusión de aire al concreto se hacía más difícil, requiriéndose más cantidades de aditivo incorporador (Sika Aer-D) a medida que se incrementaba el contenido de agregado fino, por lo que se regresó al diseño inicial: 50% arena y 50% grava; lo que facilitó la incorporación de aire al concreto.

Con el fin de dejar estable el mayor número de variables se fijó el contenido de agua en 190 litros para un metro cúbico de concreto; así mismo, la cantidad de cemento se estableció en 300 y 450 Kg por metro cúbico de concreto, para las relaciones A/C de 0.63 y 0.42. Con estos diseños se volvió al procedimiento de ensayos para obtener los contenidos de aire buscados.

Se previó que la mezcla de relación A/C baja ( $A/C=0.42$  ó 450 Kg de cemento por metro cúbico) presentaría muy poca manejabilidad al momento de no añadirle incorporador de aire. Esto se comprobó, haciéndose necesario el uso de un aditivo plastificante (Plastiment VZ) en cantidades del 1% en peso de cemento para permitir el manejo de dicha mezcla y la elaboración de las respectivas probetas. Con el fin de evitar que éste se constituyera en una nueva variable del estudio, la misma cantidad de aditivo plastificante se aplicó a todas las mezclas, facilitando a la vez la inclusión de aire en los diseños restantes.

Finalmente se obtuvieron las dosificaciones requeridas del aditivo incorporador (Sika Aer-D) por ensayo y error, no sin ciertas dificultades debidas a la cantidad de variables que, en efecto, influyen en la obtención del contenido de aire incorporado: temperatura ambiente, cantidad de cemento, calidad y cantidad de agua de mezclado (que varió de acuerdo a la mayor o menor humedad de los agregados), tipo de mezclado y tiempo de mezcla, incluso la cantidad de mezcla preparada (ya que la mezcladora era la misma pero la cantidad de concreto para los ensayos iniciales era menor que la requerida al momento de elaborar las probetas), cantidad de agregado fino; aparte de otras variables que se dejaron fijas (tipo de agregado, otros aditivos utilizados, etc.).

Se decidió elaborar las probetas en tres series o tandas, para obtener mayor confiabilidad en los resultados obtenidos. Esta sugerencia fue finalmente una necesidad debido a las limitaciones de capacidad de la mezcladora (60 lts).



Los agregados se tomaron de su lugar de depósito para el uso corriente en la planta donde se trabajó (CEMCAR, Cartagena), donde se encontraban en diferentes grados de humedad. Por esto, al realizar la mezcla, hubo que corregir siempre la cantidad de agua incluida para el amasado. Esta corrección demostró afectar el contenido de aire que efectivamente se incorporaba a la mezcla, aún cuando el contenido de agua total fuese constante por lo que se decidió trabajar con humedades fijas de los agregados, utilizándolos en un estado semiseco, en todas las tandas. Para ello se dejó secar una cantidad de agregado que se reservó para combinarse luego con otro más húmedo a fin de conseguir las humedades exactas con que se había logrado determinar las dosis de aditivo incorporador de aire requeridas (generalmente entre 1.5 y 2%). El procedimiento se obtuvo mediante el siguiente razonamiento:

Se conoce la cantidad de material requerido para la mezcla (C) y su humedad requerida ( $W_c$ ). Así mismo se tiene material con dos humedades:  $W_a$  y  $W_b$  (una mayor y la otra menor que  $W_c$ ). Siendo A y B las cantidades a incorporar del material con humedad  $W_a$  y  $W_b$  respectivamente, y como:

$$C = A + B$$

y

$$W_c \cdot C = W_a \cdot A + W_b \cdot B$$

se obtiene:

$$B = C \cdot (W_c - W_a) / (W_b - W_a) \quad \text{y} \quad A = C \cdot (W_b - W_c) / (W_b - W_a).$$

Las mezclas se diseñaron, de esa forma, manteniendo constantes la mayoría de parámetros posibles para evaluar los resultados ya fuera a partir del contenido de aire medido -o de incluso de aire dosificado- o bien con base en la relación agua cemento, la cual podía tomar dos valores.

#### **4.6 PROCESO DE ELABORACION**

Las mezclas fueron dosificadas por peso y se dispuso la elaboración de 40 lts de concreto; disponibles para tomar dos medidas de aire incluido, una medida de asentamiento, una medida de peso unitario y para fabricar entre 20 y 30 probetas cilíndricas de 3”\*6”.

Se utilizó una mezcladora con capacidad de 60 lts, siguiendo el mismo proceso de mezclado para todos los diseños: habiéndose humedecido previamente, el trompo, se introducía en primer lugar el agregado grueso y luego el fino, dejando mezclar por espacio de dos minutos. Luego se adicionaba el cemento y parte del agua de mezclado y se dejaba mezclar nuevamente por dos minutos para luego incorporar el resto del agua con los aditivos diluidos y mezclar finalmente por tres minutos.

Al final de la mezcla se procedía a medir el asentamiento (Norma ICONTEC 396), el aire incorporado (Norma ICONTEC 1032), el peso unitario seco (que se realizó sobre un molda de 4”\*8”), la temperatura ambiental y de la mezcla y a elaborar las probetas.

Luego de dieciseis horas los especímenes eran desencofrados y llevados a un ambiente de curado inicial por siete días en agua potable, al final de los cuales se daba inicio a los procesos de ataque simulado del medio marino.

#### **4.7 AMBIENTE AGRESIVO**

Se pretendió simular el ataque del agua de mar utilizando una solución de sales en concentraciones similares a las reales. Esto se hizo con el objetivo de tener un mayor control sobre las sustancias que estaban actuando sobre las diferentes probetas y sus proporciones que no se tendría si se utilizaba el agua real de mar

Las concentraciones no se variaron con respecto al agua de mar ya que se sabe que los procesos químicos varían de acuerdo a las tasas a que se presenten las sustancias agresivas: incrementar el contenido de una sustancia puede no sólo afectar la magnitud de los efectos sino incluso modificar su carácter, lo que, de ocurrir, invalidaría cualquier proyección de los resultados a las estructuras reales implantadas en el mar. Los ataques con sulfato de magnesio, por ejemplo, presentan características típicas de corrosión por sulfato cuando las concentraciones alcanzan hasta 4000 mg/lit;

concentraciones mayores conducen a una corrosión por magnesio, de características sumamente distintas a la anterior. En el agua de mar la presencia de varios agentes hace aún mas delicadas este tipo de modificaciones del ataque por lo que se decidió no modificar las concentraciones y acelerar el proceso sólo mediante el incremento de la relación superficie-volumen de las probetas.

Se utilizó:

NaCl: 32 g/lit

MgCl: 6 g/lit

MgSO<sub>4</sub>: 5 g/lit

Otras sustancias, presentes en menores cantidades en agua de mar no se emplearon con el objetivo de simplificar un poco el procedimiento. La preparación descrita fue colocada en recipientes para entre quince y veinte probetas y se renovó cada veinte días de acuerdo a las posibilidades y disponibilidad de los componentes químicos empleados.

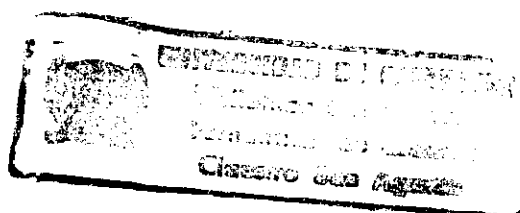
Estas concentraciones fueron determinadas luego de una revisión bibliográfica y de acuerdo con las personas que asesoraron el proyecto. (Batic y Wainsztein, 1974); (Conjeaud, 1980); (George, 1980); (Philleo, 1982); (Carbone, 1989); (Del Vasto y Mejía, 1990, 5).

Simultáneamente los ataques en la sustancia preparada se tuvieron probetas que sufrieron los ciclos de ataque con agua potable y otras que se mantuvieron todo el tiempo en ambiente de curado, también en agua potable.

#### 4.8 CICLOS DE ATAQUE

Los ciclos a los que fueron sometidas las probetas fueron diseñados con base en la bibliografía disponible, así como en la opinión de investigadores de los problemas de la corrosión (Gustavo Roca en Sika Andina y José Gabriel Gómez en la Universidad Nacional de Bogotá). Este último ha adelantado diferentes estudios utilizando procedimientos similares para evaluar comportamientos de mezclas, básicamente ante sulfatos y ácidos.

Consistió el ataque en la permanencia durante cuatro días de las probetas ya fuera en la sustancia de ataque (agua de mar preparada) o en el ambiente patrón (agua potable), para luego ser extraídas, secada al horno por 24 horas. La temperatura que se prefijó fue de 80 °C; pero la dificultad de control debido a los hornos usados permitió que, aunque el monitoreo fuera casi permanente, se llegara en ocasiones a 110 °C -cabe anotar que Ardila y Tsuchiya, en su proyecto realizado bajo la dirección de Gómez emplearon este último valor de temperatura de secado (Ardila y Tsuchiya, 1991)-.



Posteriormente al secado se procedió al cepillado de todas las caras de la probeta mediante una pasada con cepillo de cerdas de acero.

De cada tipo de probetas y para cada tipo de ambiente se tomaron seis elementos de los cuales se hizo un seguimiento continuo consistente en tomarles su peso seco superficialmente antes de entrar a secado en el horno y en medir igualmente sus dimensiones y peso, luego de salir de la etapa de secado, antes de ser cepillados.

Luego de ser sometidas al cepillado las probetas regresaban al ambiente de saturación correspondiente para completar así un ciclo de ataque. El ataque simulado consistió en la repetición continua de los ciclos, completándose un total de entre 24 y 28, con una interrupción de una semana (entre los ciclos 16 y 18 de acuerdo al tipo de mezcla) por problemas de orden operativo.

El tiempo de saturación en los ambientes seleccionados fue determinado previamente en cuatro días mediante el seguimiento del peso de una probeta hasta el momento en que no se observó mayor variación de su medida. En esta decisión también se tuvo en cuenta el número de probetas a someter y la disponibilidad de espacio (particularmente en los hornos) para permitir el desarrollo continuo del ensayo para los diferentes tipos de mezclas ensayadas. El uso de los hornos se llevó a cabo de la forma óptima posible, guardando una holgura de tiempo para permitir el descanso y mantenimiento de los mismos, ya que fueron duramente exigidos.

El hecho de no existir ensayos normalizados ni mucho menos conocerse patrones con que comparar y evaluar el ataque marino determinó la importancia de mantener igual número de especímenes en la sustancia de ataque y en un ambiente llamado patrón que consistió en el mismo ciclo de sometimiento salvo que para este caso no se empleó agua de mar sino agua potable. Esto dió posibilidad a la comparación para evaluar los efectos del agua de mar preparada.

#### **4.9 ENSAYOS**

El objetivo del estudio fue medir parámetros que pudieran ser síntomas de la mayor o menor capacidad del concreto para soportar los ataques simulados del medio marino. Desde ese punto de vista habría sido deseable tomar medida de ciertas características como, por ejemplo, la permeabilidad. Esta pretensión, al igual que el resto de la investigación, debió ajustarse a las posibilidades técnicas, económicas y de tiempo con que se contó.

Al momento de la elaboración de los especímenes se les midió el contenido de aire por el método de la presión, el asentamiento (manejabilidad) y el peso fresco de un volumen conocido de mezcla. Se midió también, a los siete días de fabricación y después de un curado en agua potable, la resistencia a la compresión de tres cilindros de cada tipo de mezcla.

Además de las pruebas al concreto fresco se llevó a cabo una serie de ensayos dirigidos a seguir el comportamiento de las diferentes mezclas ante el ataque a que se sometieron.

En principio se realizó un seguimiento del peso de las probetas y de sus dimensiones mediante su medición durante los ciclos de ataque. Las muestras fueron pesadas antes y después de ser introducidas en el horno para su secado, con una precisión de 0.01gr. Para esto se destinaron doce especímenes de cada tipo. Estas medidas tuvieron lugar hasta el final de los ensayos (entre 26 y 28 ciclos). De igual forma, luego del proceso de cepillado se procedió a tomar tres mediciones del diámetro y de la altura de cada una de estas doce probetas, de las cuales seis eran atacadas por el agua de mar preparadas y las seis restantes sufrían un proceso similar, siendo su saturación en agua potable (estas últimas se han denominado patrones o probetas sometidas a ambiente patrón).

Por otra, parte se practicaron pruebas de resistencia a la compresión a los siete y entre los veinticuatro y veintiseis ciclos a tres probetas de cada tipo de mezcla y de cada uno de los ambientes (agua de mar preparada y patrón). La cantidad proyectada de ensayos de tipo destructivo obligó a la fabricación de al menos cuarenta muestras de cada especie para someter la mitad al ataque con agua de mar y la mitad al ataque con agua potable (patrón), dejándose, incluso, disponible un número de probetas extra para la eventual continuación del proyecto.



Inicialmente se proyectó realizar pruebas cualitativas in situ de algunas propiedades químicas importantes, a saber: pH (con fenolftaleína) y cloruros penetrados (con nitrato de plata). Estas pruebas se desecharon luego de un primer intento porque en los estados tempranos, cuando se realizaron, no arrojaron resultados apreciables, aptos para comparar las diferentes mezclas (para observar un cambio en el pH según la prueba con fenolftaleína, éste tendría que haber descendido mucho -debido al rango en que trabaja la misma-, lo que no tenía lugar en el proceso de ataque practicado; por otra parte, el nitrato de plata aplicado directamente al espécimen no registra cambios sustanciales entre las mezclas y sufre una rápida oxidación pasando rápidamente del color blanco -indicativo de cloruros- a un color marrón.

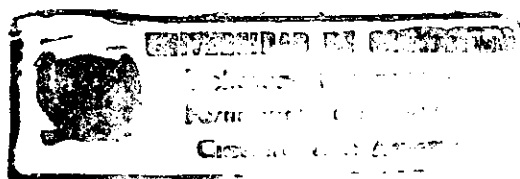
Al cumplimiento de dieciocho ciclos fue tomada una muestra de cada especie, que había sido sometida al ataque con agua de mar simulada, para medir su contenido de cloruros y sulfatos totales. El pH, hasta ese momento, no registró mayores cambios. Estas pruebas químicas fueron realizadas en los laboratorios de la planta de SIKA en Bogotá, gracias al apoyo de esta empresa que prestó asesoría y permitió el uso de sus instalaciones de laboratorio, así como de sus técnicas de ensayo. Se determinaron las concentraciones de cloruros totales y sulfatos totales de las probetas ensayadas, lo que debía ser índice de la susceptibilidad de las diferentes mezclas a ser penetradas. Los procedimientos aplicados son propiedad de SIKA.

Adicionalmente a esta serie de experimentos existía interés en encontrar otras pruebas que permitieran seguir de cerca el comportamiento de los especímenes y que dieran cuenta del estado al interior de los mismos. Las pruebas de ultrasonido cumplían los anteriores requisitos y tenían la ventaja adicional de ser ensayos no destructivos, que probablemente permitirían en un futuro la realización de ensayos mas económicos y seguimientos mas exactos de unas muestras determinadas. Mirando hacia esta posibilidad, con la colaboración del ingeniero César Pereira -asesor de este estudio- se realizó una prueba de velocidad de pulso ultrasónico sobre las seis probetas de cada tipo de mezcla y cada ambiente de sometimiento destinadas para las medidas de pesos y dimensiones.

El estudio descrito fue acompañado por un seguimiento de la apariencia externa de las probetas a través de la observación constante de las mismas y de un registro fotográfico del estado de las muestras y de los detalles del proceso en cuanto se juzgó necesario.

SERIE	REL. A/C	CEMENTO Kg/M <sup>3</sup>	Aire Medido	Silica Aer-D	Plastiment VZ	Grava Kg/M <sup>3</sup>	Arena Kg/M <sup>3</sup>	Agregado Cemento
100	0.42	450	1.93%	0.00%	1.00%	823.30	823.30	3.66
200	0.63	300	1.50%	0.00%	1.00%	883.10	883.10	5.89
300	0.42	450	4.10%	0.50%	1.00%	804.22	804.22	3.57
400	0.42	450	6.60%	1.20%	1.00%	772.40	772.40	3.43
500	0.63	300	3.50%	0.35%	1.00%	864.02	864.02	5.76
600	0.63	300	5.60%	0.90%	1.00%	832.21	832.21	5.55
700	0.42	450	3.60%	0.32%	1.00%	804.22	804.22	3.57
800	0.42	450	5.80%	1.08%	1.00%	772.40	772.40	3.43
900	0.42	450	1.70%	0.00%	1.00%	823.30	823.30	3.66

Tabla No. 2. Tipos de Mezclas Elaboradas Para Ensayos



## 5. RESULTADOS Y OBSERVACIONES

El número de los experimentos realizados llevó a la obtención de una gran cantidad de información. Debido a su gran extensión, se decidió presentar los datos recopilados en forma de gráficos y no como valores numéricos en tablas, las que serían interminables y de difícil lectura; más apropiada es la observación de los resultados en forma gráfica de manera que se aprecien tendencias y valores óptimos en forma rápida y directa.

Hasta cuánto pueden las variables medidas ser indicativos del estado de las probetas ensayadas y , en general, de la durabilidad del concreto? Es ésta una pregunta difícil de responder. Los cambios de peso en las probetas atacadas, por ejemplo, pueden deberse al ingreso de sustancias extrañas al hormigón o, de manera distinta, a pérdidas de material debidas su debilitamiento, siendo estos síntomas, aparentemente opuestos, indicativos de un mismo proceso de deterioro. Es de aceptación general que los especímenes atacados han de sufrir una densificación inicial por el ingreso de sales, para ceder luego a las presiones internas que éstas generan al cristalizar. Las medidas

de resistencia a la compresión y velocidad del pulso ultrasónico pueden verse afectadas por este tipo de reacciones arrojando resultados contradictorios.

De cualquier modo, estas preguntas son precisamente la razón para realizar estudios de esta especie que, aún sin pretender dar respuestas definitivas al problema, persiguen arrojar luces sobre los interrogantes que genera la corrosión del concreto en el medio ambiente marino.

Los resultados de las pruebas deben ser vistos en conjunto para poder así, asociando diferentes indicios, entender qué es lo que ocurre a las probetas ensayadas en su interior. A continuación se presentan en forma aislada para facilitar su análisis, pero haciendo constantemente referencias y paralelos con los demás ensayos. Estos resultados parecerán en ocasiones paradójicos y algunos planteamientos sólo quedarán expuestos en espera de explicación o futuras comprobaciones -el tema es aún objeto de estudio por parte de numerosos investigadores e instituciones-; en algunos casos puede que surgan incluso más preguntas que respuestas.

## **5.1 PROCEDIMIENTO**

Un elemento importante del estudio es determinar la posibilidad real de implementar ensayos que en corto plazo representen lo que le ocurre a las estructuras de concreto en los ambientes marinos. El procedimiento empleado evidencia de hecho la

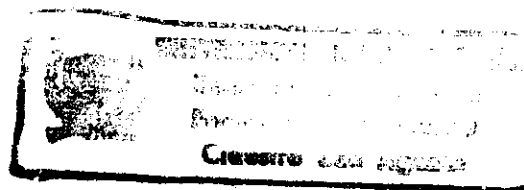
capacidad de los concretos de soportar condiciones adversas del medio -posiblemente demasiado adversas en algunos casos- lo que por si mismo permite sacar conclusiones acerca de la durabilidad de las estructuras. La gran cantidad de datos obtenidos proporciona, además, confiabilidad a las tendencias generales y a los fenomenos registrados.

En los ensayos efectuados se presentaron algunas dificultades, particularmente en el control exacto de las temperaturas de secado, lo que no deja de afectar cualquier comparación entre los diversos tipos de mezclas estudiadas, ya que las condiciones de exposición no fueron estrictamente las mismas. En lo posible se tendrá en cuenta esta variabilidad de condiciones que si bien fue leve no es deseable en este tipo de estudios.

Es posible, por otra parte, que las altas temperaturas de secado hallan tenido efectos sobre los especímenes, que no son propios de los ambientes marinos naturales.

El patrón de reacciones evidenciado durante el proceso es, sin embargo, muy similar al esperado de acuerdo a la teoría encontrada:

- Obscurecimiento inicial en la superficie del concreto (Foto No. 21, Anexo A).
- Posterior aparición de una capa blanquecina recubriendo las probetas, indicativa de la fijación de aragonita en su superficie (Foto No. 23, Anexo 1), a la vez que una



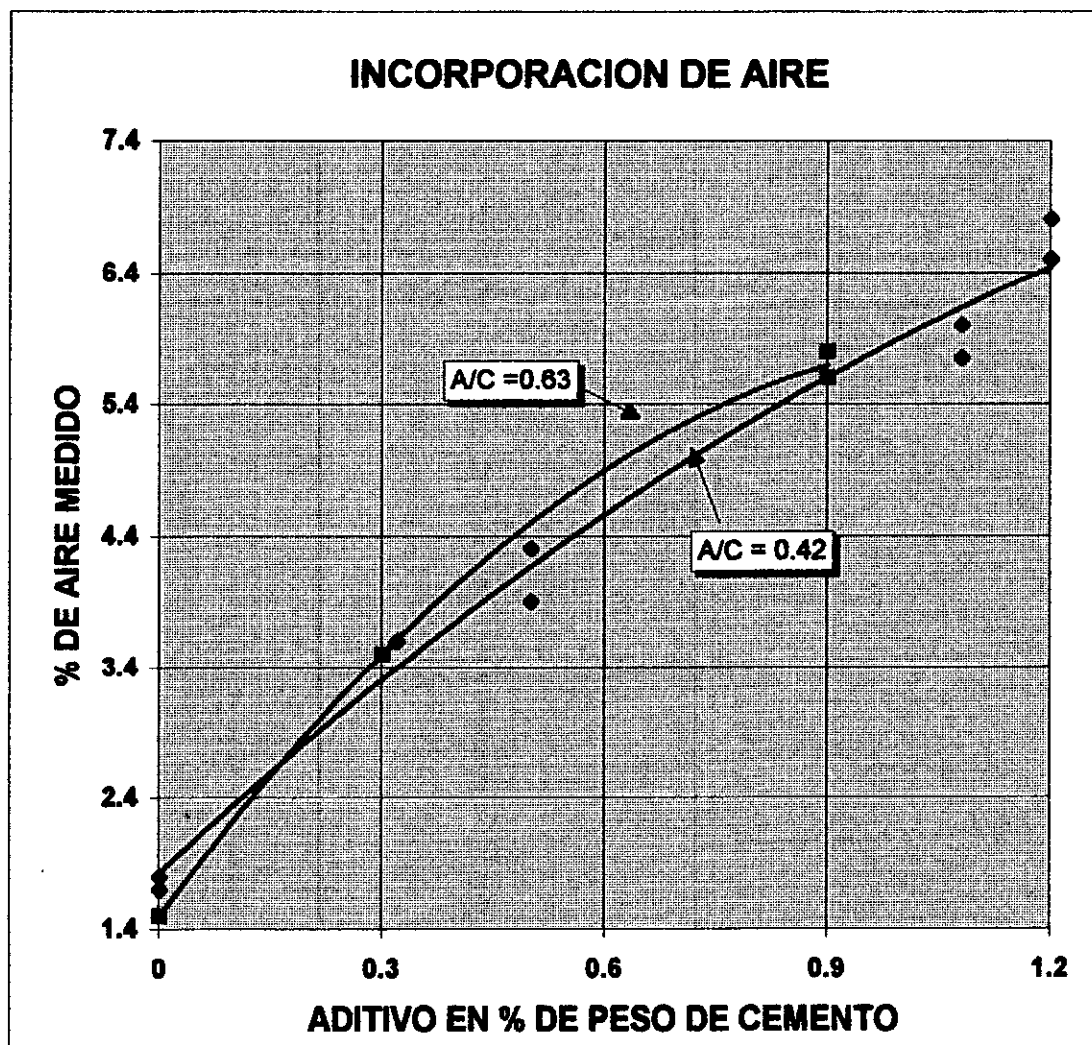
sensación aceitosa al tacto, por la transformación de la cal en hidróxido de magnesio.

- La presencia de incrustaciones de sales al exterior de los especímenes corrobora el ingreso y ataque de las sustancias propias del medio marino (Foto No. 22, Anexo A).

## **5.2 CARACTERISTICAS INICIALES**

**5.2.1 Inclusión De Aire** La incorporación de aire al concreto se vio afectada por muchas y muy diversas variables, lo que dificultó la obtención de las cantidades exactas que se buscaban. Los parámetros que más influyeron en el aire incluido en las mezclas fueron, en primer lugar, la cantidad de agua utilizada en el amasado y, por consiguiente, la humedad de los agregados, la granulometría de los mismos y las proporciones de agregados grueso y fino, adicionalmente muchos otros factores se hicieron sentir, incluso algunos no esperados como el tipo de mezclado y la cantidad de concreto preparada.

Una vez se dejaron fijas las variables involucradas en cuanto fue posible -como ya se ha explicado- se encontró que, para las condiciones finalmente impuestas, la relación entre la cantidad de aditivo incorporador utilizada y el contenido de aire resultante era muy directa (ver gráfica 1 ). Este hecho permite intuir que si bien la multiplicidad de



Gráfica 1. Incorporación de Aire



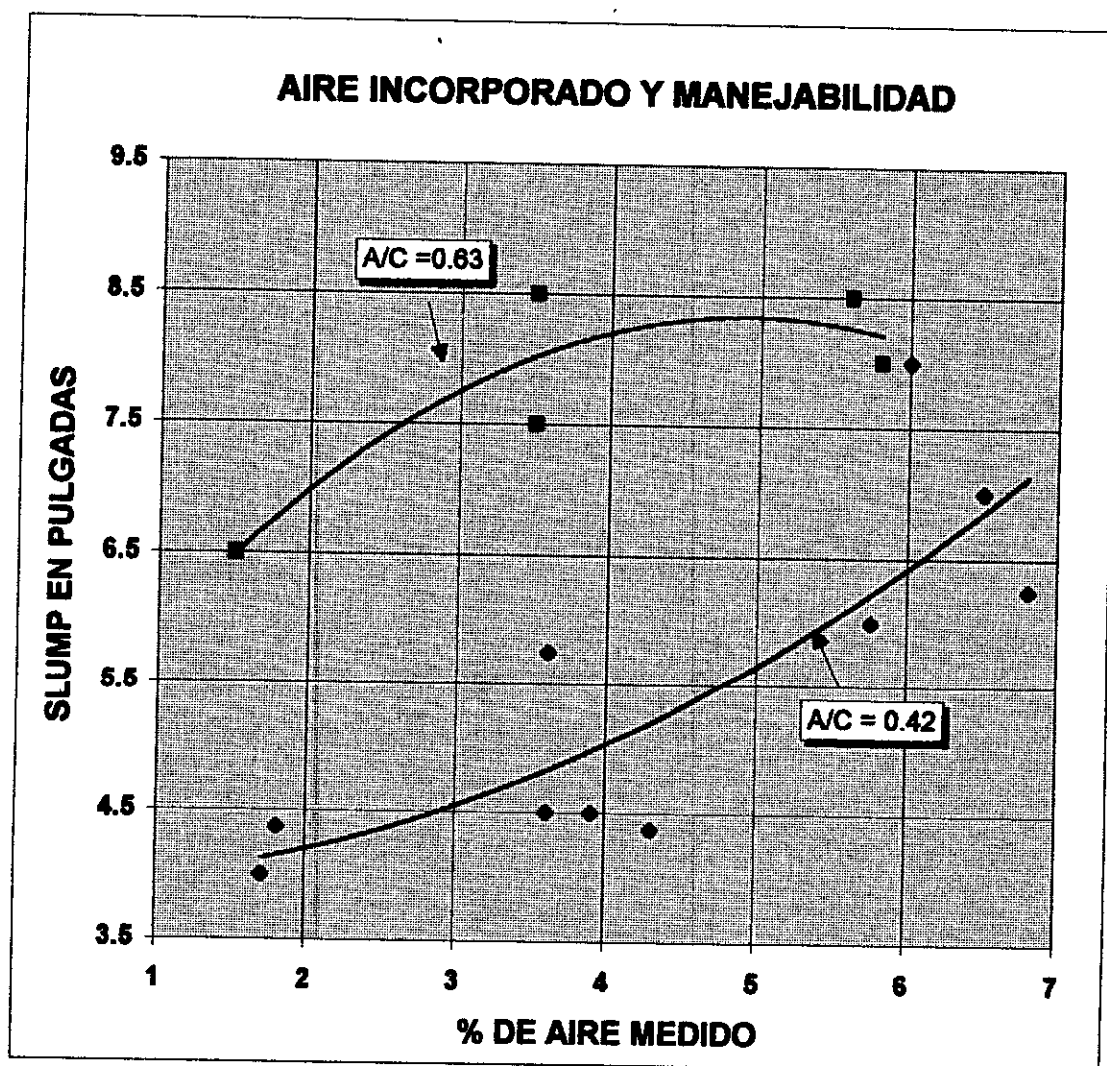
factores que intervienen hace poco manejable la inclusión de aire, esta labor se facilita mucho a través de un estricto conocimiento y control de las condiciones de elaboración de la mezcla.

El contenido de cemento, contrariamente a lo esperado, no fue un factor determinante. La relación aditivo-aire fue casi que lineal para la relación A/C mas baja (0.42). En el caso de la relación A/C de 0.63 la tendencia se pareció mas a una curva logarítmica. Pero ambas curvas aparecen muy cercanas entre sí.

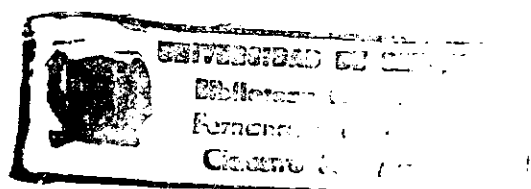
El manejo de la incorporación de aire no deja de ser complicado y es un elemento de cuidado tanto en laboratorio como, más aún, en la producción del concreto en planta.

**5.2.2 Manejabilidad** Como ocurrió también al contenido de aire incluido el comportamiento de la manejabilidad del concreto al incorporar aire a las mezclas fue diferente al obtenido en otros estudios, por ejemplo el de Ardila y Tsuchiya (1991). Esto lleva a pensar que los concretos elaborados con materiales y en condiciones distintas no solo permiten incluir diferentes cantidades de aire sino que responden de manera distinta a esta práctica.

En la gráfica 2 aparece claramente como la inclusión de aire aumenta la manejabilidad del concreto. Este efecto es mayor para la mezcla de relación A/C de 0.42.



**Gráfica 2. Manejabilidad**

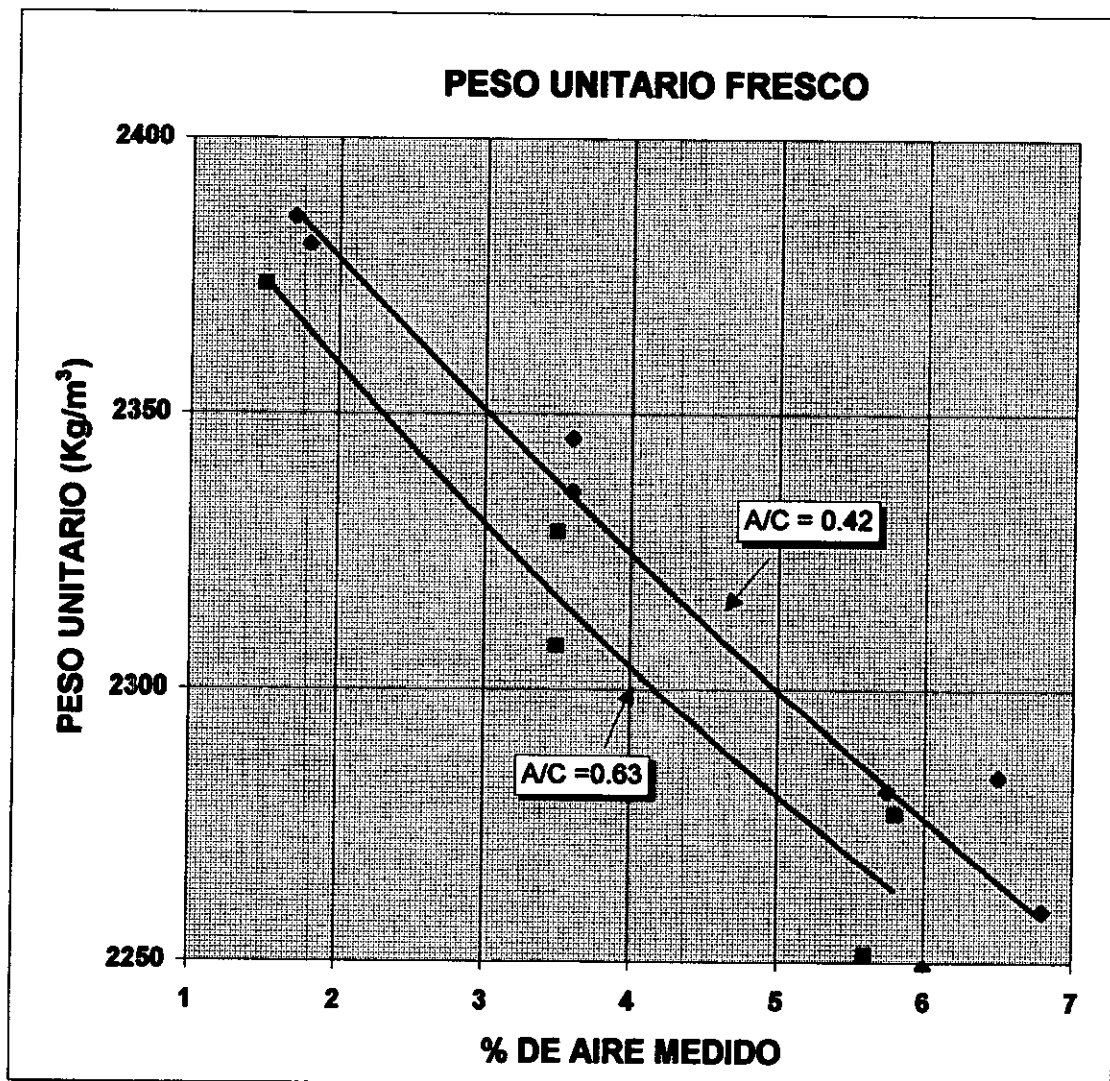


Para la relación A/C de 0.63 el incremento de manejabilidad observado con la inclusión de aire fue menor ya que esta mezcla era bastante manejable de por sí. Al parecer existe un valor asintótico para la manejabilidad de las mezclas como se aprecia en la gráfica 2 para las de relación A/C de 0.63. Esto explica los mayores efectos del aire sobre la manejabilidad de la mezcla más seca; la influencia de la relación A/C en esta propiedad es innegable.

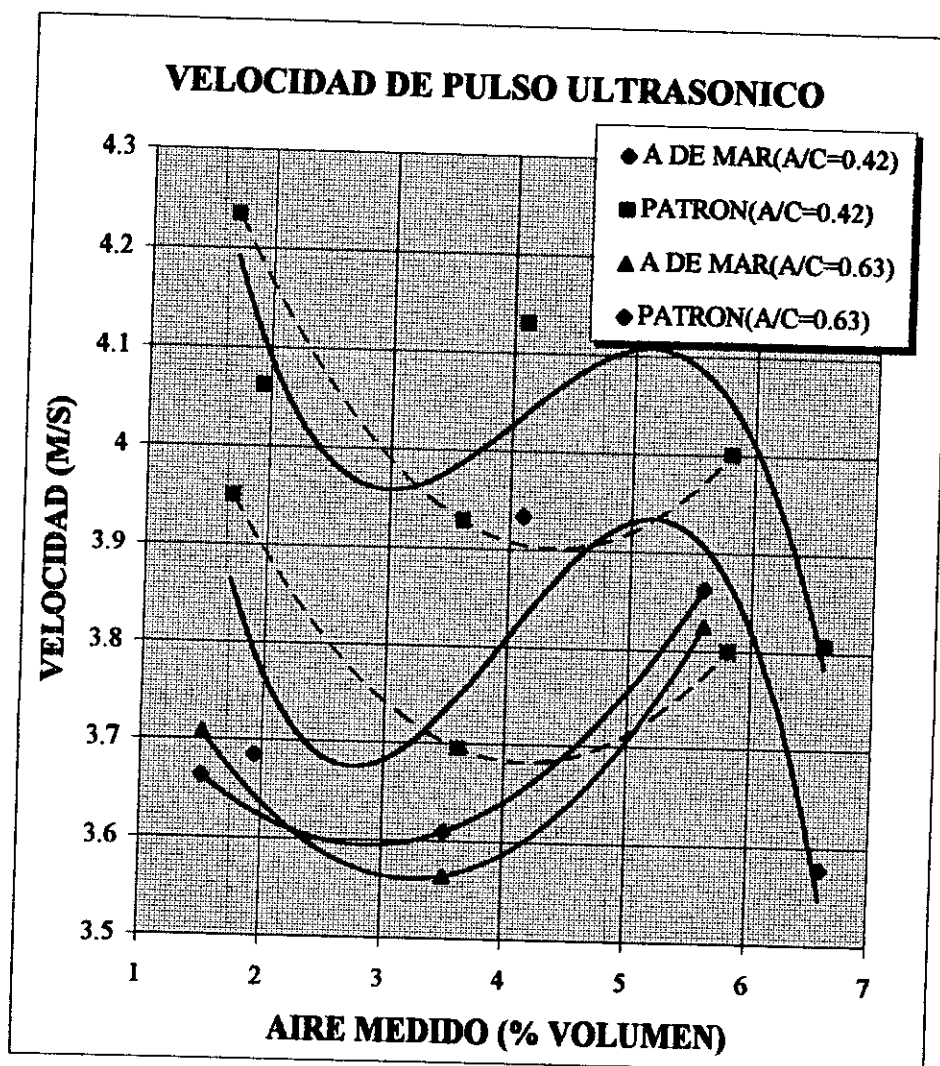
**5.2.3 Peso Unitario Fresco** El contenido de aire de la mezcla afecta de manera importante su peso unitario fresco, como se puede ver en la gráfica 3. La forma como se presenta esta influencia fue bastante similar para ambas relaciones A/C estudiadas: el peso unitario fresco disminuyó de manera lineal cuando se aumentó el contenido de aire del concreto, siendo el porcentaje de peso perdido de la misma magnitud del incremento del porcentaje de aire en la mezcla.

### **5.3 PULSO ULTRASONICO**

Sin importar en qué medio se halla realizado el ataque (en agua potable o en agua preparada de mar) se observa que la velocidad de pulso ultrasónico sigue un patrón de comportamiento definido con respecto al porcentaje de aire en la mezcla, así como a su relación A/C.



**Gráfica 3. Peso Unitario Fresco**



**Gráfica 4. Velocidad de Pulso Ultrasónico vs Aire Medido**

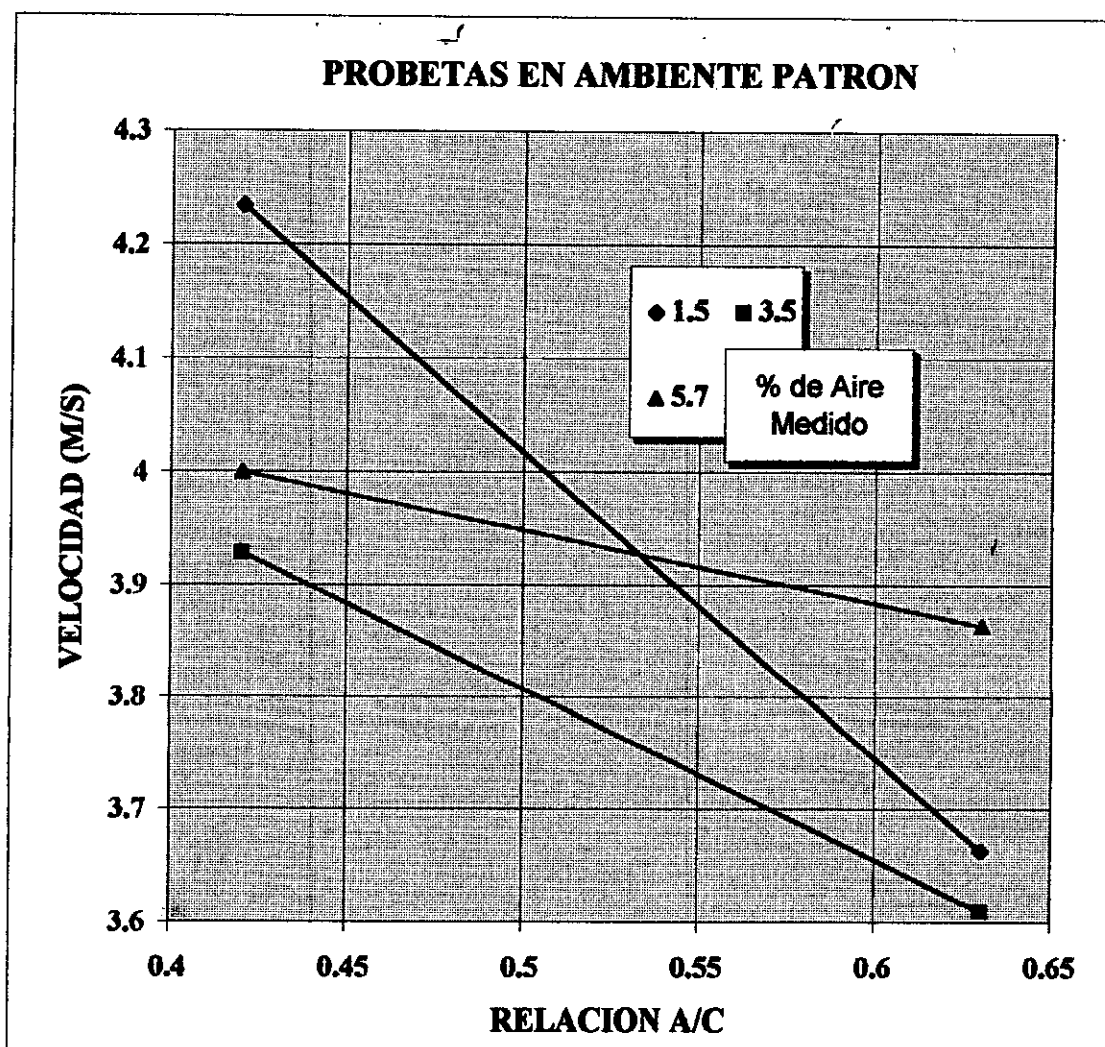
En la gráfica 4 se presenta la relación entre el porcentaje de aire en volumen de la mezcla y la velocidad de las ondas de ultrasonido a la edad de dieciocho ciclos. La tendencia del comportamiento es bastante similar para los dos ambientes de ataque (patrón y agua de mar simulada) en ambas relaciones A/C, apareciendo como curvas desplazadas una de la otra pero que siguen un mismo patrón. Para la relación A/C de 0.63 el desplazamiento de la curva de las probetas en agua de mar con respecto a la de agua potable es menor que en la relación A/C de 0.42. Esto puede significar que, paradójicamente, por lo menos a partir de su comparación con las probetas sometidas al ambiente patrón, las de relación A/C de 0.63 han sido menos afectadas por el agua de mar que las de A/C 0.42; o bien que las probetas de relación A/C de 0.63 han sido atacadas en agua potable casi tanto como en el agua de mar, lo que no ocurre en la otra relación A/C estudiada.

De la observación de las curvas se puede decir que en general las probetas de relación A/C 0.42 se encontraban más sanas y fuertes que las de A/C 0.63, y que las sometidas a ambiente marino simulado han sido más atacadas que las sometidas al patrón (ciclos en agua potable). El estado de todas las probetas hasta el momento del ensayo (18 ciclos) puede considerarse bueno.

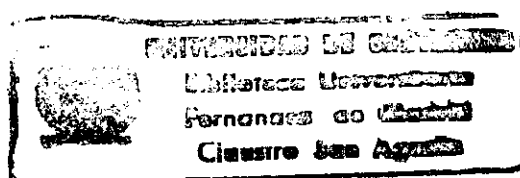
En cuánto y cómo varían las condiciones de los especímenes a lo largo de los ciclos? Esto sólo se podría contestar realizando seguimientos mas continuos que, por otra parte, darían mejor cuenta de la utilidad y posibilidades de aplicación del ensayo.

El pulso ultrasónico registró diferencias entre las probetas sometidas al ambiente patrón y al agua de mar, las que son leves para la relación A/C de 0.63 y mas notorias para la relación A/C de 0.42. Aparece como dato interesante que, con contenidos de aire entre 5 y 6%, la velocidad de pulso ultrasónico registra un mejor comportamiento en las mezclas con relación A/C de 0.63 que en aquellas con A/C de 0.42. Este hecho curioso se repite en los ensayos químicos de contenidos de cloruros totales y es algo que requiere un estudio mas profundo. La mezcla de 5.6% de aire y relación A/C de 0.63 tuvo en general un buen desempeño.

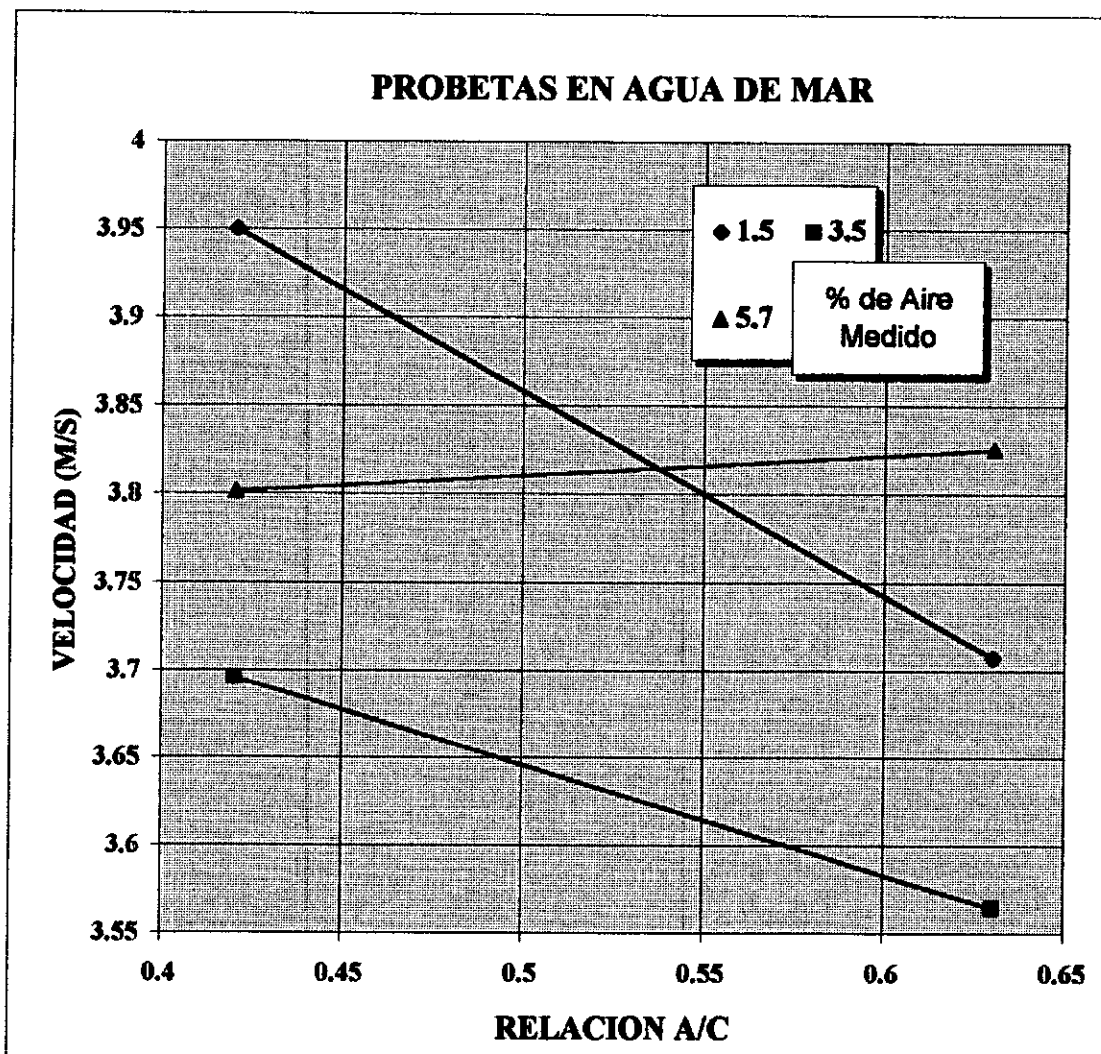
El comportamiento del pulso ultrasónico, a medida que se incrementa el contenido de aire incorporado al concreto, sigue una tendencia bastante coherente y lo sería aún más si de las muestras con relación A/C de 0.42 se consideraran sólo aquellas con contenidos de aire similares a las elaboradas con la relación A/C de 0.63 (líneas punteadas en la gráfica 4). Estas tendencias muestran la posible existencia de contenidos de aire inconvenientes para la durabilidad del concreto (alrededor de 3.5%) con los cuales las probetas resultarían menos densas y mas vulnerables a los ataques aplicados. Para dichos contenidos de aire se observó que en ambos ambientes de sometimiento y para las dos relaciones A/C la velocidad del pulso ultrasónico tomaba valores mínimos, siendo, además, para la relación de 0.63 éste el caso en que la diferencia entre probetas sometidas a agua de mar y a ambiente patrón fue más notable (gráficas 4 y 7). Puede afirmarse que fue esta mezcla la más afectada por el ambiente marino simulado.



**Gráfica 5. Velocidad de Pulso Ultrasónico vs Relación A/C - Patrón**







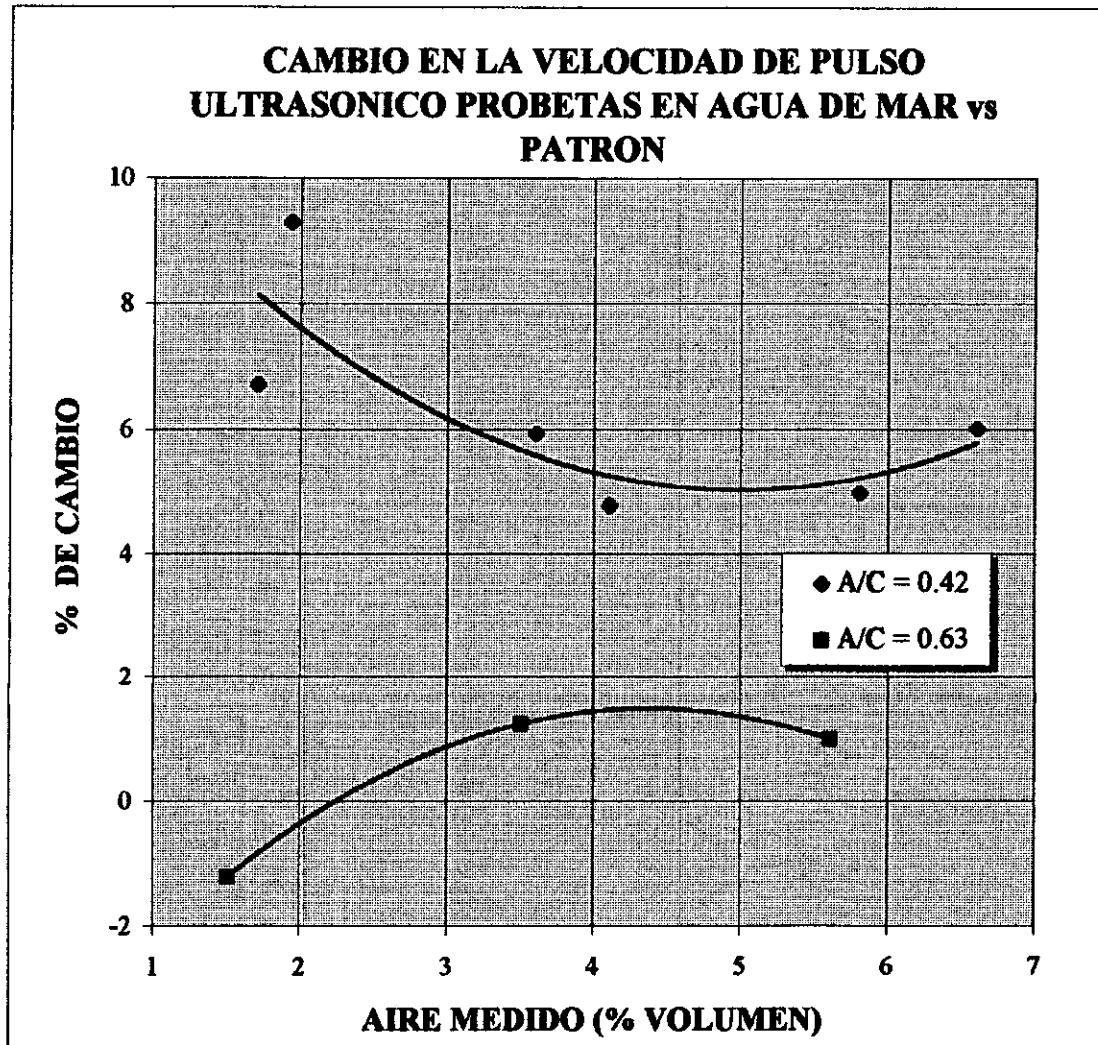
**Gráfica 6. Velocidad de Pulso Ultrasonico vs Relación A/C - Agua de Mar**

Ardila y Tsuchiya encontraron resultados muy similares a los anteriores en sus pruebas de durabilidad ante soluciones de sulfato de magnesio, comprobando que contenidos de aire entre 2.5 y 3% de volumen incrementaban la permeabilidad de las mezclas y las hacían mas vulnerables; si el contenido de aire estaba entre 5 y 7% los resultados eran totalmente opuestos. (Ardila y Tsuchiya, 1991, 125-135) (gráfica 8).

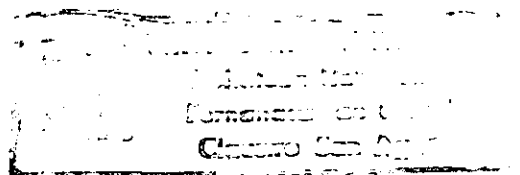
Las mezclas de relación A/C de 0.42 cubren, por su parte, un rango más amplio de contenidos de aire que las otras y registran un descenso drástico en la velocidad de la onda de ultrasonido con contenidos mayores del 6% de aire, lo que plantea la posibilidad de que el aire incorporado en cantidades muy grandes sea tan perjudicial como los contenidos bajos. En la relación A/C 0.63 no fue posible comprobar esto por no haber sido ensayados tales contenidos de aire.

En ambas relaciones A/C existe un contenido de aire que favorece el desempeño del hormigón (entre 4 y 6%), superando incluso, para la de 0.63, el comportamiento de las probetas elaboradas sin incorporador de aire.

Las gráficas 5 y 6 también ilustran lo anterior: entre las mezclas con relación A/C 0.63 el diseño con 5.7% de aire supera los demás, incluso al de relación A/C de 0.42. En esta última relación A/C el mejor comportamiento lo registran las probetas elaboradas sin aditivo inductor (1.5% de aire).



**Gráfica 7. Cambio en la Velocidad de Pulso Ultrasónico**

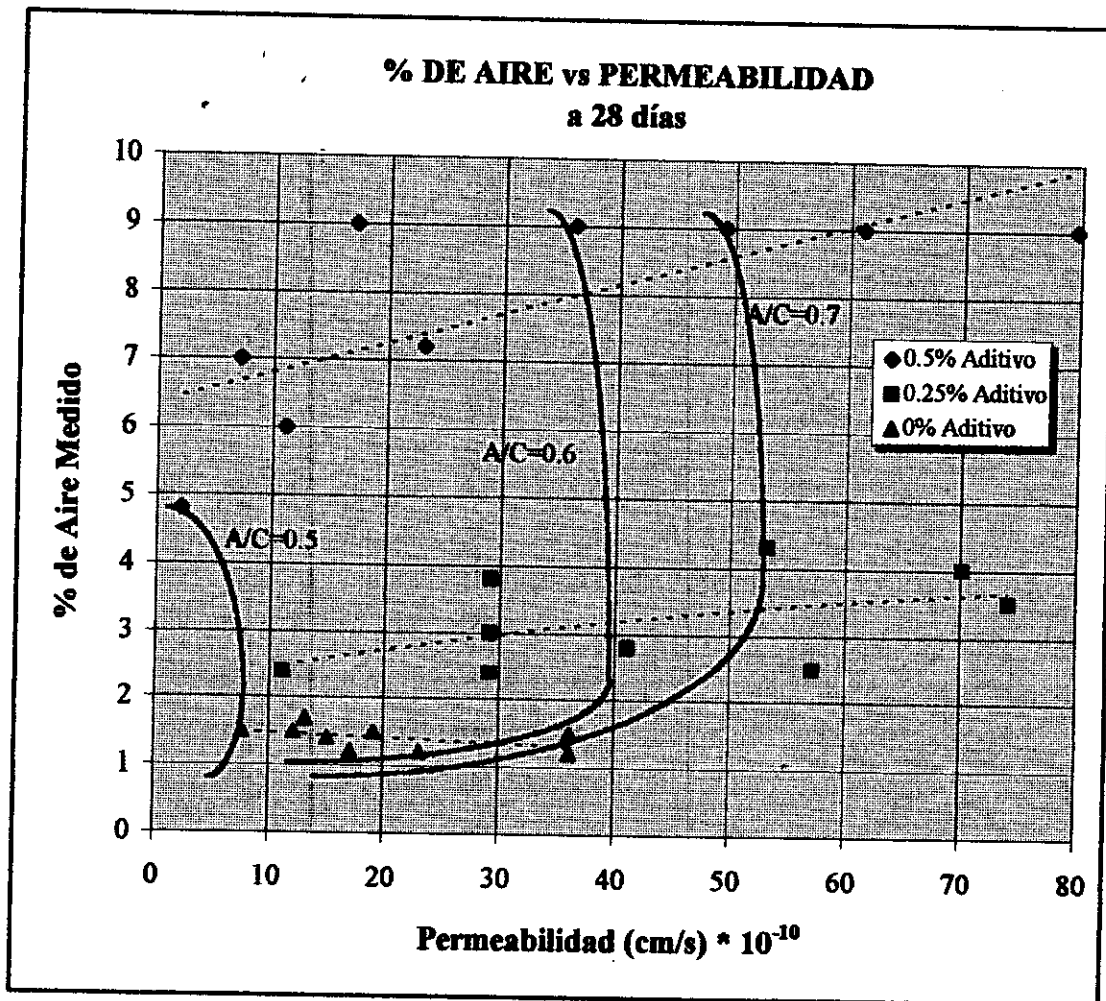


La gráfica 7 muestra las diferencias de velocidad de onda ultrasónica entre las probetas sometidas al agua de mar y al patrón, en términos de porcentaje. El comportamiento es contrario para ambas relaciones A/C: las velocidades son muy parecidas para ambos ambientes y contenidos de aire entre 3.5 y 6.5% salvo que, mientras para las de relación A/C de 0.42 la diferencia de velocidad es alta, en las mezclas sin aire incorporado artificialmente, para la relación A/C de 0.63 ocurre exactamente lo contrario.

Qué significa la tendencia a aumentar o disminuir la velocidad del pulso ultrasónico? Puede ser por una parte signo de la salud de las probetas o de su densificación. El criterio general es que el estado de las probetas es mejor en cuanto sea mayor la velocidad de la onda ultrasónica que pasa a través de ella; en este sentido la inclusión de aire en determinadas cantidades favorece la durabilidad del hormigón, especialmente en las mezclas de relación A/C alta (0.63).

La prueba de ultrasonido ha sido en realidad un ensayo aislado que deja muchos interrogantes por resolver:

Cómo registra el ultrasonido el ingreso de sustancias extrañas al concreto? Cómo es la evolución de la velocidad de la onda ultrasónica a lo largo de los ciclos de ataque y de la vida útil de estructuras? Cómo relacionar estas pruebas con otras?



**Gráfica 8. Permeabilidad vs Contenido de Aire.**

**Tomada de Ardila y Tsuchiya, 1991, 106**

La coherencia interna de los resultados obtenidos y la alta sensibilidad que muestra el ensayo permiten esperar que esta prueba pueda ser usada para obtener resultados confiables y certeros en el estudio futuro de la durabilidad del concreto.

#### **5.4 PESOS**

El seguimiento del peso fue muy estricto, lo que brinda confiabilidad a la información obtenida. Los resultados presentados a continuación para cada tipo de mezcla corresponden al promedio de los datos de seis especímenes. El comportamiento del peso de las probetas presentó tendencias sostenidas durante el tiempo de ensayo para las diferentes mezclas y contenidos de aire.

El comportamiento observado en las muestras debe ser tratado cuidadosamente ya que los procesos de ataque llevados a cabo pueden afectar de formas muy diversas el peso de las probetas, como ya se explicó.

Es preciso anotar aquí que habiendo adolecido el secado de las muestras de ciertas fallas en el control de temperaturas, como se ha dicho anteriormente, las gráficas comparativas (Anexo B) presentan en ciertos ciclos específicos descensos drásticos de los pesos que se salen de la tendencia general. Es el caso, por ejemplo, de las probetas de relación A/C 0.42 y contenido de aire 6.6% sometidas al agua de mar, durante los ciclos veinte y veintiuno, y de las probetas de relación A/C 0.42 y 5.8% de aire,

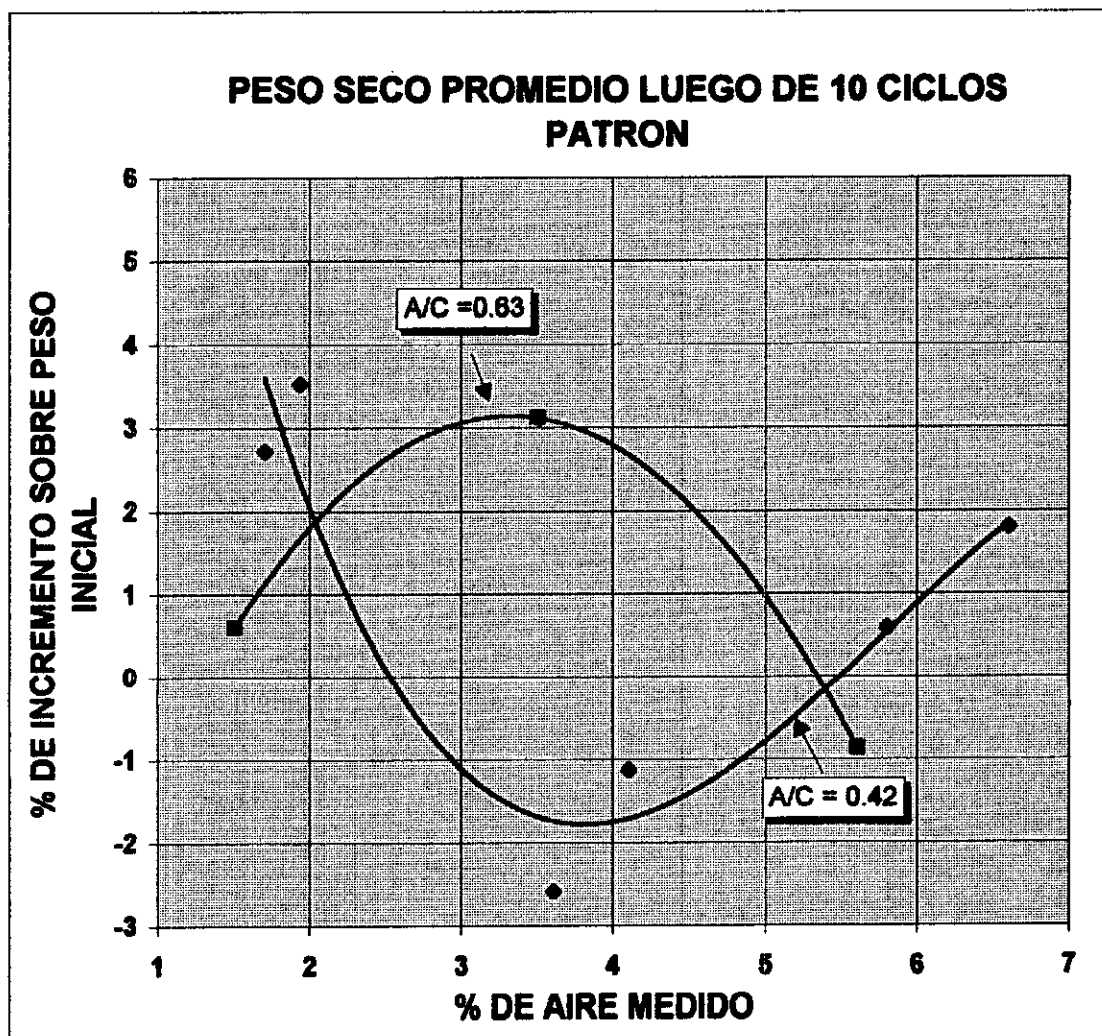
sometidas a agua de mar y ambiente patrón, en los ciclos diecisiete y dieciocho. El análisis y la interpretación de resultados deben tener en cuenta estas situaciones para evitar equívocos. Por otra parte, los resultados permitirán apreciar la conveniencia de haber realizado ensayos en un ambiente patrón (agua potable) al tiempo que en el medio de ataque marino, lo que hizo posible descartar ciertos comportamientos que de otra forma se habrían atribuido a la acción del agua de mar.

En este tipo de ensayos es de uso general tomar los cambios de peso de las probetas con respecto al patrón como indicativo de los daños sufridos a lo largo de los ciclos. Estos cambios se refieren comunmente a pérdidas de material, lo que en la mayoría de los casos corresponde a cambios en la apariencia externa de las muestras, utilizándose como criterio de deterioro la variación de la masa en los especímenes:

$$(MASA\ INICIAL - MASAS\ ACTUALES) / MASAS\ INICIALES * 100$$

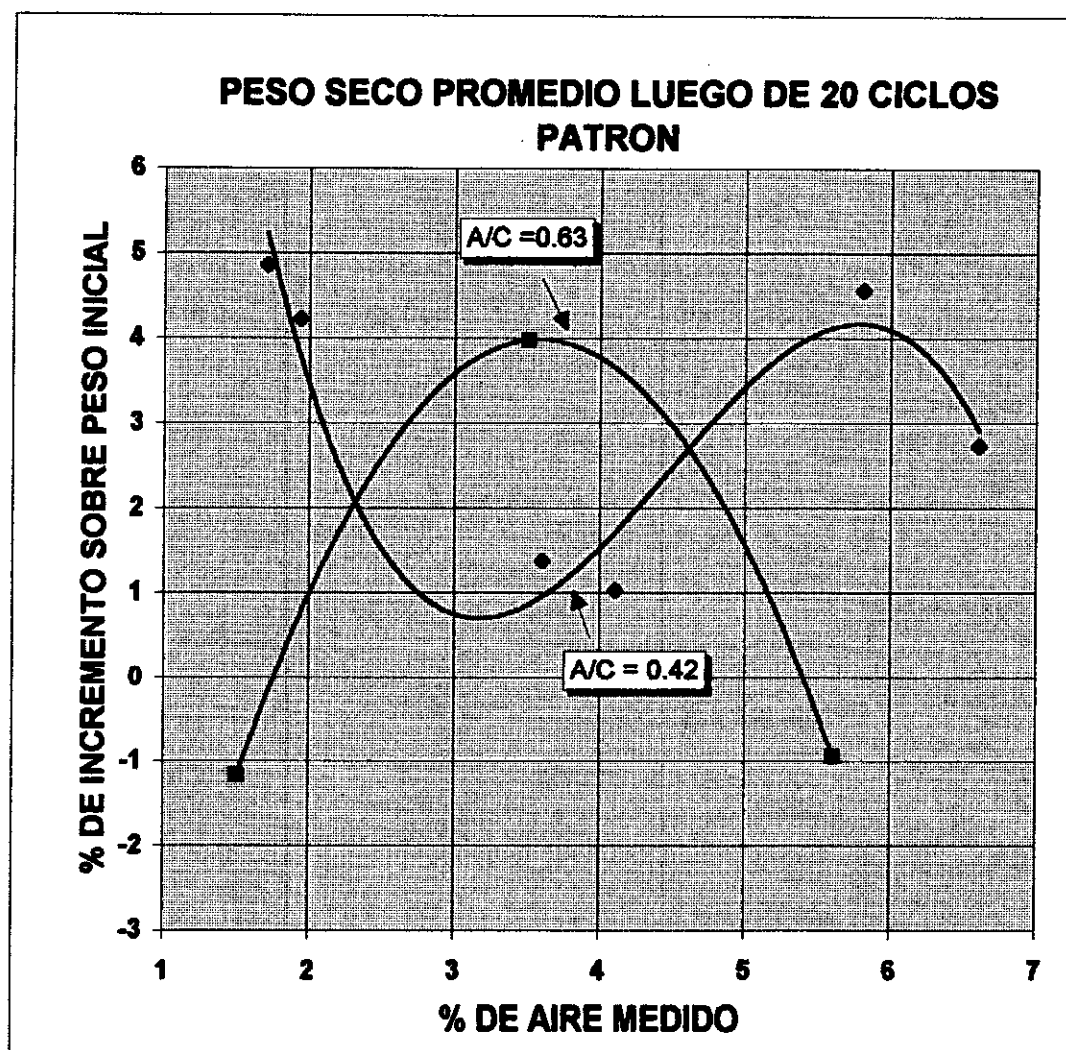
Esta variación es generalmente negativa y representa la pérdida de masa (o peso) de las probetas. (Durning y Hicks, 1991) (Ardila y Tsuchiya, 1991)

Se sabe que en los ataques de sales al concreto se presenta una densificación inicial del material por efecto del ingreso y cristalización de aquellas, que proporciona al hormigón un fortalecimiento y un aumento de peso iniciales. Esto se observó en los ensayos efectuados como puede verse en las Gráficas 8 a 14 y en el Anexo B. Las

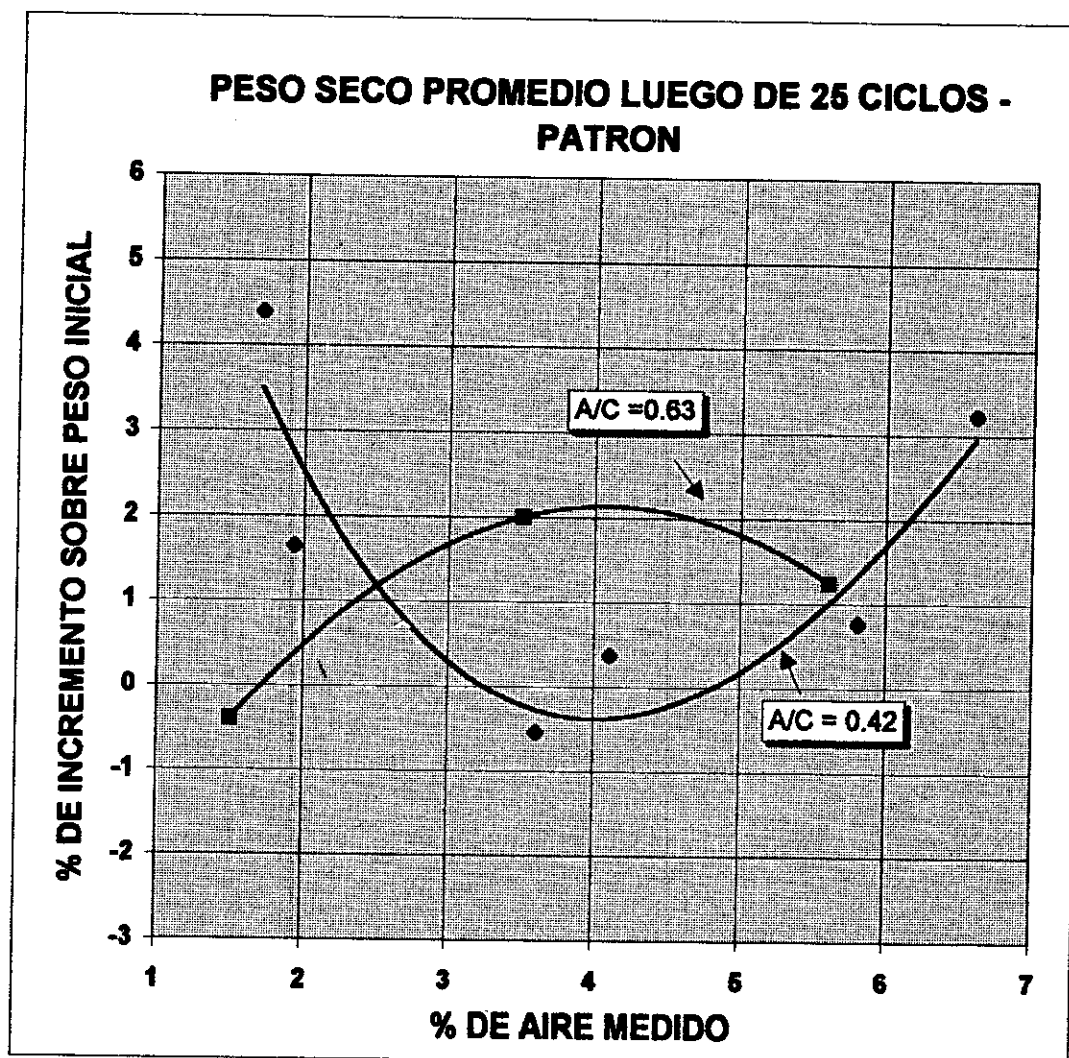


**Gráfica 9. Peso Seco Patrón - 10 Ciclos**

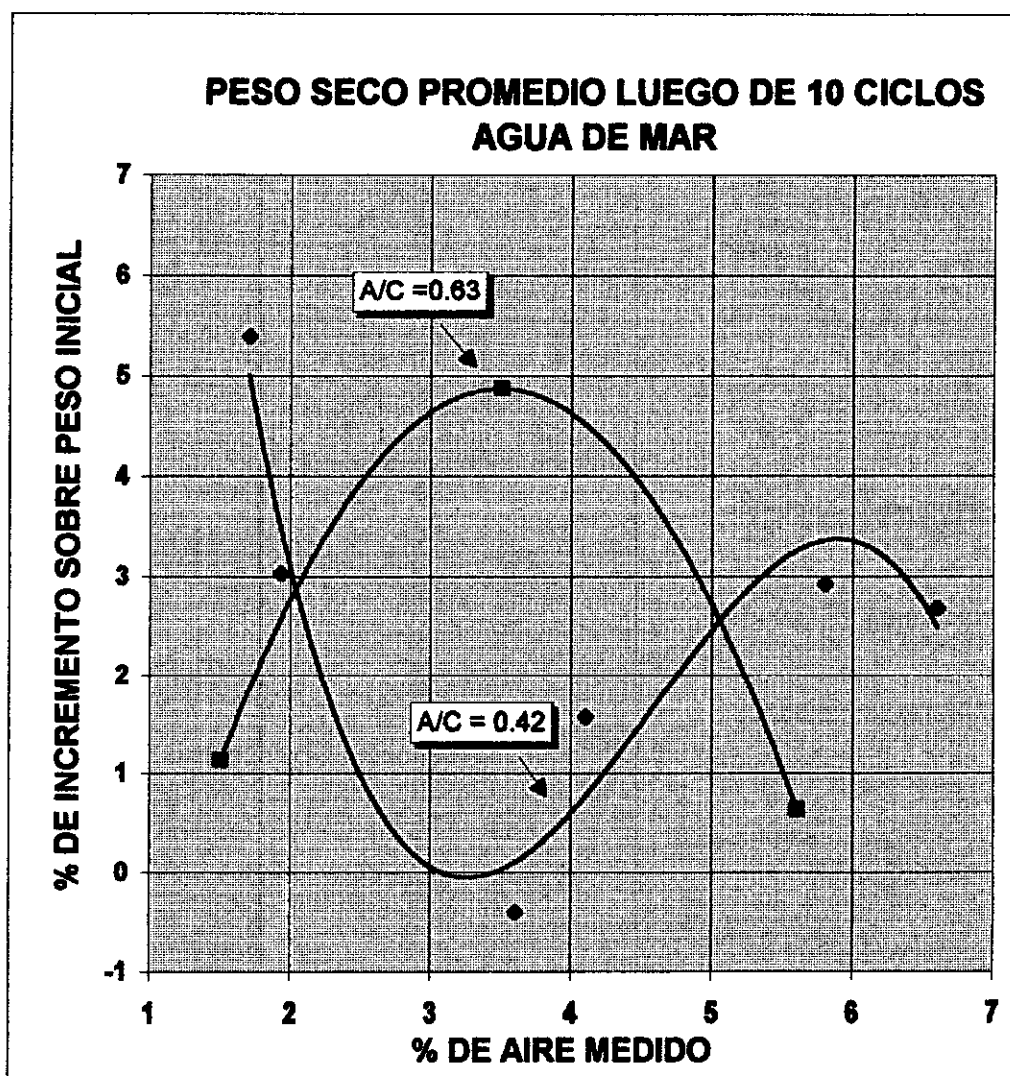




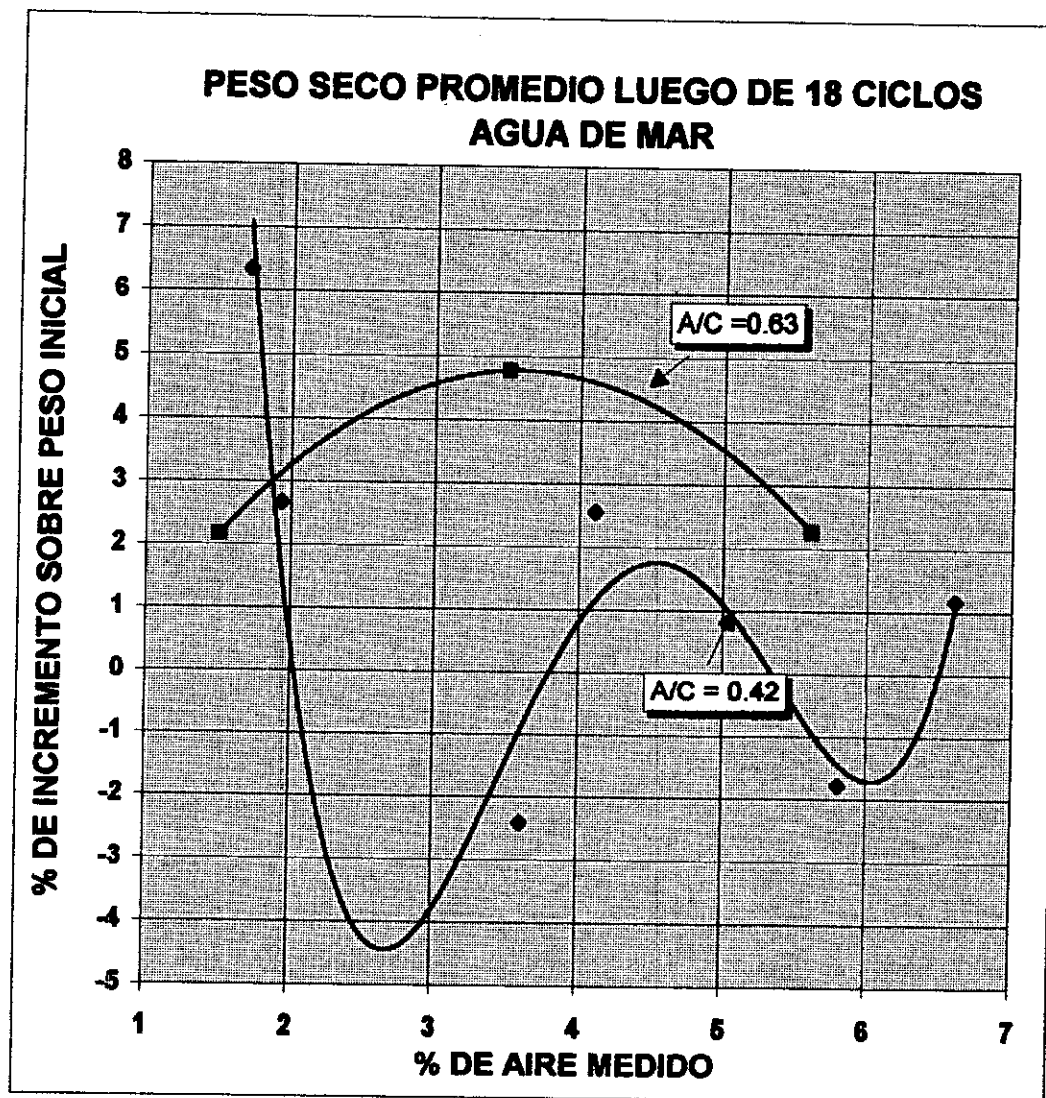
**Gráfica 10. Peso Seco Patrón - 20 Ciclos**



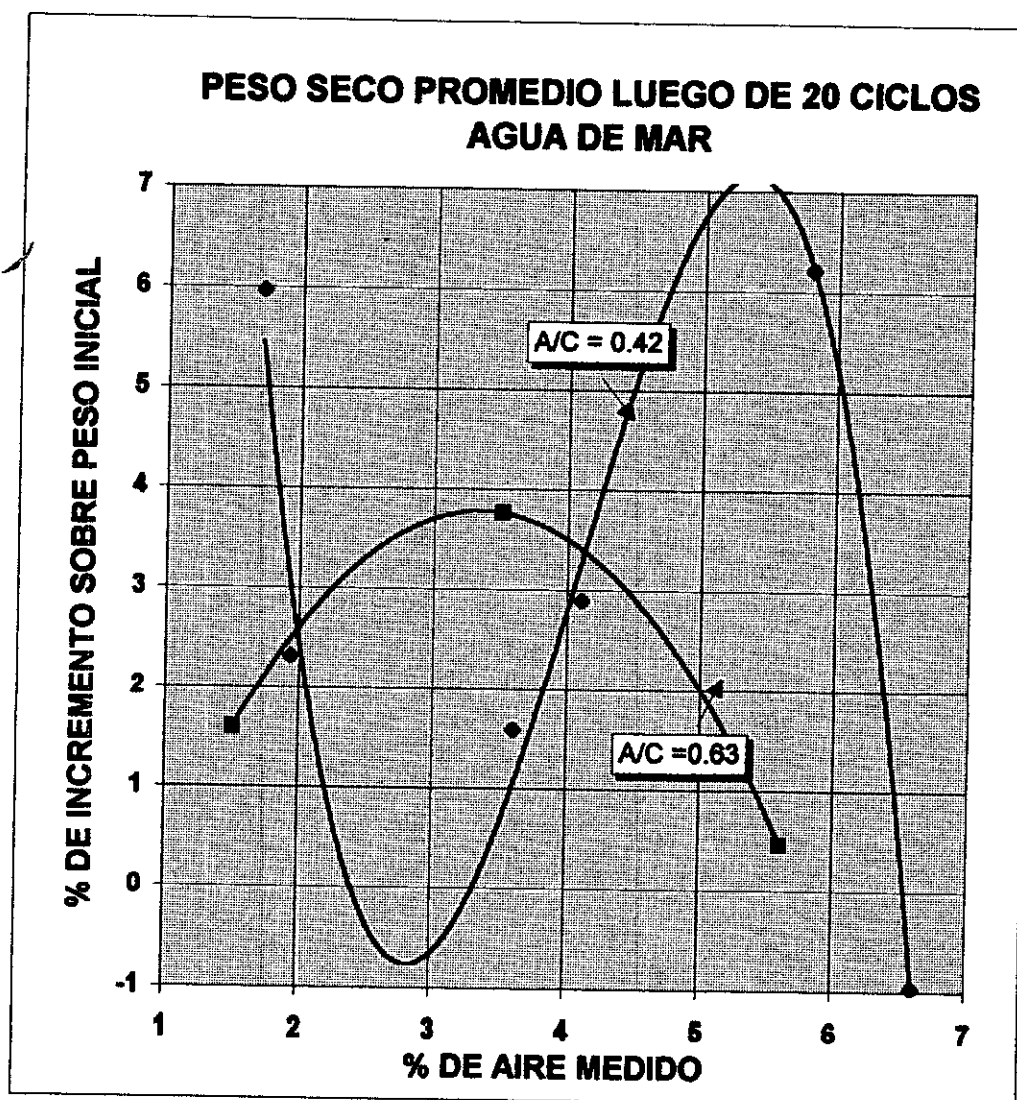
**Gráfica 11. Peso Seco Patrón - 25 Ciclos**



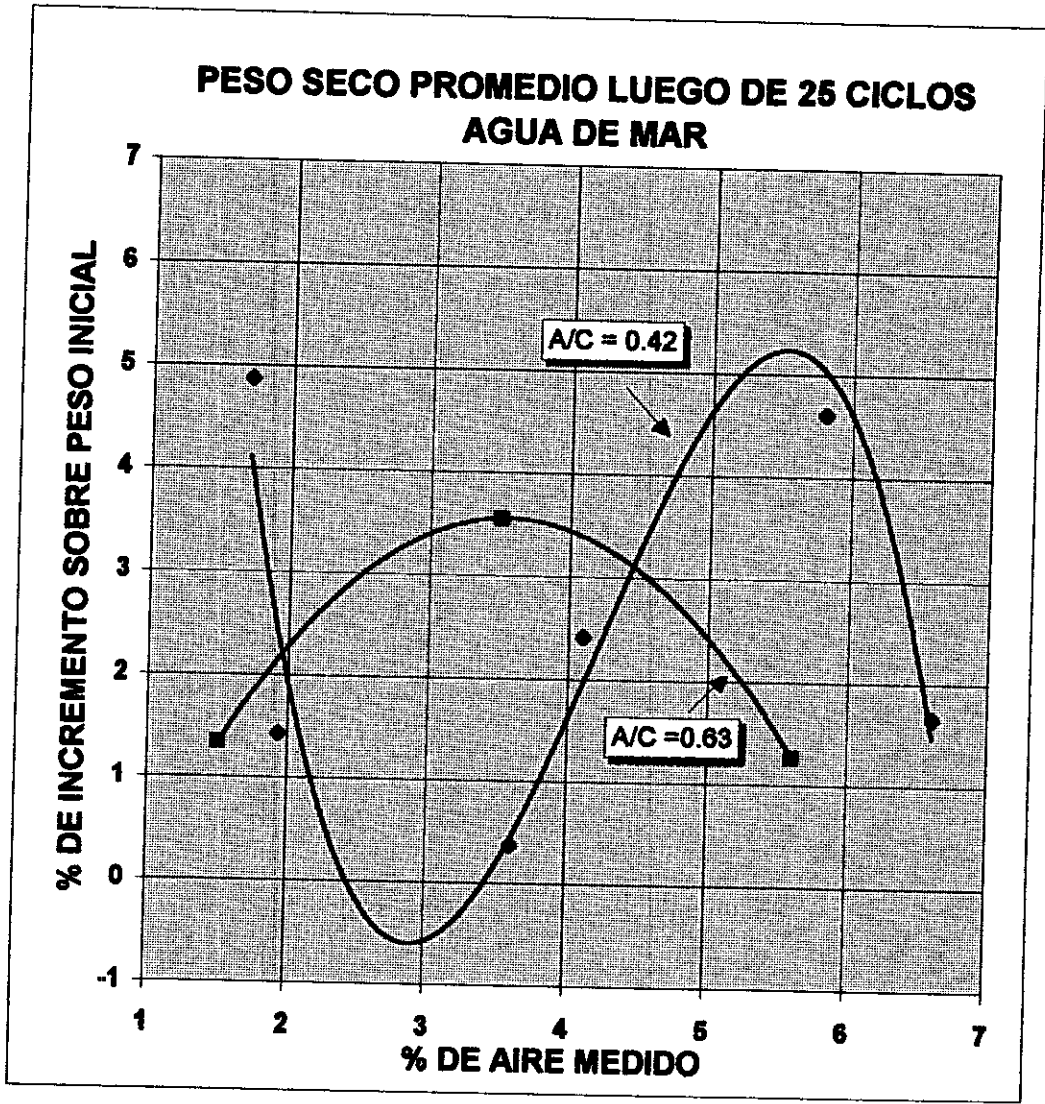
**Gráfica 12. Peso Seco Agua de Mar - 10 Ciclos**



**Gráfica 13. Peso Seco Agua de Mar - 18 Ciclos**



**Gráfica 14. Peso Seco Agua de Mar - 20 Ciclos**



**Gráfica 15. Peso Seco Agua de Mar - 25 Ciclos**

probetas sometidas a ambiente patrón, además, presentaron incrementos de peso similares, aunque en menor grado, en todos los tipos de mezcla ensayados.

Se cree que esta ganancia de peso en las probetas atacadas por agua potable se debió a la continuación, luego de siete y veintiocho días, de los procesos de hidratación de la mezcla, que se interpretó así: el agua que ingresó al concreto durante el proceso de saturación no fue extraída de éste con la misma facilidad en el secado sino que entró a formar cierto tipo de enlaces en su interior, por lo cual se registró una tendencia continua de aumento de peso en las probetas durante los ensayos.

El comportamiento de los pesos secos de las mezclas estudiadas se puede apreciar en el Anexo B (porcentaje de incremento del peso contra ciclos de ataque). Se observa que las probetas de relación A/C 0.63 siguen un comportamiento similar a lo largo de los ciclos, no importando los contenidos de aire incluido, para los que se verifican diferencias en la magnitud mas no en la tendencia general de los cambios de peso: un aumento sostenido hasta el final del proceso para las probetas en ambiente patrón y un crecimiento mayor hasta alcanzar un punto máximo -entre los quince y los dieciocho ciclos- seguido de un descenso mas pronunciado para las muestras atacadas en agua de mar.

En el ambiente patrón las probetas registraron, en efecto, una tendencia a aumentar de peso linealmente hasta los treinta ciclos, en particular las correspondientes a las





mezclas de 1.5% de aire y las de 5.6%, siendo en estas últimas el aumento mas moderado pero igualmente constante. Las mezclas de 3.5% de aire también sufrieron un aumento de peso que en este caso no fue tan constante como en los anteriores sino que decreció a medida que se avanzó en los ciclos de ataque, hasta llegar a un valor casi que constante en los últimos ciclos (ciclos 26, 27 y 28). Esto puede llevar a concluir que entre las mezclas de relación A/C de 0.63 fueron estas últimas las mas vulnerables al ataque patrón (humedecimiento en agua potable, secado en el horno y abrasión).

La anterior afirmación obedece al siguiente razonamiento: las probetas mantienen una tendencia a ganar peso, al menos durante los primeros meses, que actúa simultáneamente con las pérdidas de material debidas al debilitamiento de las muestras y al ataque mismo. Dichas pérdidas no son apreciables en las mezclas de 1.5 y 5.6% de aire, donde el incremento de peso es constante y sostenido; lo son, sí, en la mezcla de 3.5% de aire, en la cual llega a afectar la tendencia observada provocando, alrededor de los veintiocho ciclos, un equilibrio entre el aumento y la pérdida de peso. Es muy probable que en la continuación del proceso llegare a revertirse la tendencia inicial y finalmente los especímenes entren en un proceso de pérdida de peso que sea cada vez mas intenso por hallarse el concreto debilitado.

En el agua de mar las tendencias de comportamiento guardan relación con lo observado en el ambiente patrón, presentándose en este caso una fuerte ganancia



inicial de peso (acaso por efecto de las sales?), mayor que en el ambiente patrón y una pérdida de peso en los ciclos finales.

Los cambios de peso son nuevamente menos intensos en la mezcla de 5.6% de aire (ver Anexo B). Las probetas con 3.5% de aire presentan las mayores ganancias de peso al inicio del proceso y las pérdidas mas grandes, al final del mismo.

Se observa además que el cambio de ganar a perder peso ocurre en edades similares para las tres mezclas de relación A/C de 0.63 (entre los 16 y los 18 ciclos).

Las tendencias a aumentar peso más que en el patrón han de deberse al ingreso de sales en estas probetas, cuyos efectos se superponen o imponen a la ganancia natural de peso observada anteriormente en las probetas sometidas al ataque en agua potable. Desde esta perspectiva las probetas con 5.6% de aire aparecen como las menos susceptibles de ser penetradas por este tipo de sustancias. Esto es preciso comprobarlo a la luz de ensayos de permeabilidad y por medio de la prolongación de los ciclos a más largo plazo. Las sales marinas causan además de una intensificación de los cambios una aceleración de los procesos, lo que queda evidenciado en el que la tendencia a ganar peso se revierta alrededor de los diecisiete ciclos, cuando en el agua potable no se había observado antes de dieciocho ciclos y sólo se había intuído por el comportamiento final de las mezclas con 3.5% de aire. De nuevo para las mezclas con

relación A/C de 0.63 el contenido de aire de 3.5% presentó los resultados menos favorables; una inclusión de aire de 5.6% aparece como conveniente<sup>1</sup>.

Los cambios de peso, observados en detalle tienen un resultado ambiguo por responder a una doble dinámica de ingreso de sustancias al hormigón y pérdida del concreto dañado. Vistos en conjunto con los resultados de los ensayos de pulso ultrasónico aparece cómo la incorporación de ciertos contenidos de aire al concreto perjudican su capacidad para soportar los ataques del medio. En este estudio no fue posible comprobar el efecto de la inclusión de aire sobre la permeabilidad del concreto, que como se ha dicho constituye la clave de su durabilidad. Esta variable si fue observada en cierta forma por Ardila y Tsuchiya, quienes encontraron que la permeabilidad no guardaba una relación unívoca con la inclusión de aire: en algunos casos el aire incorporado desmejoraba la impermeabilidad de la mezcla (hasta 2% para la relación A/C de 0.5, 4 y 5% para las relaciones A/C de 0.6 y 0.7 respectivamente); además que mayores contenidos de aire llevaban a una recuperación al menos parcial del grado de impermeabilidad de la mezcla sin aire ocluido. En la medida en que esto

---

<sup>1</sup> Observaciones posteriores al estudio de la apariencia externa de las probetas correspondientes a esta mezcla parecen indicar que tales probetas pueden estar comenzando un proceso de deterioro mas importante que el observado hasta la fecha. Nuevamente se nota la conveniencia de extender los ensayos por un mayor número de ciclos de ataque.

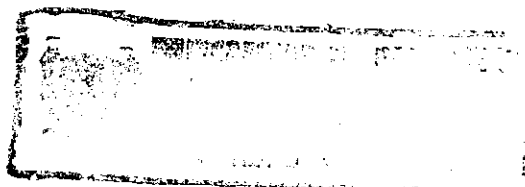
último ocurría, los daños causados por soluciones de  $MgSO_4$  eran mayores. (Ardila y Tsuchiya, 1991, 106)

Las probetas de relación A/C de 0.63 y 3.5% de aire incluido no presentan signos externos de deterioro en las edades iniciales (7 ciclos) cuando se hallan en proceso de fortalecimiento.

En las mezclas de relación A/C 0.42 se encuentran ciertas similitudes con el caso anterior (relación A/C 0.63), al igual que ciertas divergencias. La tendencia general a cambiar de peso (aumentos y descensos) es menor en la medida en que se incluye aire al concreto, como se aprecia en el Anexo B y en las graficas 8 a 14. Se observa que hubo cierta coherencia en los cambios de peso para las probetas sometidas al ataque del agua de mar. La siguiente tabla resume los datos mostrados en el Anexo y presenta para cada tipo de mezcla su incremento máximo de peso con respecto al inicial y su posterior cambio de peso a partir de dicho máximo hasta el final de los ciclos:

% de AIRE MEDIDO	AUMENTO MAXIMO	DESCENSO FINAL
1.7	4.25	1.8
1.9	4.25	1.25
3.6	2.8	0.7
4.1	2.5	0.5
5.8	3	0.25
6.6	1.6	0

**Tabla No.3. Cambio de Peso para Relación A/C 0.42**



Se aprecian en estas mezclas, al igual que en las de relación A/C 0.63, incrementos de peso mayores en las probetas atacadas por el ambiente marino simulado que en las sometidas al ataque en agua potable, evidenciándose el efecto del ingreso de sales al concreto; excepto en las mezclas con mayor contenido de aire (6.6% en volumen).

Las mezclas con 6.6% de aire presentan un comportamiento bastante particular, ya que en ellas las muestras patrón sufrieron aumentos mayores en el peso seco que las atacadas por el agua de mar. Probablemente esto se debe a pérdidas de peso que interactúan con la ganancia natural observada en las probetas atacadas en agua potable y que manifiestan la existencia de procesos de deterioro causados por el ambiente marino sobre los especímenes. Esta explicación se apoya en los resultados de las pruebas de ultrasonido (grafica 4), en las que estas mezclas mostraron ser las mas débiles y en los signos externos de los daños sufridos (Anexo A, Fotos 1, 2 y 16). Visto desde otro punto de vista las menores tasas de incremento de los pesos pueden ser síntomas de una menor permeabilidad de las probetas; lo que sería una tendencia generalizada a medida que se aumenta el contenido de aire de las mezclas, como se puede ver en el Anexo B.

Desafortunadamente los datos obtenidos presentan fluctuaciones muy grandes - en parte por el comportamiento de las probetas, en parte por la dificultad de controlar el secado - que dificultan el análisis. Las gráficas 8 a 14 presentan la forma como el peso varió en ciertos momentos definidos del proceso y deben ser vistas con mucho cuidado

ya que, como se explicó, este cambio de peso (o de masa) depende en gran parte del valor medido inicialmente, que en algunos casos aparece bastante apartado de la tendencia general.

Es un hecho (ver Anexo B) que a medida que se incluye mas aire al concreto la variabilidad de los pesos es menor, incluso llega a desaparecer la tendencia a que se revierta su proceso de incremento en las probetas de 5.8 y 6.6% de aire. Las razones de tal comportamiento no aparecen muy claras, sobre todo cuando los resultados se miran en conjunto con los de otros ensayos: puede que sean signos de menor permeabilidad, pero esto no repercute en una mejor apariencia externa; y aún si así fuera, porqué las pérdidas de peso observadas (ver Anexo A, Fotos No 11 a 16) no son registradas por las medidas del peso? Aún existe la posibilidad de que ambas explicaciones sean correctas, siendo ciertos contenidos de aire favorables a las mezclas y otros no - como también ocurrió en los ensayos de Ardila y Tsuchiya en la Universidad Nacional (1991, 125 - 135) - presentándose en este caso particular la posibilidad - que no ocurrió en los ensayos de estos- de que existan problemas por exceso: una mezcla con más aire incluido del conveniente.

Las probetas con menores contenidos de aire (entre ellas las fabricadas sin aditivo incorporador) presentan tendencias similares a las de la relación A/C 0.63, observándose que sus pesos aumentan hasta alrededor de los diecisiete ciclos para descender de ahí en adelante hasta el final del proceso (25 ciclos). En realidad,

después de los diez ciclos los pesos no varían mucho, siendo leve esta disminución de pesos. Aún así, de mantenerse dicha tendencia, sus pesos finalmente podrían caer más abajo que los de las mezclas de mayor contenido de aire, lo que convendría comprobar con experimentos y no puede simplemente inferirse.

La observación del proceso presenta ciertos patrones en el ataque:

- Al principio de las pruebas los cilindros que se saturaban en agua potable mostraron mayor desprendimiento de material (en polvo) durante la acción abrasiva (cepillado); otra razón para sus menores aumentos de peso.
- La parte ascendente de las curvas de peso seco (Anexo B) coincide con las observaciones de oscurecimiento y brillo en los cilindros y con el inicio del desarrollo de la despigmentación de éstos (Anexo A, Fotos 21 y 23).
- Los puntos de inflexión de las curvas se presentaron al tiempo que las incrustaciones y canales de sales que aparecieron al ser secadas las muestras. (Anexo A, Foto 22). La parte descendente de las curvas correspondió al desprendimiento de la capa superficial de los cilindros y al deterioro de su sección transversal, durante el cual se hicieron más frágiles y dejaron aflorar los agregados.

## 5.5 RESISTENCIA A COMPRESION

030

La resistencia a la compresión es el ensayo más utilizado, en muchos casos el único, para evaluar la calidad del hormigón. En lo que respecta a la durabilidad se ha inferido que los concretos más resistentes a los ataques físicos e, incluso, químicos del medio son los que poseen mayor resistencia a la compresión. Tal transferencia de resultados de una propiedad del concreto a otra no deja de tener inconvenientes, los que se verifican en mayor o menor grado de acuerdo a las características del ambiente agresivo en cuestión. Lo que ocurre generalmente es que los concretos con mayor resistencia a la compresión contienen altas cantidades de cemento o de material cementante y bajas relaciones A/C, que repercuten positivamente en la capacidad para resistir ciertos ataques externos; pero que en muchos casos no son suficientes.

Para la correcta evaluación de los resultados obtenidos es preciso tener en cuenta que la inclusión de aire al concreto afecta la resistencia a la compresión (gráficas 15 a 23), lo que se presentó con mayor intensidad en las mezclas con menor relación A/C (0.42), como ocurrió también en los ensayos de Ardila y Tsuchiya (1991, 88).

Por otro lado es muy posible que los cambios de temperatura hallan afectado fuertemente la resistencia a la compresión de los especímenes, sobre todo los de la relación A/C 0.42. Esto ocurre, más aún, cuando se emplean agregados densos en la fabricación del concreto, los que son menos compatibles con la pasta en sus

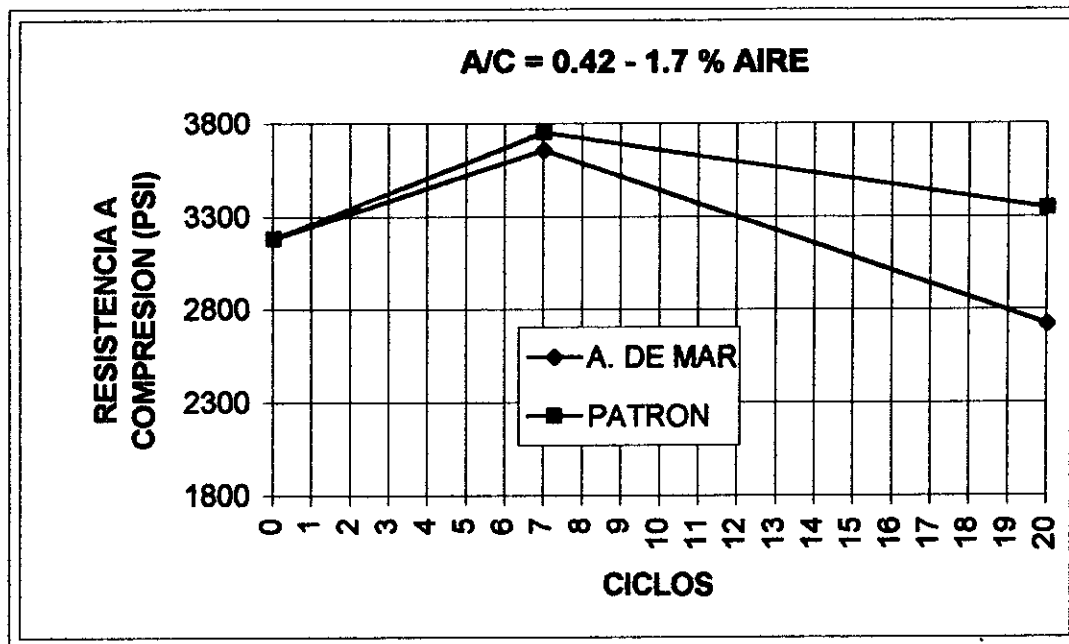
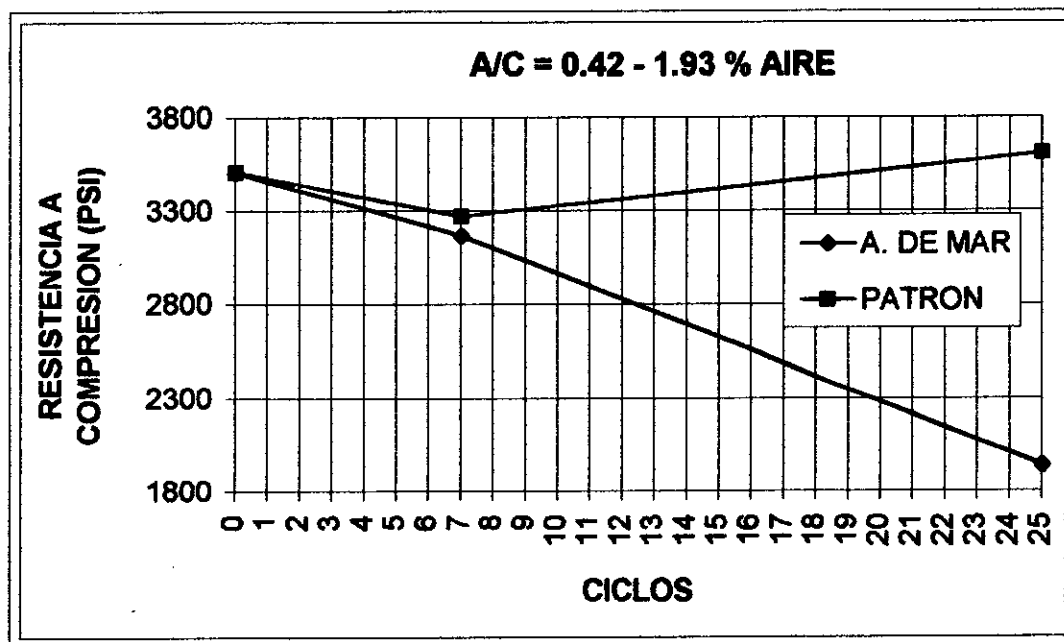
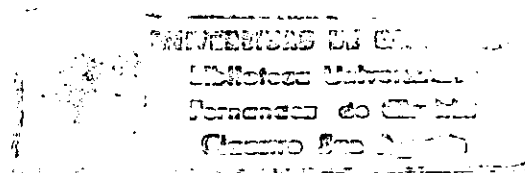


Figura 6

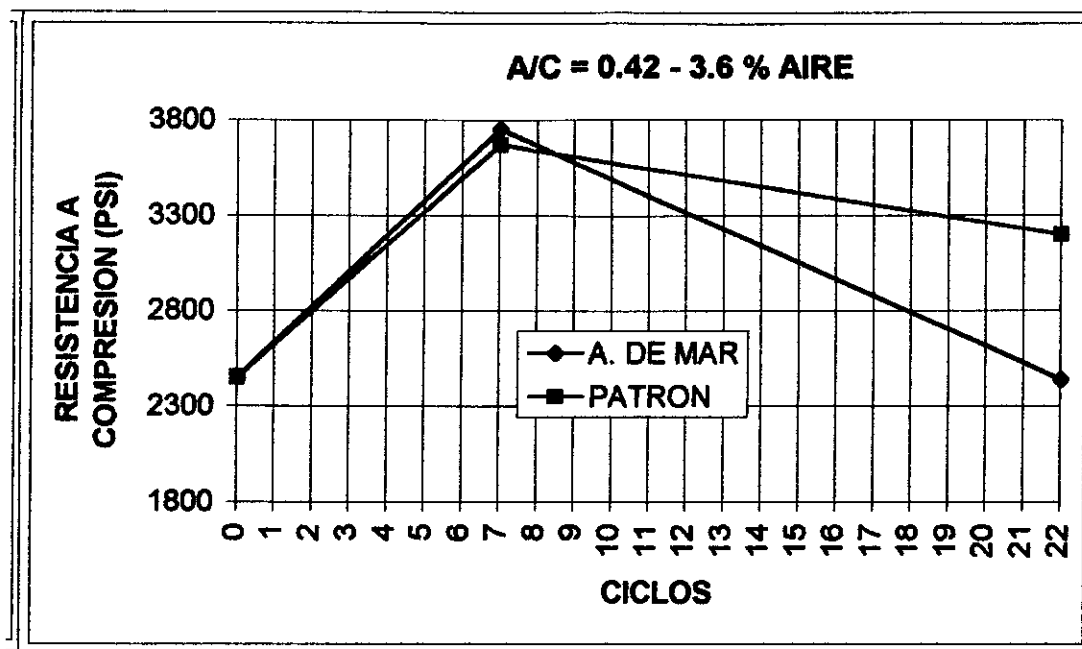
Gráfica 16. Resistencia a la Compresión. Serie 900



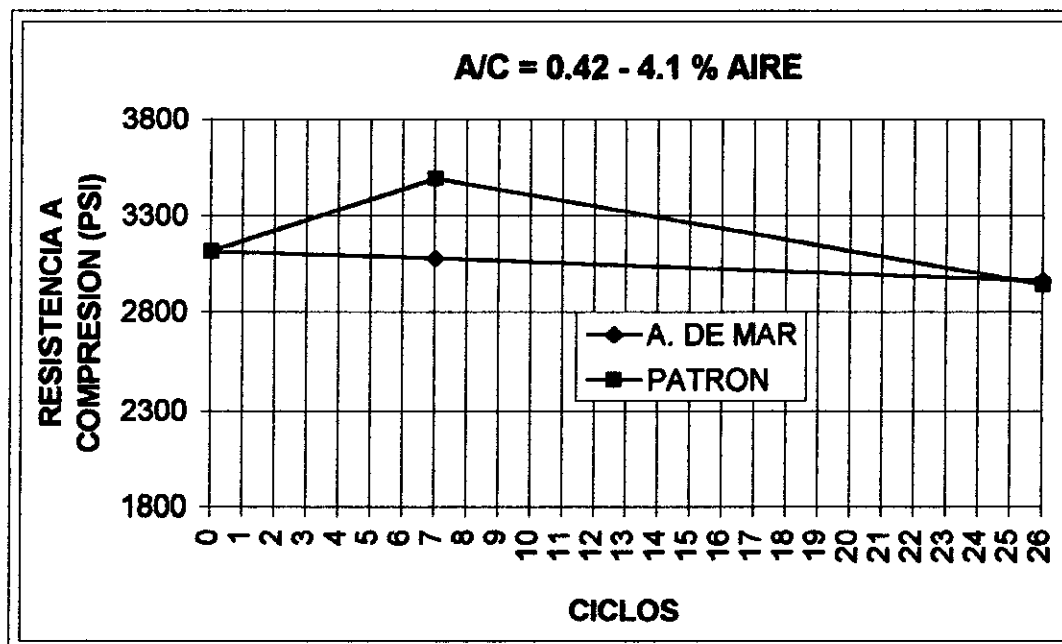
Gráfica 17. Resistencia a la Compresión. Serie 100



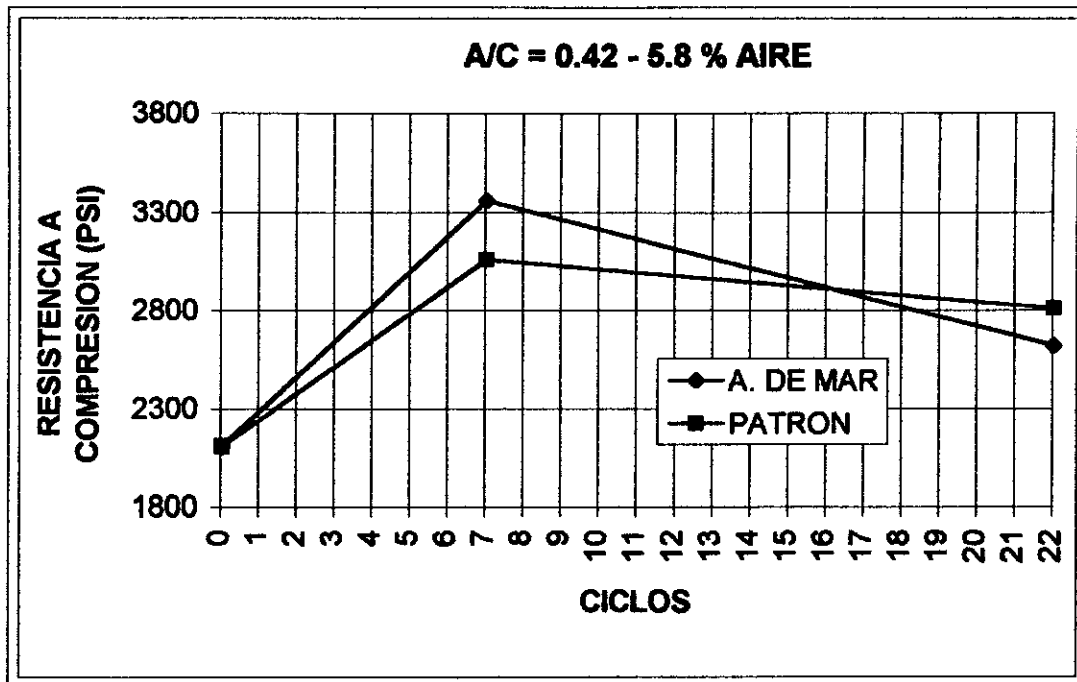




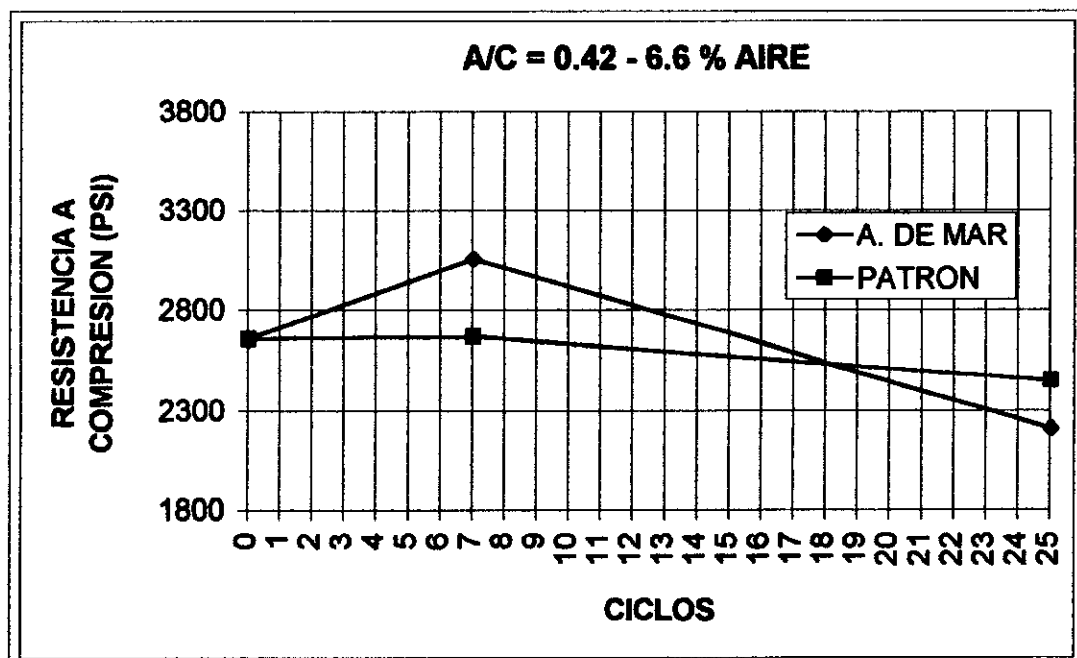
**Gráfica 18. Resistencia a la Compresión. Serie 700**



**Gráfica 19. Resistencia a la Compresión. Serie 300**



**Gráfica 20. Resistencia a la Compresión. Serie 800**

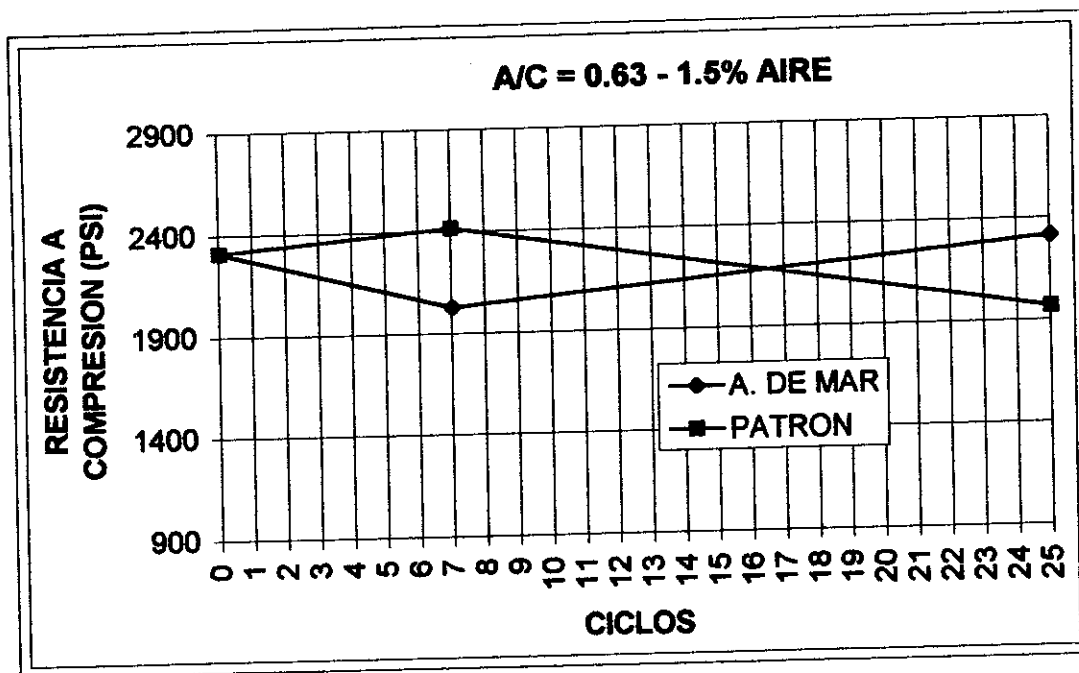


**Gráfica 21. Resistencia a la Compresión. Serie 400**

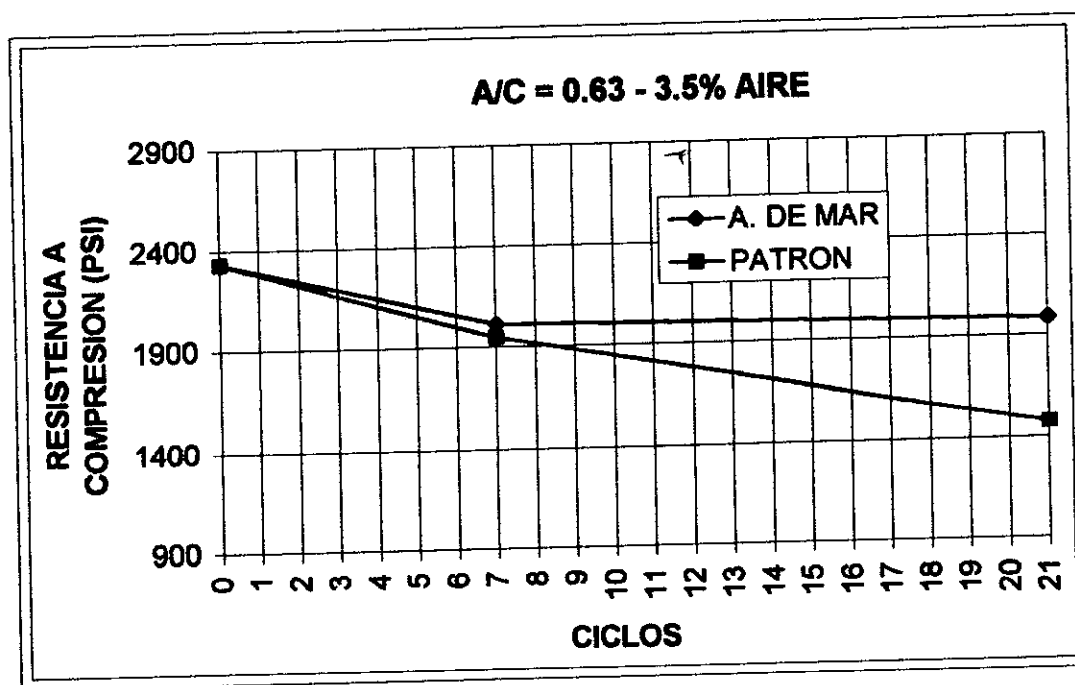
propiedades térmicas y elásticas y cuya incompatibilidad se incrementa aún más al incluir aire a la mezcla (Holm, Bremner y Newman, 1984, 50-51).

Se puede apreciar en las gráficas 15 a 23 cómo en las mezclas de relación A/C 0.42 el comportamiento de la resistencia presenta mucha similitud entre las probetas sometidas al agua de mar y al ambiente patrón. En términos generales esta característica ha sido afectada levemente por los ciclos de ataque: sólo las muestras de 5.8 y 3.6 % de aire presentan aumentos importantes de resistencias luego de siete días (ciclo 0). Se observa también como las resistencias de las probetas atacadas por el agua de mar son menores que las patrón al final de los ciclos, sin variar mucho con respecto a estas, sobre todo en edades intermedias y para contenidos bajos de aire (1.7 a 3.6 %). A los siete ciclos se aprecia que en las mezclas con 5.8 y 6.6 % de aire (contenidos mayores) las probetas sometidas al ambiente marino superan el desempeño de las patrón. Las resistencias a la compresión de las probetas de esta relación A/C (0.42) entraron en un franco descenso después de los primeros siete ciclos de ataque.

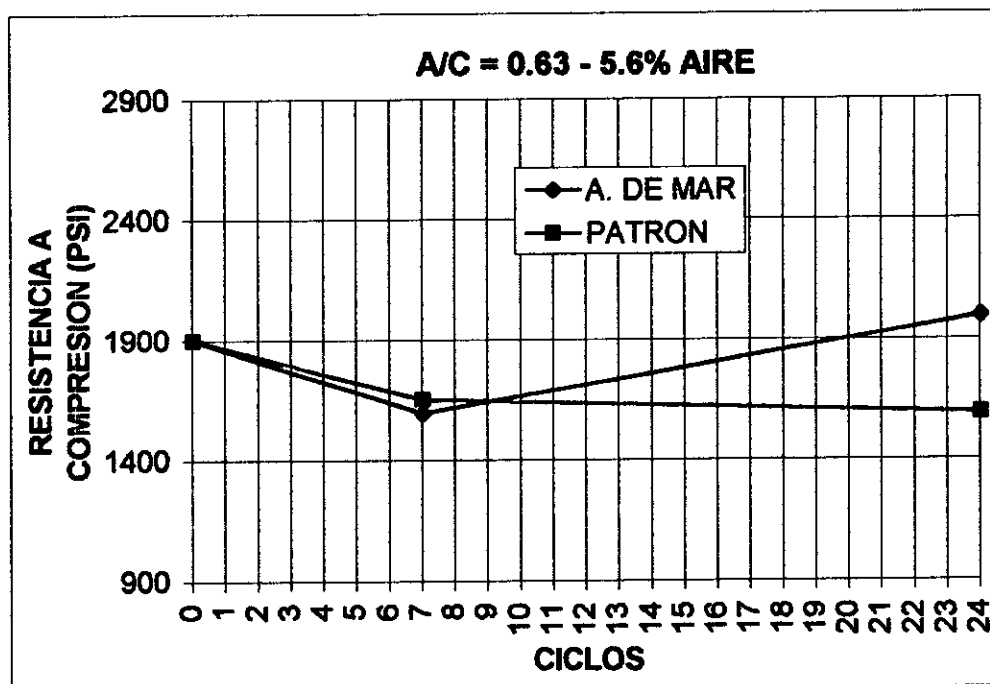
Cabe anotar que la mezcla de 1.93 % de aire fue excluida del análisis por presentar un comportamiento muy diferente a las demás, para lo que no se halló explicación. Sus resultados, sin embargo, se presentan como información.



**Gráfica 22. Resistencia a la Compresión. Serie 200**



**Gráfica 23. Resistencia a la Compresión. Serie 500**



**Gráfica 24. Resistencia a la Compresión. Serie 600**

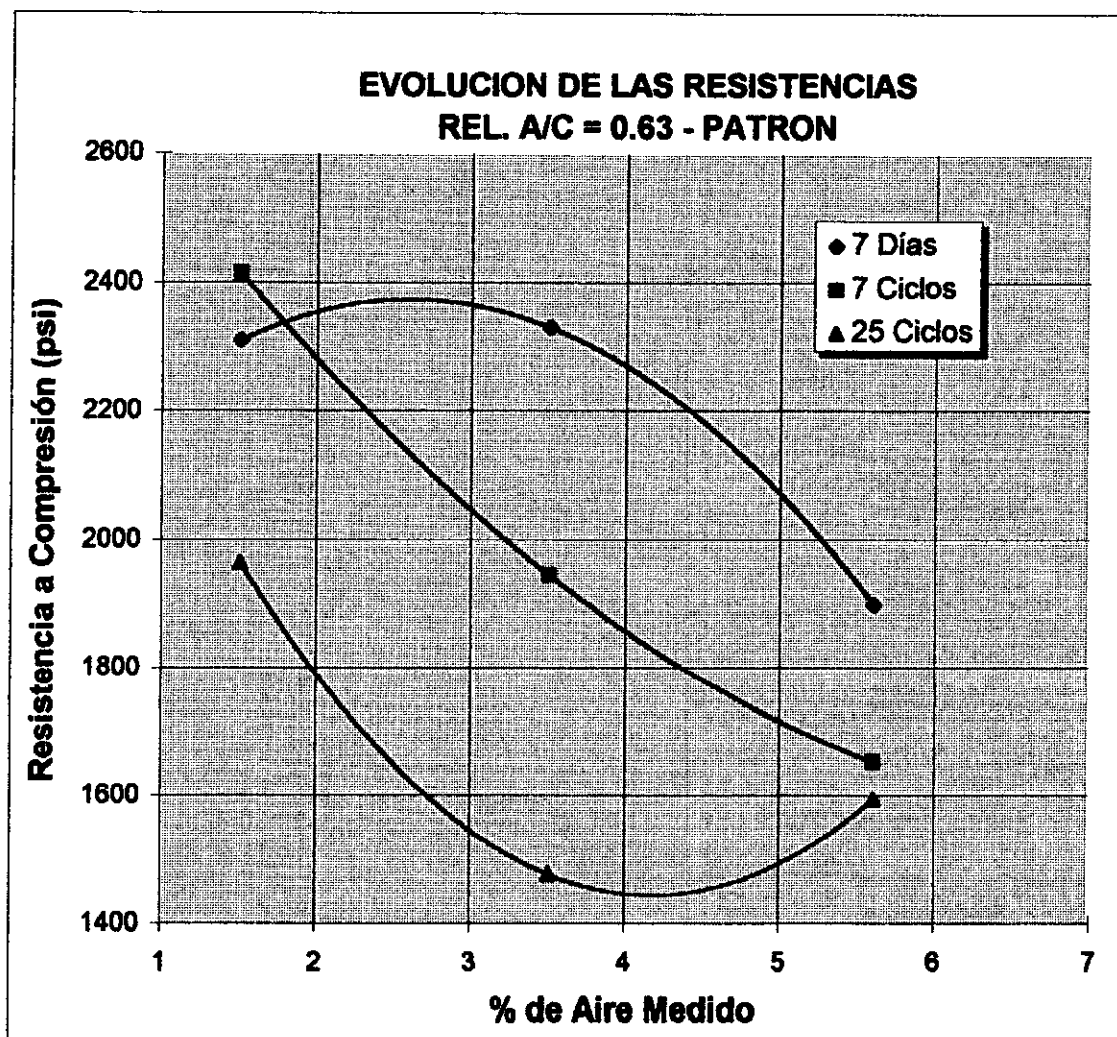
Al contrario de las mezclas de relación A/C 0.42, las de relación A/C 0.63 presentaron mayores resistencias en las probetas sometidas al agua de mar que en las patrón al final de los ciclos, manteniendo o aumentando incluso sus resistencias a la compresión después de los primeros siete ciclos de ataque en agua de mar. Contrariamente, en agua potable se apreciaron debilitamientos a medida que avanzó el desarrollo del experimento.

Será el fortalecimiento mencionado producto de las sales que ingresaron a las muestras? De ser así no cabría duda en que éstas fueron penetradas en mayor grado por dichas sales, presentes en el agua, que las de relación A/C 0.42, y que este incremento de resistencia es sólo temporal y precede mayores deterioros futuros. La probeta más afectada durante el estudio parece ser la de 3.5% de aire, siendo incluso la única que no registra aumentos de resistencia.

Las resistencias de las mezclas de relación A/C 0.63 en los ambientes patrón presentan un comportamiento descendente a lo largo de los ciclos lo que muestra el debilitamiento que sufren por efecto de los procesos de humedecimiento y secado, abrasión y cambios bruscos de temperatura. Esta observación refuerza la hipótesis de que el fortalecimiento de las probetas atacadas en agua de mar obedece a una densificación causada por el ingreso de sales.

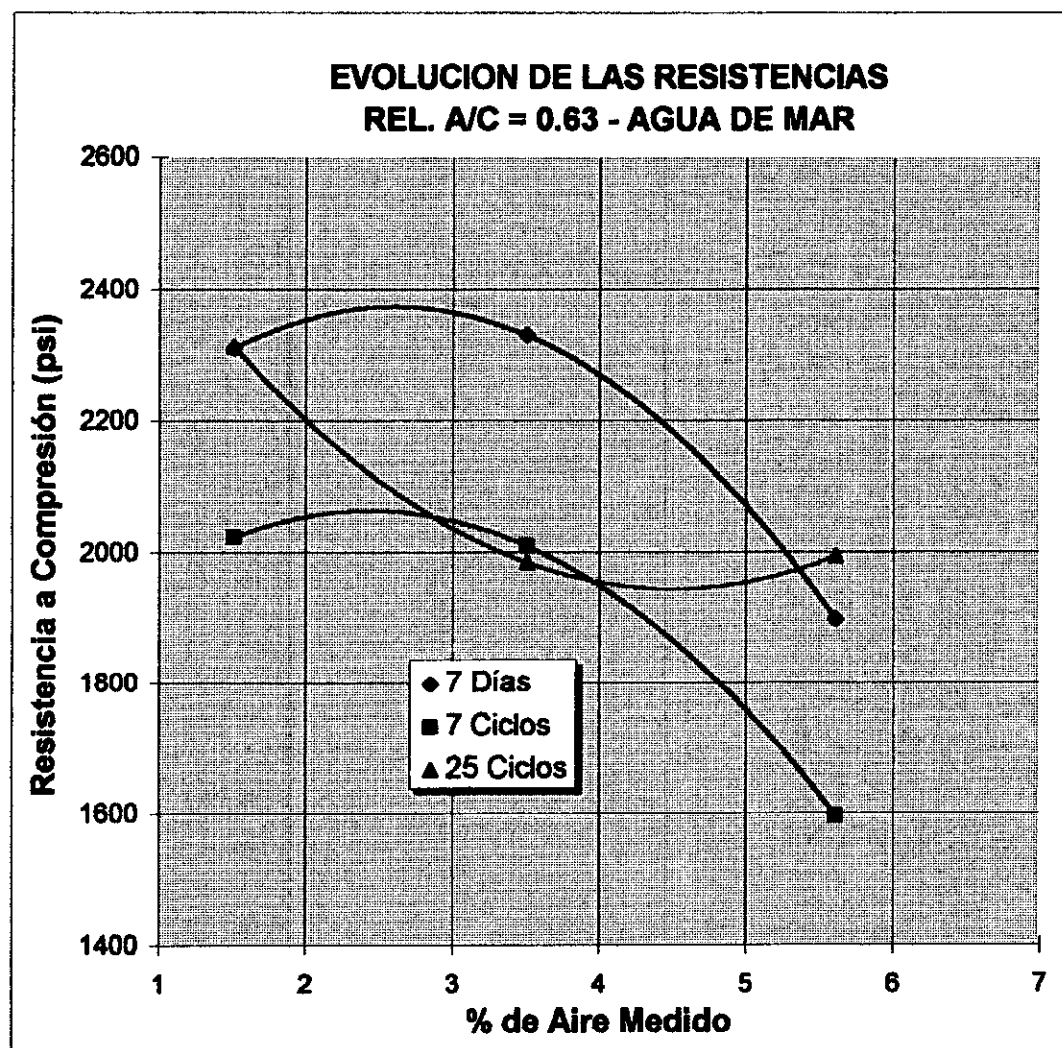
Las probetas de relación A/C 0.42 sometidas al agua de mar mantuvieron un comportamiento muy parecido al de las probetas patrón. En éstas no apareció fortalecimiento en el del ambiente marino simulado, lo que permite pensar que el ingreso de sales fue menor y/o no tuvo efectos notables; el factor determinante en este caso fueron los ataques abrasivos y los cambios de temperatura que marcaron el desempeño de los especímenes. En las pruebas de contenidos totales de cloruros no aparece muy claro que estas probetas hallan sido siempre penetradas en menor grado por las sales marinas que las de relación A/C 0.63; de cualquier manera, hayan ingresado o no dichas sustancias, la resistencia a la compresión sufrió menos su influencia en este caso.

En la gráfica 24 se observa cómo, para la relación A/C 0.63 las resistencias del patrón han sido fuertemente afectadas por los ciclos de ataque, siendo menor el efecto en las mezclas preparadas sin aditivo inductor de aire (1.5 % de aire en volumen) hasta el séptimo ciclo. Los cambios en la resistencia a la compresión, al final de los ciclos de ataque, resultaron muy similares para las mezclas con 1.5 y 5.6 % de aire, siendo estas últimas las menos afectadas en la etapa final del proceso. Las probetas con 3.5 % de aire fueron las mas atacadas en su resistencia tanto al inicio como al final de las pruebas y presentan el peor desempeño en el ambiente patrón entre las mezclas de relación A/C 0.63.



**Gráfica 25. Resistencias en Ambiente Patrón - Rel A/C 0.63**



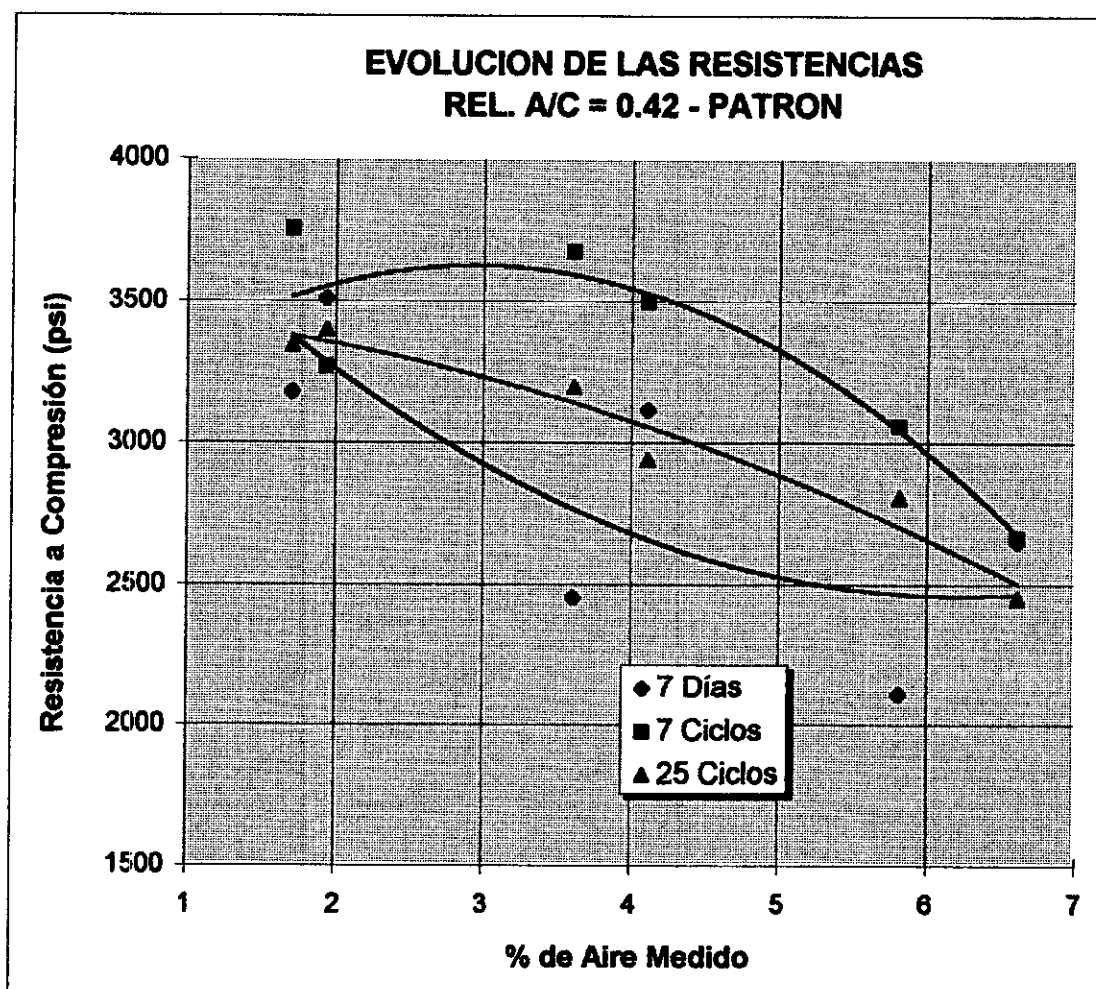


**Gráfica 26. Resistencias en Agua de Mar - Rel A/C 0.63**

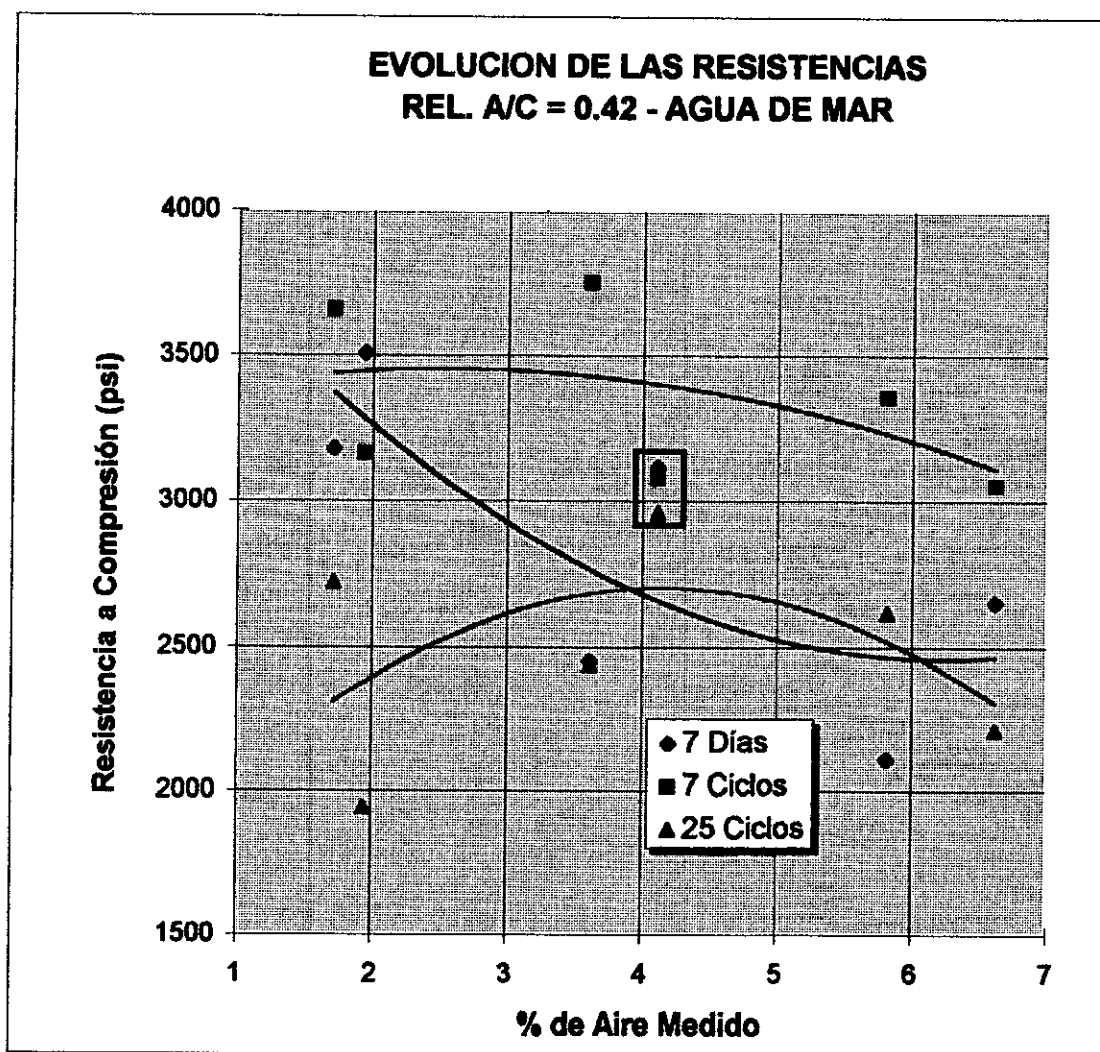
En el agua de mar (ver gráfica 25) se verificó un fortalecimiento en las probetas de relación A/C 0.63, cuya principal consecuencia fue que, al final del ataque, las mezclas con 1.5 y 5.6 % de aire recuperaron sus resistencias iniciales, perdidas durante los primeros ciclos. Las muestras con 3.5 % de aire no registran ganancia de resistencia durante los últimos ciclos, aunque su tendencia inicial a perder resistencia se atenúa enormemente, siendo finalmente mayor que en el agua potable.

En las mezclas con relación A/C 0.42 pudo observarse que en el ambiente patrón tanto las probetas sin aire incorporado (1.7 % de aire) como aquellas con 6.6 % fueron poco afectadas en su resistencia por los ciclos de ataque; las mezclas con contenidos intermedios de aire presentaron altas ganancias de resistencia hasta los siete primeros ciclos para descender finalmente, a los veinticinco ciclos, a valores similares a sus resistencias iniciales; las mezclas con 4.1 % de aire se comportaron de manera similar a las de 1.7 % (gráfica 26).

Las mezclas elaboradas sin aditivo incorporador y relación A/C 0.42 presentan en el agua de mar altas pérdidas de resistencia al final del proceso que no se evidencian en el aspecto exterior de las probetas. Estas mezclas, al parecer, son mas afectadas durante los últimos ciclos, sufriendo pocos daños durante los siete ciclos iniciales. Las mezclas con mayores contenidos de aire ganan resistencia inicialmente (7 ciclos) para entrar luego en un proceso de debilitamiento evidenciado en sus resistencias finales (ver gráfica 27).



**Gráfica 27. Resistencias en Ambiente Patrón - Rel A/C 0.42**



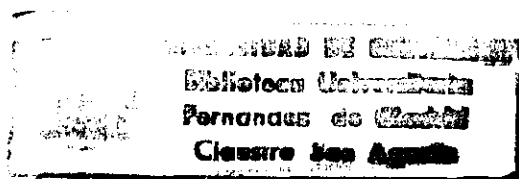
**Gráfica 28. Resistencias en Agua de Mar - Rel A/C 0.42**

Es notable el comportamiento de las mezclas de 4.1 % de aire, que mantienen una estabilidad en sus resistencias en agua de mar a lo largo de los ciclos de ataque (ver recuadro, gráfica 27). Su desempeño en el ambiente patrón sólo se diferencia por una leve ganancia de resistencia en los primeros ciclos. Esta mezcla guarda, por otra parte, un comportamiento satisfactorio en el conjunto de ensayos realizados.

## 5.6 ENSAYOS QUIMICOS

Los ensayos químicos fueron realizados en los laboratorios de SIKA Andina en Bogotá, bajo la orientación de los doctores Ralph Carvajal y Angelo Martínez y del ingeniero Gustavo Roca Vides. Tales pruebas permitieron evaluar las cantidades de sustancias presentes en la preparación de agua de mar que habían ingresado en las probetas estudiadas.

Inicialmente se había propuesto realizar ensayos cualitativos sobre las propiedades químicas de las mezclas de concreto que consistían en la evaluación del pH con fenolftaleína y de la presencia de cloruros con nitrato de plata. Estos ensayos se desecharon luego de un primer intento fallido como se expuso anteriormente. El pH de las probetas no sufrió mayores cambios como se esperaba, registrando valores de alrededor de 12.5 en la mezcla mas atacada. Esto llevó a abandonar la prueba cuantitativa de pH para dar cabida a la realización de otras (cloruros y sulfatos totales) que se esperaba proporcionarían datos de mayor utilidad.

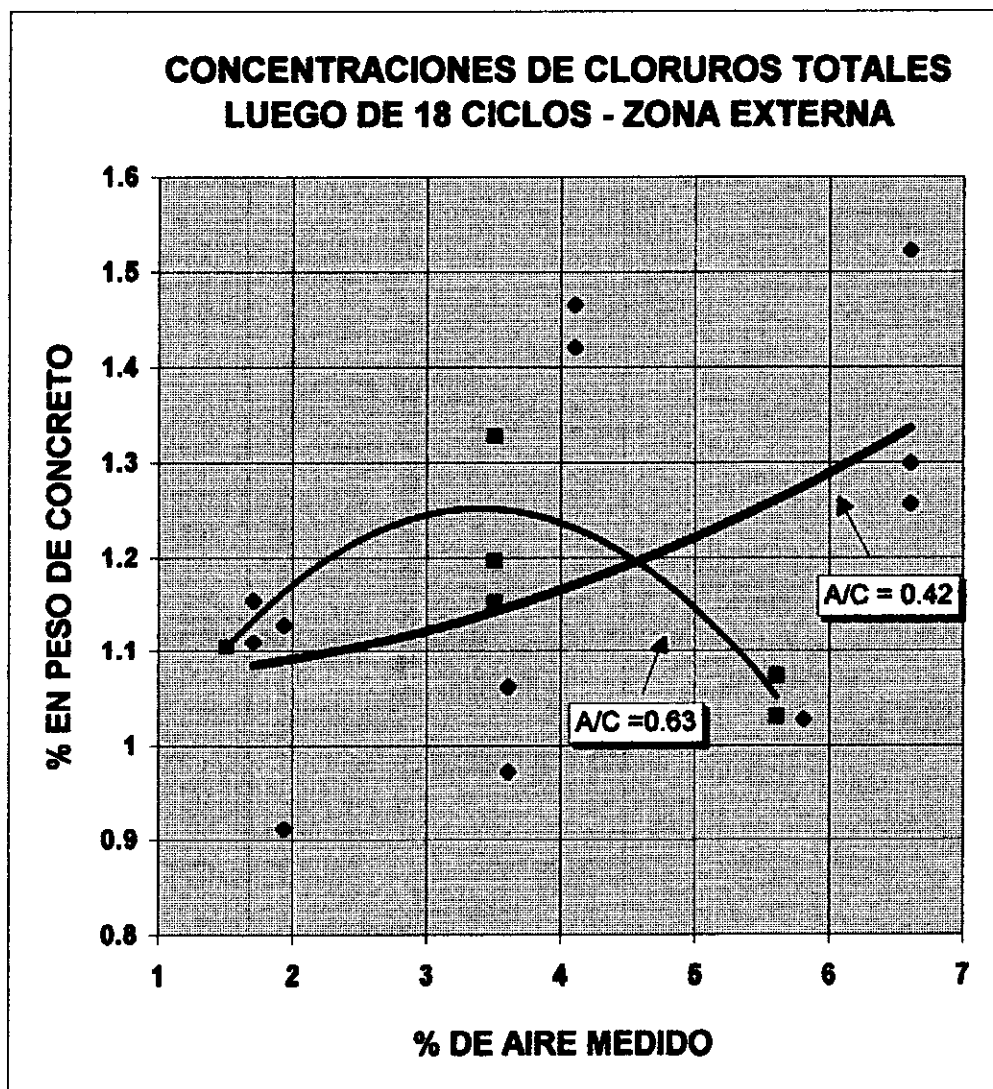


**5.6.1 Cloruros Totales** El ingreso de cloruros totales en las mezclas de relación A/C 0.42 presentó una tendencia claramente ascendente en la medida en que se aumentó el contenido de aire, lo que significa una aparente inconveniencia de la incorporación de aire al concreto. En la zona externa de las probetas (hasta tres centímetros desde la superficie) esta tendencia no aparece tan definida como en la zona interna, donde, por otra parte, es menos pronunciada (gráficas 28 a 33).

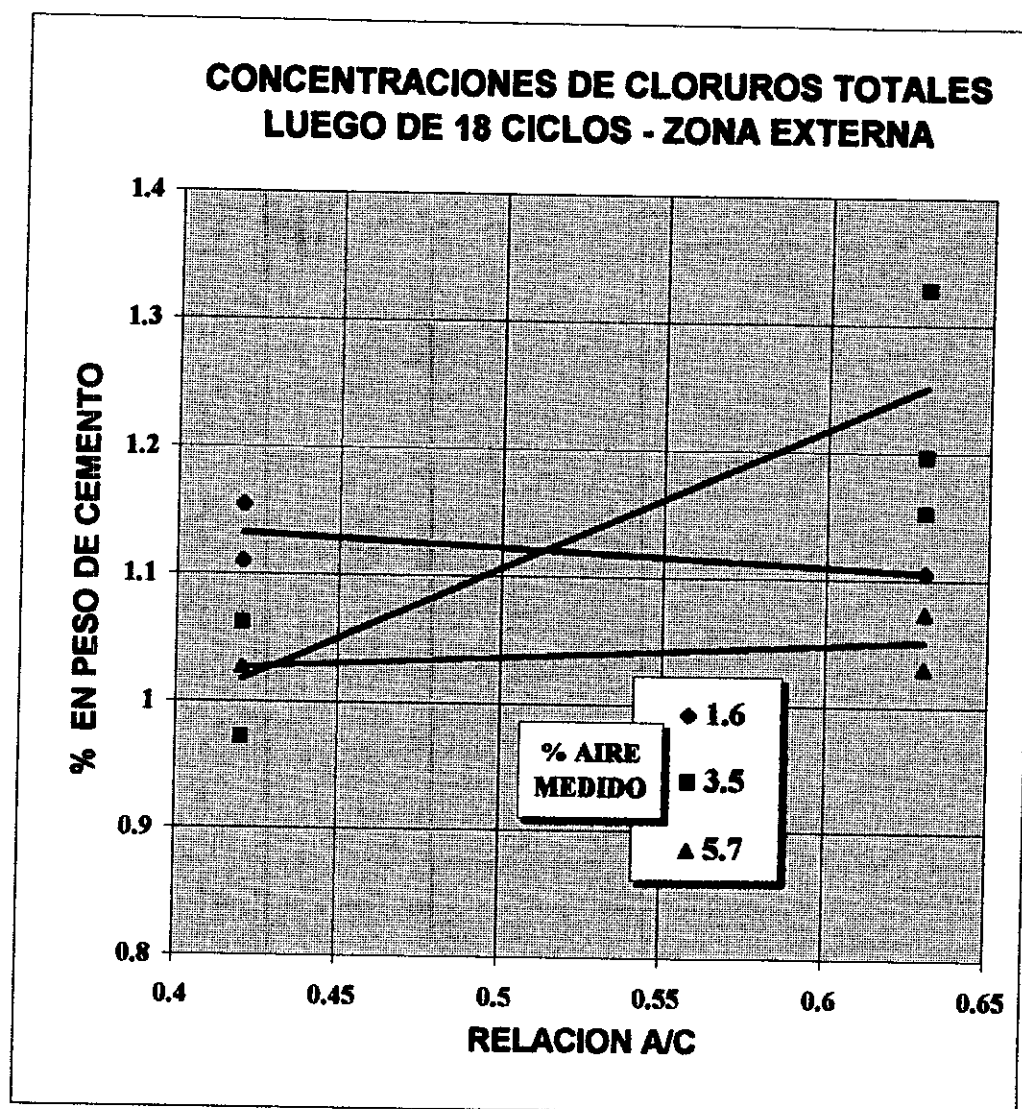
El caso de las mezclas con relación A/C 0.63 es bastante curioso. Para los contenidos menores de aire se observa un comportamiento similar al de las mezclas con relación A/C 0.42, es decir: el aire incorporado al concreto favorece el ingreso de cloruros; sin embargo, en las mezclas con 5.6 % de aire los contenidos de cloruros totales son menores que los de las demás mezclas, e incluso, en la zona interna, mas bajos que los de la relación A/C 0.42.

Los resultados anteriores señalan la probable existencia de contenidos menores de aire que facilitan el ingreso de sustancias al concreto, particularmente cloruros, los cuales pueden afectar posteriormente el refuerzo de acero; contenidos mayores mejoran el desempeño de los concretos ante el ingreso de cloruros totales, pudiéndose elaborar mezclas menos permeables a éstos que las fabricadas sin aditivo incorporador de aire.

El comportamiento descrito corresponde a resultados de una sola probeta de cada mezcla luego de dieciocho ciclos de ataque, y aunque fueron corroborados con

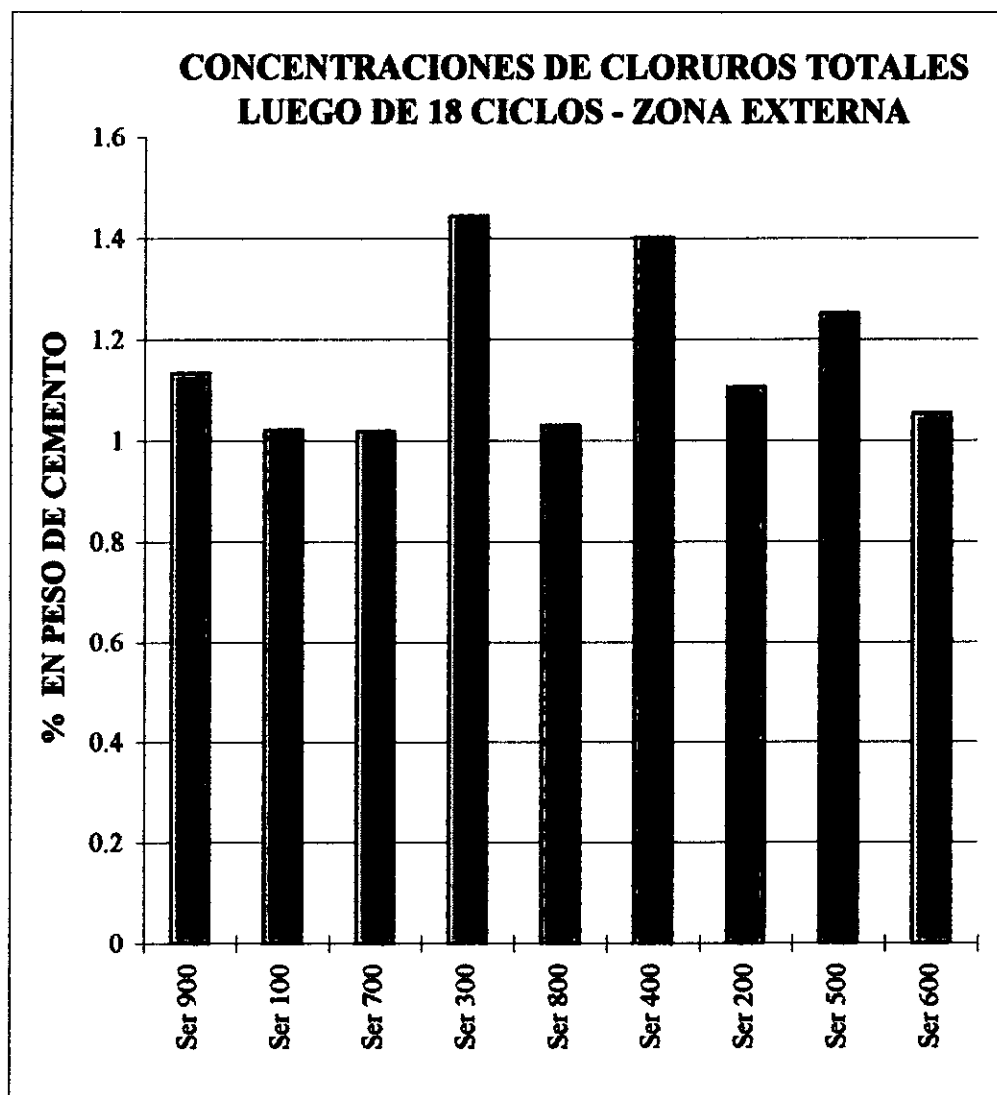


**Gráfica 29. Cloruros Totales vs Contenido de Aire - Zona Externa**

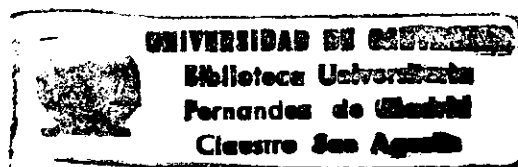


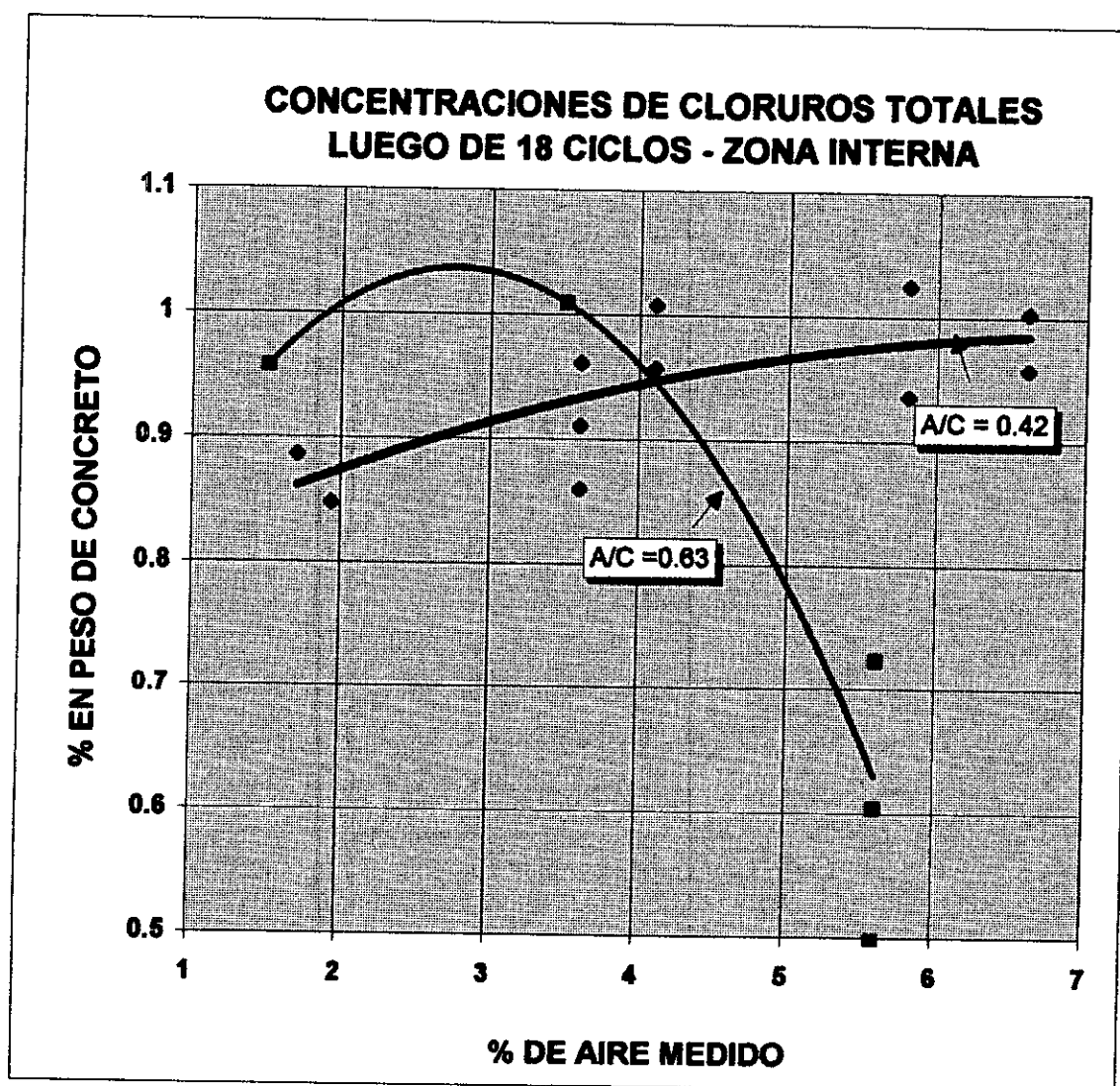
**Gráfica 30. Cloruros Totales vs Relación A/C - Zona Externa**



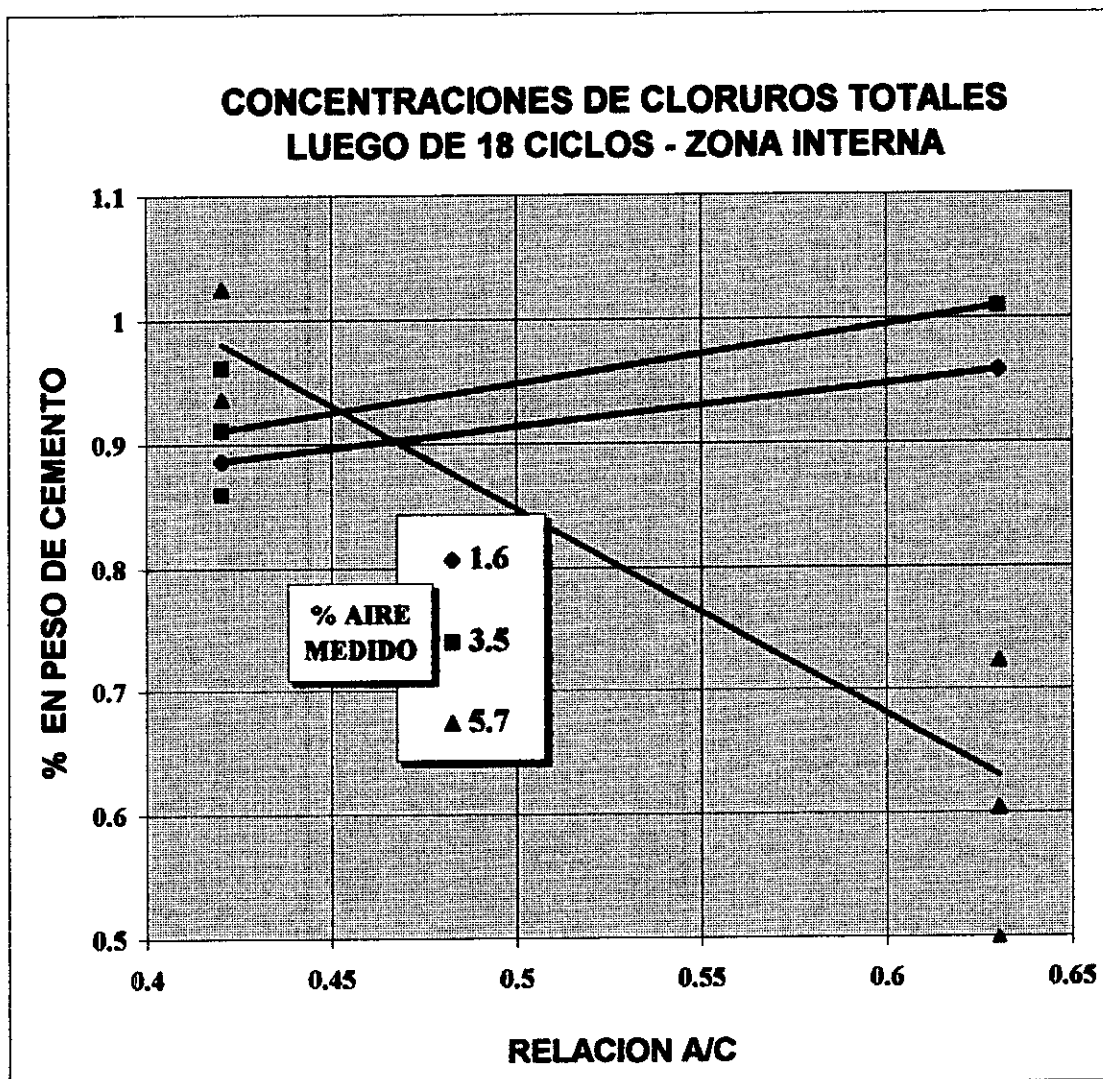


**Gráfica 31. Cloruros Totales Zona Externa**

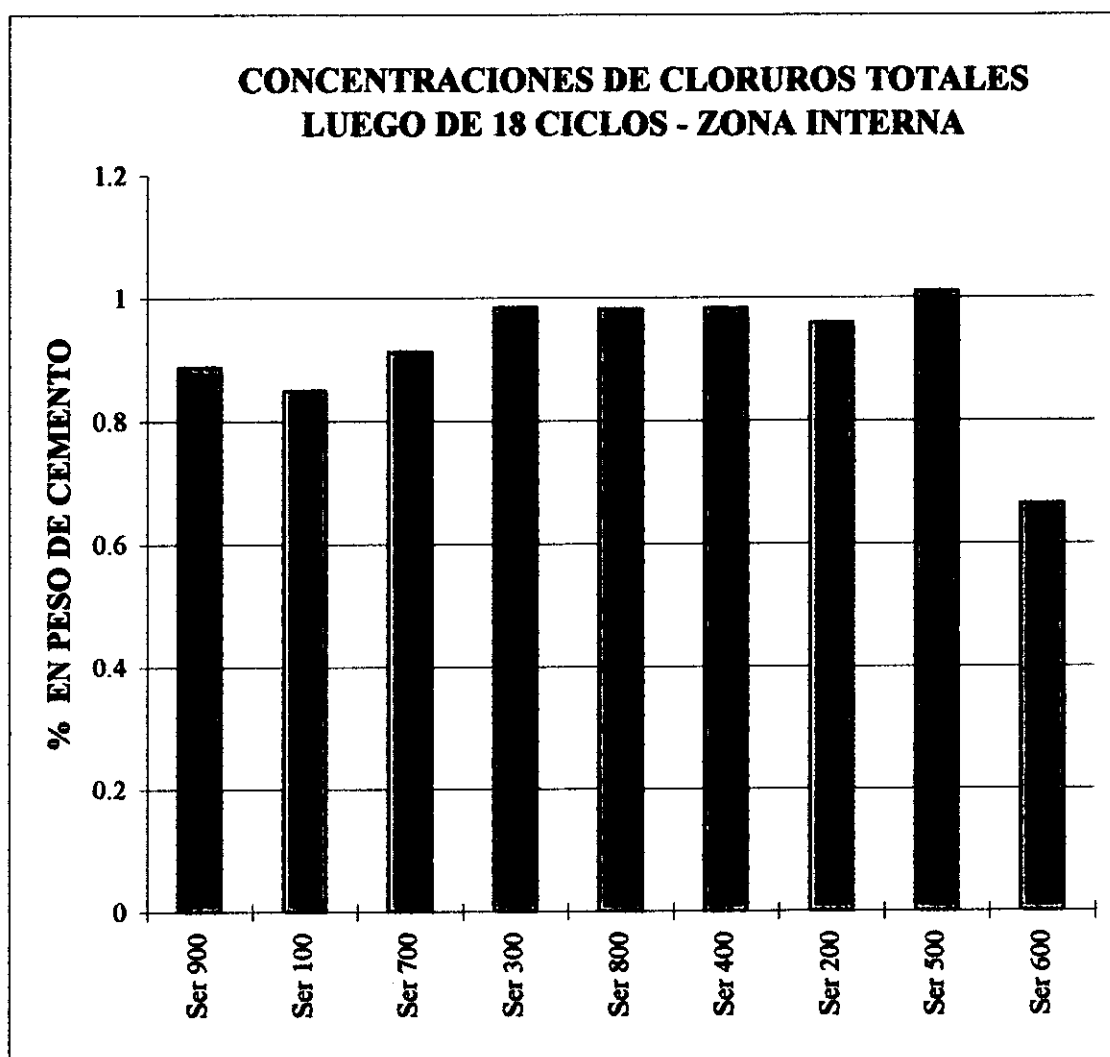




**Gráfica 32. Cloruros Totales vs Contenido de Aire - Zona Interna**



**Gráfica 33. Cloruros Totales vs Relación A/C - Zona Interna**



**Gráfica 34. Cloruros Totales Zona Interna**

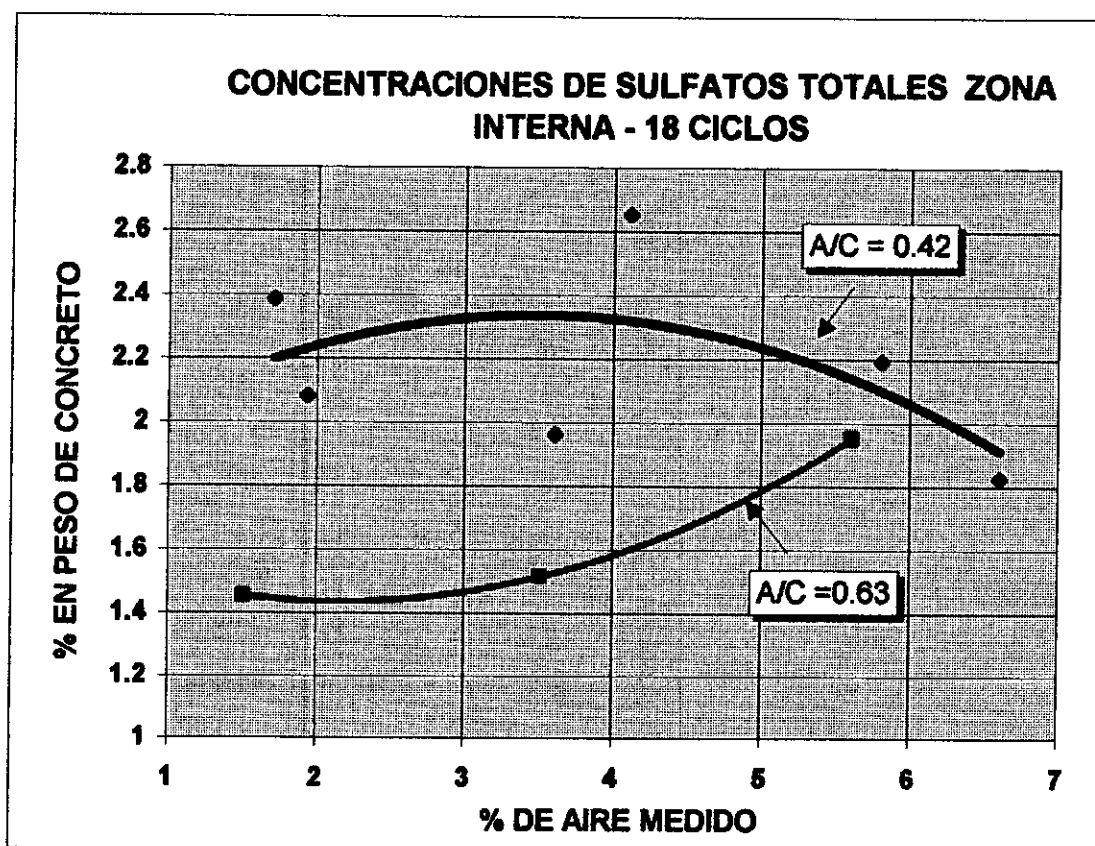
ensayos de comprobación se requeriría de una mayor cantidad de pruebas para llegar a conclusiones certeras a este respecto.

En términos generales las cantidades de cloruros totales encontradas son altas. Esto puede ser indicio de la alta severidad de los ataques realizados a las probetas.

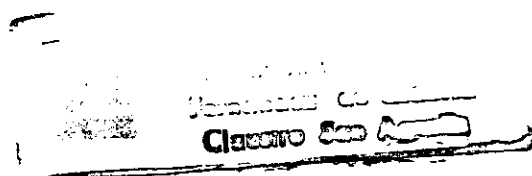
Las gráficas 29 y 32 presentan los resultados para las dos relaciones A/C empleadas; permiten apreciar que a medida que aumenta la relación A/C los contenidos de cloruros totales encontrados en las probetas son mayores, excepto por las mezclas de relación A/C 0.63 y 5.6 % de aire que registraron menores contenidos de cloruros totales.

**5.6.2 Sulfatos Totales** En estos ensayos se verifica un comportamiento opuesto al de los cloruros totales.

Para la relación A/C 0.42 se obtuvo una disminución de la cantidad de sulfatos totales encontrados en la zona interna de los especímenes a medida que aumentó el contenido de aire en las mezclas. Contrariamente, en las mezclas de relación A/C 0.63 la cantidad de sulfatos totales al interior del hormigón fue mayor cuando se incrementó el contenido de aire.



**Gráfica 35. Sulfatos Totales Zona Interna**



Estos resultados confirman la teoría de que en las reacciones del concreto con las sustancias presentes en el agua de mar los sulfatos desplazan a los cloruros de sus compuestos y que, a su vez, los compuestos de aquellos son menos estables en presencia de cloruros. Es esta la razón para que en el agua de mar no se presenten corrosiones por sulfatos en el hormigón, y para que las medidas que favorecen la durabilidad del concreto en ambientes sulfatados no sean siempre aplicables en estructuras para los ambientes marinos.

Las mezclas de relación A/C 0.42 y 4.1 % de aire no presentaron resultados tan positivos ante las pruebas químicas como ante los demás ensayos. Las mezclas de relación A/C 0.63 y 5.6 % de aire, por su parte, mostraron un comportamiento excelente en estas pruebas (gráfica 34).

Sería conveniente comprobar estos resultados y continuarlos para observar la evolución del fenómeno a lo largo de los ciclos de ataque.

## 5.7 SIGNOS EXTERNOS

La observación cuidadosa del proceso de deterioro fue parte fundamental de la investigación. Si bien se realizó un estudio, en lo posible, minucioso y extenso a través de los ensayos descritos, éstos fueron acompañados por un seguimiento visual, igualmente importante, de lo que ocurría a los especímenes a medida que se

desarrollaban los ciclos de ataque. La observación de las probetas fue complementada con consultas a los asesores, investigación bibliográfica acerca de los síntomas presentados y registros fotográficos (ver Anexo A).

Los signos externos son importantes en la medida en que representen los procesos desarrollados al interior de las probetas; en las estructuras reales emplazadas en el medio marino son éstos quienes de forma más rápida y permanente pueden dar cuenta de la ocurrencia o no de procesos corrosivos en el hormigón. Es, por tal motivo, sumamente importante una correcta lectura de la apariencia del concreto que, sin ser el objetivo de este trabajo, es un ingrediente fundamental en el momento de evaluar el comportamiento de las diferentes mezclas sometidas a los ciclos de ataque.

Inicialmente se percibió al tacto un cambio en la textura superficial de las probetas. Consistía éste en que la superficie de aquellas elaboradas sin inductor de aire se tornaba áspera en edades tempranas, mientras que las de aquellas fabricadas con aire incluido se mantuvieron mas lisas aún ante los ataques abrasivos iniciales. Esto corresponde a lo sugerido por algunos investigadores en cuanto a la mayor homogeneidad y resistencia de las capas superficiales de los concretos con aire incorporado, debidas a su efecto de atenuar la exudación y la evaporación rápida del agua de sangrado. (Ardila y Tsuchiya, 1991, 83).



Las fotografías No 1 y 2 muestran el estado exterior de las probetas de relación A/C 0.42. De acuerdo a dichas fotografías las probetas mas deterioradas fueron aquellas correspondientes a los mayores contenidos de aire. Mientras que la probeta correspondiente al 1.7 % de aire presentó pérdidas de material en puntos aislados, resultando ser las de mejor apariencia, la probeta correspondiente a 6.6 % de aire presentó una pérdida mas generalizada del material de su superficie. Las probetas de 4.1 y 5.8 % de aire aparecen mas sanas que el resto de las probetas elaboradas con aditivo incorporador. Las fotografías No 11 a 16 presentan en forma más detallada este hecho.

Para la misma relación A/C los signos externos de deterioro no aparecieron generalizados sino parcialmente sobre la superficie de las probetas. En las fotografías se confirma la mejor apariencia de la muestra de 1.7 % de aire, que sólo adoleció de pérdidas puntuales de material; curiosamente la probeta de 1.9 % de aire aparece sustancialmente más deteriorada que la anterior, habiendo sido esta fabricada, al igual que la otra, sin aditivo incorporador de aire.

Las probetas más dañadas dentro del grupo de la relación A/C 0.42 fueron las de 3.6 y 6.6 % de aire. Estas observaciones concuerdan notablemente con los resultados de las pruebas de ultrasonido.

Los daños externos en las probetas de relación A/C 0.63 fueron notablemente mayores que los de las anteriores.

Es curioso el hecho de que a temprana edad ( 7 ciclos) la probeta correspondiente a la mezcla con 3.5 % de aire (relación A/C 0.63) presentó un mejor aspecto que las de menor y mayor contenido de aire (ver fotografía No 3), mientras que al final del proceso (ciclo 25) fue esta misma la que apareció como la más deteriorada (fotografías No 4, 19 y 20); las de 1.5 y 5.6 % de aire, por su parte, presentaron un estado muy parecido como se puede apreciar en forma más detallada en las fotografías No 17, 18 y 20.

En las fotografías se registra cómo la mezcla más afectada por el ataque del medio marino simulado fue la de relación A/C 0.63 y 3.5 % de aire, resultado que concuerda con los de los ensayos realizados. Por su parte, la de 5.6% de aire y relación A/C 0.63 presenta un desempeño bastante satisfactorio.

Las fotografías No 5 a 10 permiten apreciar la diferencia del comportamiento de las dos relaciones A/C ensayadas. Claramente, aquí, son superiores las de la relación A/C 0.42, lo que es mas apreciable luego de 25 ciclos (fotografías No 6, 8 y 10) que en edades tempranas (5, 7 y 9). Al igual que en los ensayos de ultrasonido con contenidos de aire de alrededor de 5.7 % la apariencia de las muestras para ambas relaciones A/C es muy similar.

## 5.8 ABSORCION

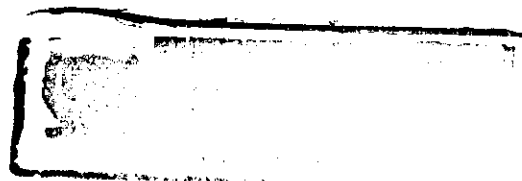
El haber tomado medidas del peso de las probetas antes y después del secado en el horno permitió registrar la forma como varió a través de los ciclos la cantidad de agua que la mezcla tomaba temporalmente mientras permanecía en el ambiente de saturación (ya se mencionó que hubo una cierta cantidad de agua, tomada por las probetas durante el proceso, que aparentemente entró a formar parte del hormigón y no fue removida por el secado).

La medida de la absorción aquí presentada consistió en medir la forma como cambiaron los pesos húmedo y seco de los especímenes:

$$(\text{Peso Superficialmente Seco, Saturado} - \text{Peso Seco}) / \text{Peso Seco}$$

En los resultados de este ensayo (Anexo C) se aprecia cómo la cantidad de agua absorbida se mantiene dentro de rangos muy estables para todos los tipos de mezclas. Lo más notable de estos ensayos es la tendencia a que la absorción descienda hasta un mínimo (alrededor de los quince ciclos) para luego volver a aumentar. Este mínimo fue por lo general el mismo sin importar de que tipo mezcla se tratase y coincidió con la observación de muestras externas de deterioro en los especímenes.

La tendencia a fluctuar de los valores de la absorción disminuyeron a medida que aumentó el aire en el concreto.



## **6. CONCLUSIONES**

Al asomarse a la investigación de la corrosión del concreto en ambientes agresivos y particularmente en el medio marino se encuentra que a pesar de haberse realizado grandes esfuerzos es este un tema en el que aún falta mucho por hacer y por estudiar; los problemas relacionados con la corrosión de estructuras de concreto requieren, sin embargo, soluciones urgentes.

Muchas personas e instituciones han emprendido en este sentido tareas de grandes dimensiones. Este trabajo ha sido un pequeño aporte al estudio y la búsqueda de hormigones durables en el ambiente marino.

### **6.1 RESPECTO A LA INVESTIGACION**

Los ensayos realizados fueron bastante extensos y variados. De su magnitud resalta la cantidad de datos obtenidos que posibilitaron la observación de tendencias generales en las mezclas ensayadas.

En este tipo de ensayos es necesario dejar estable el mayor número de factores posibles, sacrificando incluso, de ser necesario, la cantidad de características o variables a estudiar.

Es muy importante mantener patrones con qué comparar las muestras sometidas a un determinado ataque. Esto permitió durante este estudio aclarar muchos fenómenos observados y facilitó el análisis. Cuando hay involucrado cierto grado de incertidumbre esta herramienta es muy valiosa.

El procedimiento de ataque a las probetas es susceptible de ser mejorado con miras a obtener métodos eficaces y económicos de simulación de los efectos del medio sobre el concreto, mediante la búsqueda de nuevos parámetros representativos a medir, por ejemplo, o nuevas formas que mejoren la medición de factores ya estudiados.

Para el seguimiento de los cambios de volumen en las mezclas no fueron, las probetas empleadas, las más apropiadas. En este sentido se ha empleado anteriormente y en la actualidad especímenes más esbeltos que registran mejor los cambios en las medidas de los especímenes. Para cada parámetro a medir debe existir un tipo óptimo de probeta que no es el mismo para todos.

El proceso de secado empleado durante la simulación debe ser mejorado, buscando un control más exacto de las temperaturas y, en general, de las condiciones de exposición

empleadas. Tal vez sea preferible realizar el secado a temperaturas más bajas, a despecho de la velocidad del ataque; los secados drásticos pueden tener sus propios efectos sobre las probetas, diferentes a los efectos naturales del medio.

En general es deseable que se tenga el mayor control posible sobre las condiciones de sometimiento de los especímenes dentro de lo económicamente posible.

La permeabilidad del concreto es de singular importancia en su capacidad de resistir los ataques del medio externo. Es necesaria la implementación de técnicas que permitan su medición y que, incluso, puedan llevar a normalizar la permeabilidad de las mezclas de hormigón, de acuerdo al ambiente a que estén destinadas. Las especificaciones en este sentido serían tanto o más importantes que la misma resistencia a la compresión.

Los ensayos de ultrasonido, en la medida en que se emplearon, resultaron ser pruebas confiables y suficientemente sensibles a cambios ocurridos al interior del concreto. Para confirmar su aplicabilidad al estudio de la corrosión sería recomendable realizar un seguimiento a las probetas durante los ciclos de ataque. Esto permitiría mejorar enormemente los ensayos dirigidos a evaluar la durabilidad del concreto e introduciría una posibilidad de diagnóstico no destructivo y rápido del estado de los especímenes y estructuras de hormigón.

Los ensayos a corto plazo mostraron coherencia en muchos de sus resultados. El desarrollo de los signos externos del proceso parece coincidir con lo observado en la práctica por muchos investigadores, lo que indica que es posible desarrollar en laboratorio técnicas que anticipen y midan el deterioro del concreto en ambientes agresivos. Tales ensayos aportan resultados de tipo comparativo y podrían servir para la obtención de nuevos conocimientos y mejorar la práctica constructiva de estructuras de hormigón en los ambientes marinos. El tiempo que requiere su desarrollo los hace no aplicables, sin embargo, en los casos en que se requiera seleccionar un determinado tipo de mezcla para una obra específica.

A pesar de simular adecuadamente los procesos no es posible por el momento determinar una escala de tiempo que relacione el modelo con las estructuras reales. Llegar a resultados concretos y a predicciones de la vida útil de estructuras, modelos o leyes del desarrollo de los procesos corrosivos es una meta para llegar a la cual se requiere aún mucho trabajo y dedicación.

## **6.2 RESPECTO AL AIRE INCLUIDO**

La inclusión efectiva de aire en las mezclas depende de una multitud de factores, lo que hace difícil su manejo y control. En laboratorio es preciso que se mantenga fijo el mayor número de variables en el proceso de diseño y elaboración de los especímenes para obtener los contenidos de aire precisos que se buscan; en la fabricación en planta

es necesario un trabajo previo de investigación para determinar las dosificaciones necesarias en un amplio rango de condiciones de producción, así como la aplicación de controles de calidad muy estrictos.

La teoría y observaciones en los ambientes en los que el concreto está sometido a ciclos de congelamiento y deshielo son concluyentes al confirmar los beneficios del aire incluido al hormigón y recomendar su uso por:

- Interrumpir las capilaridades del concreto, impidiendo el ingreso de sustancias agresivas.
- Proporcionar alojamiento a compuestos expansivos que puedan formarse al interior del hormigón y actuar como especies de colchon o reserva que absorbe, hasta cierto grado, las expansiones causadas por el congelamiento del agua o la cristalización de sales dentro del concreto.

Los beneficios que el aire incluido causa al concreto y a su comportamiento en el medio ambiente marino no se presentan de un modo directo, mas bien son la conjugación de diferentes efectos unos mas favorables que otros. Existen ciertos contenidos de aire que resultan perjudiciales para la durabilidad del hormigón ya que aumentan la permeabilidad, por ejemplo. De esta forma, la selección de un tipo de



mezcla de concreto responde a una ponderación de variables y de posibles efectos para obtener la mezcla apropiada para el ambiente donde ha de implantarse la estructura.

Las respuestas del concreto a la inclusión de aire son diferentes para cada uno de los contenidos de aire estudiados. Al parecer, si se incorpora a la mezcla un contenido de aire menor del adecuado los efectos son perjudiciales, es el caso de las mezclas con relación A/C 0.63 y 3.5 % de aire en volumen. Igualmente, los efectos difieren para las distintas propiedades del concreto estudiadas.

En las mezclas con una relación A/C alta (0.63) la inclusión de aire que llevó a un contenido de éste de 5.6 % mejoró su comportamiento en lo referente a su resistencia a la compresión, estabilidad del peso, velocidad de pulso ultrasónico (que mide en cierta forma la resistencia del hormigón y su módulo de elasticidad), la penetración de cloruros totales y su apariencia externa.

En el caso de las mezclas con relación A/C 0.42 se encontró que el contenido de aire se 4.1% fue el que mejor se comportó. En general contenidos de aire entre 4 y 6 % fueron favorables para la durabilidad de las mezcla; contenidos menores ocasionaron menor capacidad para soportar los ataques de medio marino simulado.

### 6.3 RESPECTO A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

Al concreto lo afectan muchas sustancias en variados ambientes, y de muchas maneras; los mecanismos de corrosión son muy diversos y su complejidad se incrementa por la acción simultánea de muchos factores.

En lo que respecta a ataques del medio no existen recetas universales: cada problema amerita un estudio detallado.

La permeabilidad del concreto es el factor fundamental en su capacidad de resistir ataques del medio externo; las medidas encaminadas a mejorar el desempeño del concreto en el ambiente marino deben dirigirse a buscar las mezclas mas impermeables posibles.

Para obtener durabilidad en los concretos empleados en obras marinas deben tomarse las precauciones necesarias y cumplirse con estrictos controles. La producción de concreto para el ambiente marino requiere sus propias normas, controles y especificaciones, diferentes a la sola resistencia a la compresión.

No basta con un buen diseño de mezclas y una alta calidad en la fabricación del concreto, para elaborar estructuras durables es preciso utilizar una correcta práctica constructiva. El seguimiento, correcto uso y mantenimiento de las obras, luego de su

construcción, es tan importante como los cuidados en su elaboración y procesos constructivos.

Las relaciones A/C bajas y los contenidos altos de cemento (450 kilos por metro cúbico de concreto) presentan, en general, comportamientos adecuados. Los contenidos de cemento de 300 Kg/M<sup>3</sup> fueron mucho mas atacables que los anteriores; el contenido de cemento a emplear debe ser mayor.

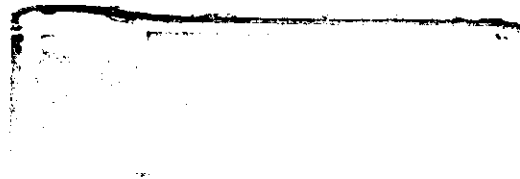
El aire incluido en las cantidades apropiadas puede mejorar las condiciones de una mezcla. Este hecho es más notable en las mezclas menos ricas en cemento.

## 7. RECOMENDACIONES

Se debe tener mucho cuidado al usar aditivo incorporador de aire ya que debe aplicarse en las cantidades y en las condiciones apropiadas para no perjudicar la capacidad del concreto de satisfacer las características de resistencia y durabilidad requeridas. El uso de estos aditivos requiere de estrictos controles de calidad.

Es preciso dedicar más y mayores esfuerzos al estudio de la corrosión del concreto en los ambientes marinos a través de proyectos bien delimitados y siguiendo un lineamiento general bien definido.

La producción del concreto para el medio ambiente marino debe considerar las muchas propiedades que afectan su durabilidad, en especial su permeabilidad. Las cantidades apropiadas de material cementante, compatibilidad de los aditivos, las adiciones y los agregados empleados, las adecuadas prácticas constructivas: fabricación, transporte, colocación, curado, control de grietas, y los cuidados y monitoreo durante la vida útil



de la estructura deben tenerse en cuenta para lograr resultados satisfactorios en este campo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

GOMEZ CORTES, José Gabriel. Durabilidad del concreto. Memorias Técnicas: Reunión del Concreto de 1994. Santafé de Bogotá: ASOCRETO, 1994, Tomo 4, 52p.

DEL VASTO, Silvio y MEJIA, Ruby. Corrosión del Concreto Armado en Medios Marinos. Memorias Técnicas: Reunión del Concreto de 1990. Santafé de Bogotá: ASOCRETO, 1990, Tomo 5, 21p.

NEVILLE, A.M. Tecnología del Concreto. Traducción: Gloria Sierra de Padilla. Mexico: LIMUSA, 1989, Tomo 3, 403p.

SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del Concreto y del Mortero. Santafé de Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 1987, 413p.

BICZOK, Imre. Concrete Corrosion and Concrete Protection. New York: Chemical Publishing CO, INC, 1967, 543p.

DURNING, T.A. y HICKS, M.C. Using Microsilica to Increase Concrete's Resistance to Agressive Chemicals. En: Concrete International; The Magazine of the American Concrete Institute, Detroit, Vol 13, Marzo de 1991, 7p.

VARGAS, Daniel y HORRILLO, Juan. Experiencias sobre Corrosión en Concretos de la Refinería de Cartagena. ECOPETROL, 1989.

VEGA ORTIZ, Joaquin E. La Importancia de la Corrosión y Protección Catodica en Estructuras Metálicas bajo Suelos. Cartagena: Universidad de Cartagena, 1985.

MAXWELL COOK, Paul. Durability of Concrete Structures in the Ocean Environmental. Federation Internationale de la Precontrainte. En: FIP SYMPOSIUM ON CONCRETE SEA STRUCTURES. London: FIP, 1972, P. 141-145; 225 p.

ARDILA LUNA, Carlos Hernan y TSUCHIYA CAMARGO, Juan Carlos. Efectos de un Incorporador de Aire en las Propiedades Físicas del Hormigón. Santafé de Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1991.

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. Durabilidad del Concreto. Mexico: LIMUSA, 87p.

HIME, William y ERLIN, Bernard. Some Chemical and Physical Aspects of Phenomena Associated with Chloride Induced Corrosion. American Concrete Institute. En: Corrosion, Concrete, and Chlorides: steel Corrosion in Concrete: Causes and Restraints. Detroit, 1987, P. 1-12; 169 p.

MEHTA, P. Kumar. Durability of Concrete in Marine Environment: A Review. American Concrete Institute. En: Performance of Concrete in Marine Environment. Detroit, 1980, P. 1-20; 627p.

MATHER, Bryant. Concrete in Sea Water. En: Concrete international. Detroit, 1982, Vol.4, P. 28-34.

CARBONE - MORA C. Francisco. Corrosión en Puertos. En: El Ingeniero Civil. Lima: Publicivil, 1989. No 61, P. 12-16.

MEHTA, P. Kumar. Durability of Concrete Exposed to Marine Environment, A Fresh Look. American Concrete Institute.; Canada Centre for Mineral and Energy Technology. En: Concrete in Marine Environment. Detroit, 1988, P. 1-29.

BREMNER, Theodore W.; HOLM, Thomas A. y NEWMAN, John B. Lightweight Aggregate Concrete Subject to Severe Weathering. En : Concrete International. Detroit, 1984, P. 327-349.

GEORGE, C.M. Long Term and Accelerated Tests of the Resistance of Cements to Seawater, with special reference to Aluminous Cements. En: Performance of Concrete in Marine Environment. Detroit, 1980, P. 327-349.

GJORV, Odd E. Sea Salts and Alkalinity of Concrete. En: Proceedings of the American Concrete Institute. Detroit, 1976, P. 512-516

BATIC, Oscar y WAINSZTEIN, Marcelo. Estudio Preliminar de la Resistencia de los Cementos Portland Nacionales a la Acción del Agua de Mar. En: Lemi Anales. La Plata, 1974, P. 245-273.

PHILLEO, Robert. Concreto en Ambiente Marino. En: Simposio Moderna Tecnología del Concreto. AVPC-ACI. Caracas, 1980, P. 61-77.

CONJEAUD, Michelle. Mechanism of Sea Water Attack on Cement Mortar. En: Performance of Concrete in Marine Environment. American Concrete Institute. Detroit, 1980, P. 39-62.

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ROCA VIDES, Gustavo y ARCILA LOPEZ, Carlos. Reparación y Protección Muelles de Santa Marta. En: Noticreto. Santafé de Bogotá, Diciembre de 1989, 6p.

MANTILLA, Arturo; ROCA, Gustavo y SIRTORI, Manuel. En Cartagena: Reparación de Muelles. En: Noticreto. Santafé de Bogotá, Septiembre de 1992, 3p.

GERWICK, Ben C.; International Experience in the Performance of Marine Concrete. En: Concrete International. Detroit, Vol 12, Mayo de 1990, 7p.

TAKAGISHI, Y; ICHIKAWA, H y TABUCHI, H. Experimental Study on Deterioration and Repairing of a Marine Concrete Structure. En: American Concrete Institute, Canada Centre for Mineral and Energy Technology. ACI. Detroit, 1988, P. 253-276, 739p.

VARELA DIAZ, Héctor y ESPINOSA MUÑOZ, Luis Y. Penetrabilidad de Iones Cloruros en Morteros con y sin Revestimiento. En: Jornadas Chilenas del Hormigón, Santiago de Chile, 1988. P. 82-91; 329p.

OSHIRO, Takeshi; TANIKAWA, Shin y GOTO, Nobuhiro. Study on Durability on Structures Exposed to Marine Environment. En: Evaluation and Rehabilitation of Concrete structures and Innovations in Design: Proceedings ACI International Conference. American Concrete Institute. Detroit: ACI 1992, P. 443-447, 2 Vol.

MALHOTRA, V. Mohan. Conferencia Internacional sobre desempeño del concreto en Ambiente Marino. Asociación Venezolana de Productores de cemento. En: Simposio Moderna Tecnología del Concreto. AVPC-ACI, Caracas, 1980 P. 61-77, 4 Vol

BUSLOV, Valery M. Marine Concrete: When to Repair, What to repair. En: Concrete International. ACI. Detroit, 1992, Vol 14, N5, 4 Vol., No 5, P. 36-40



HADLEY, Homer M. Concreto Em Agua Do Mar. Necessaria Revisao De ponto De Vista. Associacao Brasileira de Cimiento Portland, Sao Paulo, 1978, 27p.

NEVILLE, A.M. Tecnologia del concreto. Mexico: LIMUSA, 1988, Tomo 2, 235 p.

FERNANDEZ CANOVAS, M. Patología y Terapéutica del Hormigón Armado. 5a edición.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Corrosion, Concrete and Chloroides. Steel Corrosion in Concrete: Causes and Restrains. 1987, 169p.

GJORV, Odd E; TAN, Kefeng y ZHANG, Min Hong. Diffusivity of Chlorides from Seawater into High-Strenght Lightweight Concrete. American Concrete Institute, Detroit, 1994, Vol 91, No 5.

ZHANG, Min Hong y GJORV, Odd E. Permeability of High - Strenght Light Concrete. American Concrete Institute. Detroit, 1991, V.88, No5

BESLAC, J. Durability of Concrete to Marine Environment. En : Durability of Concrete: International Conference. Canada Centre for Mineral and Energy Technology. American Concrete Institute. Detroit, 1991 , P. 599-608.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Durabilityof Concrete, ACI. Detroit, 1975, 385p.

CRANE, Alan P. Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Society of Chemical Industry. London, 1983, 437p.

HOBBS, D. W. Alkali-Silica Reaction in Concrete. Thomas Telford Ltda. London, 1988, 183p.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Laboratory and Exercise Manual on Concrete Construction. John Wiley and Sons, Inc. New York, 1975, 267p.

**Anexo A. Registro fotográfico**

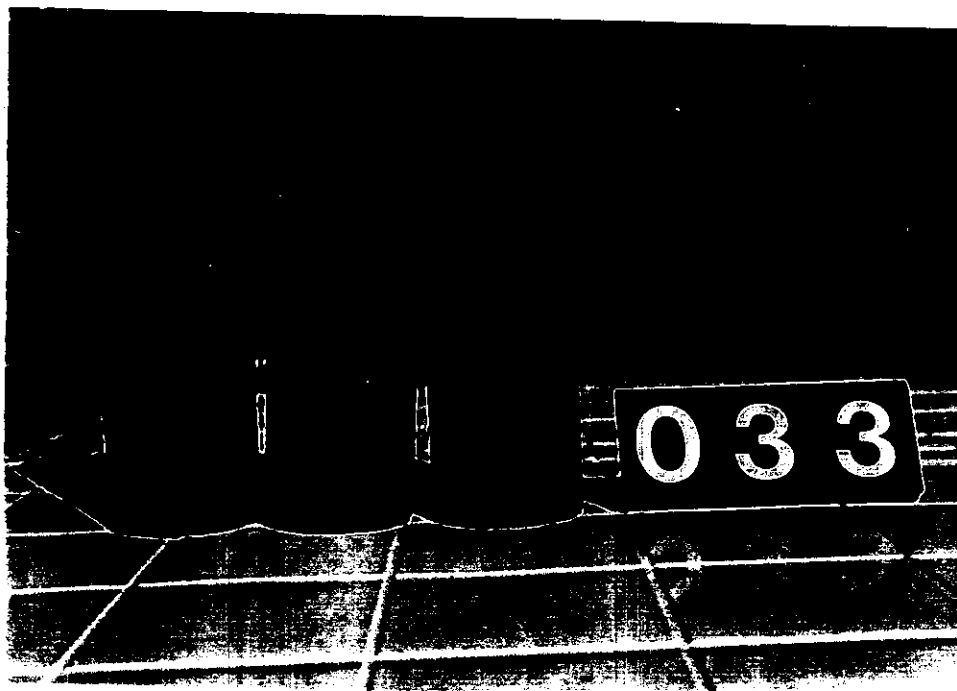


FOTO No 1. Relación A/C = 0.42, de Izq. a der. 1.7%, 1.9%, 3.6% de aire. A los 25 ciclos.

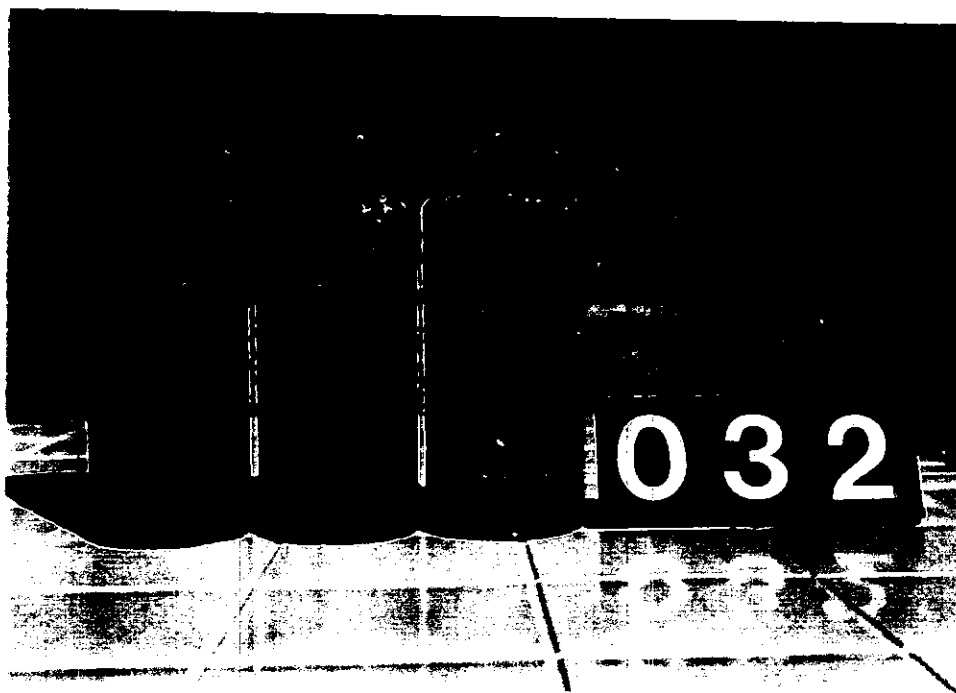


FOTO No 2. Relación A/C = 0.42, de Izq. a der. 4.1%, 5.8 %, 6.6 % de aire. A los 25 ciclos.

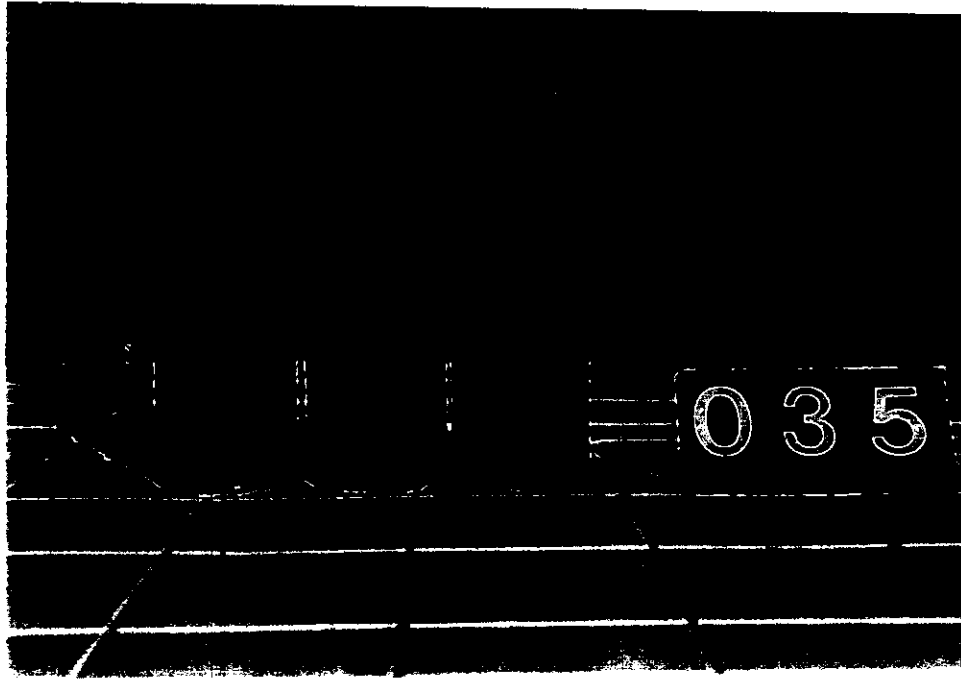


FOTO No 3. Relación A/C = 0.63, de Izq. a der. 1.5% , 3.5%, 5.6% de aire. A los 7 ciclos.

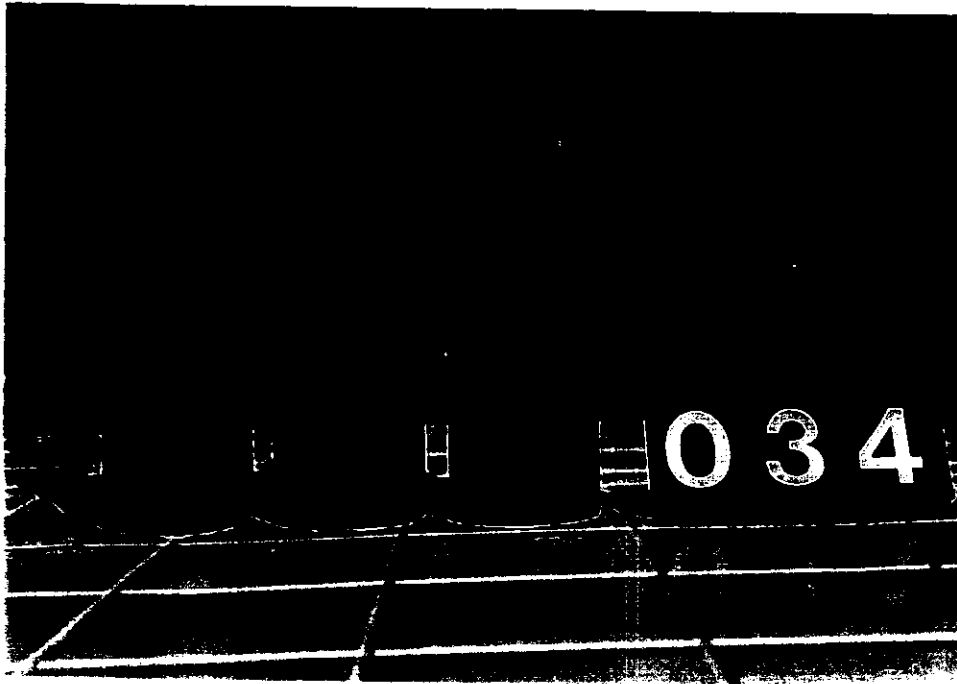


FOTO No 4. Relación A/C = 0.63, de Izq. a der. 1.5% , 3.5%, 5.6% de aire. A los 25 ciclos.

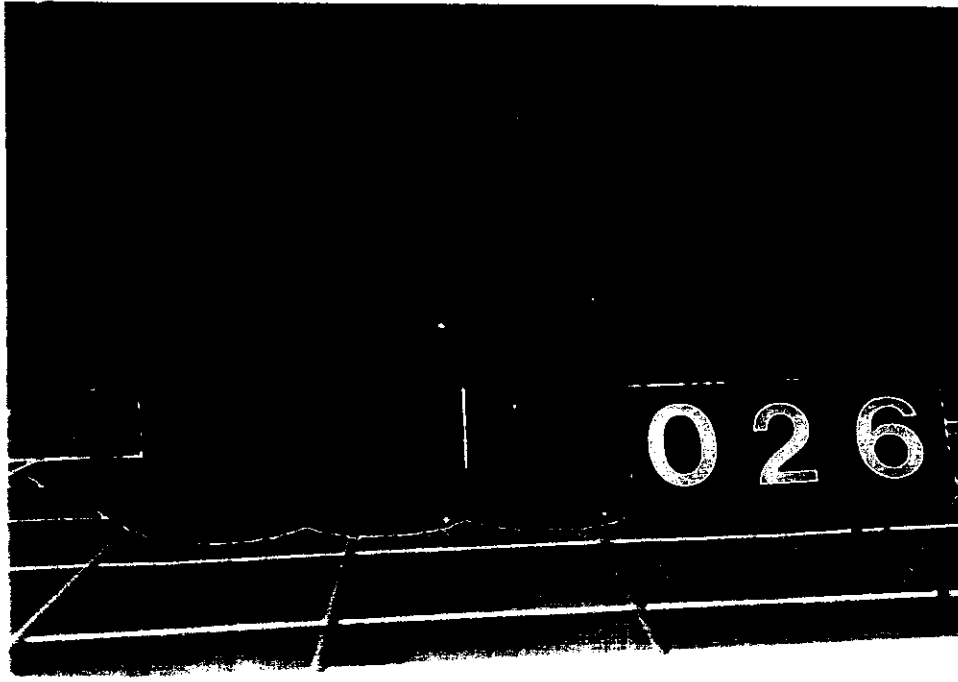


FOTO No 5. Izq. a der. Relación A/C = 0.42 - 1.7% de aire, A/C = 0.42 - 1.9% de aire, A/C = 0.63 - 1.5% de aire. A los 7 ciclos.

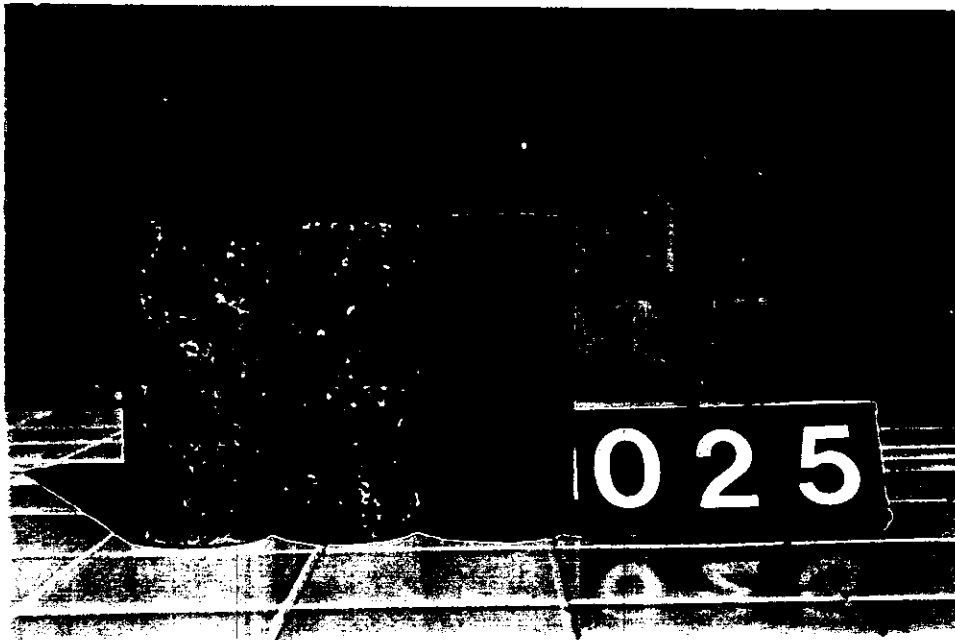


FOTO No 6. Izq. a der. Relación A/C = 0.42 - 1.7% de aire, A/C = 0.42 - 1.9% de aire, A/C = 0.63 - 1.5% de aire. A los 25 ciclos.

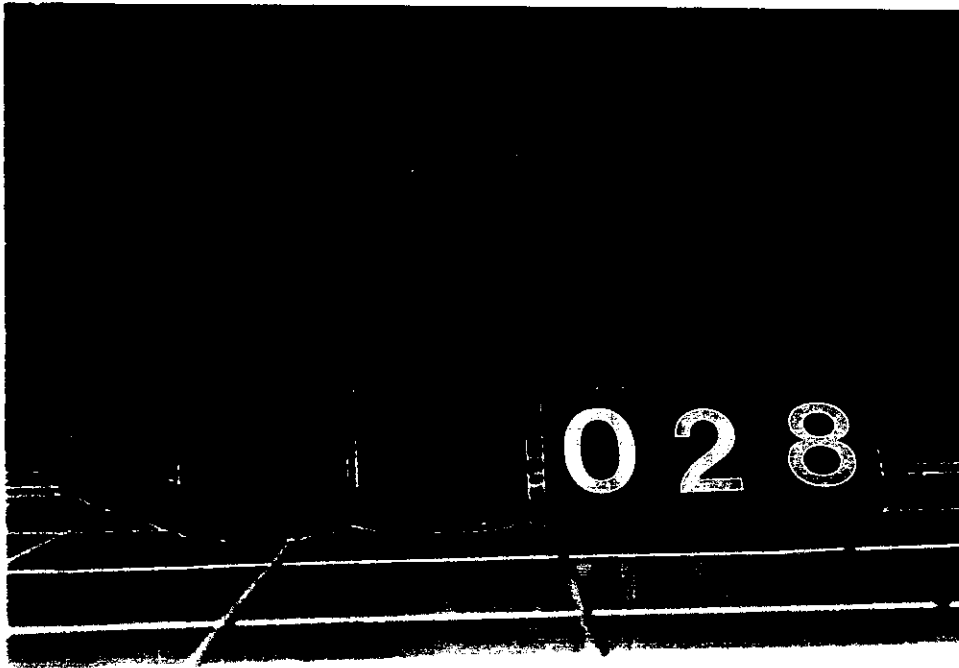


FOTO No 7. Izq. Relación A/C = 0.42 - 3.6% de aire. Der. Relación A/C = 0.63 - 3.5% de aire. A los 7 ciclos.



FOTO No 8. Izq. Relación A/C = 0.42 - 3.6% de aire. Der. Relación A/C = 0.63 - 3.5% de aire. A los 25 ciclos.

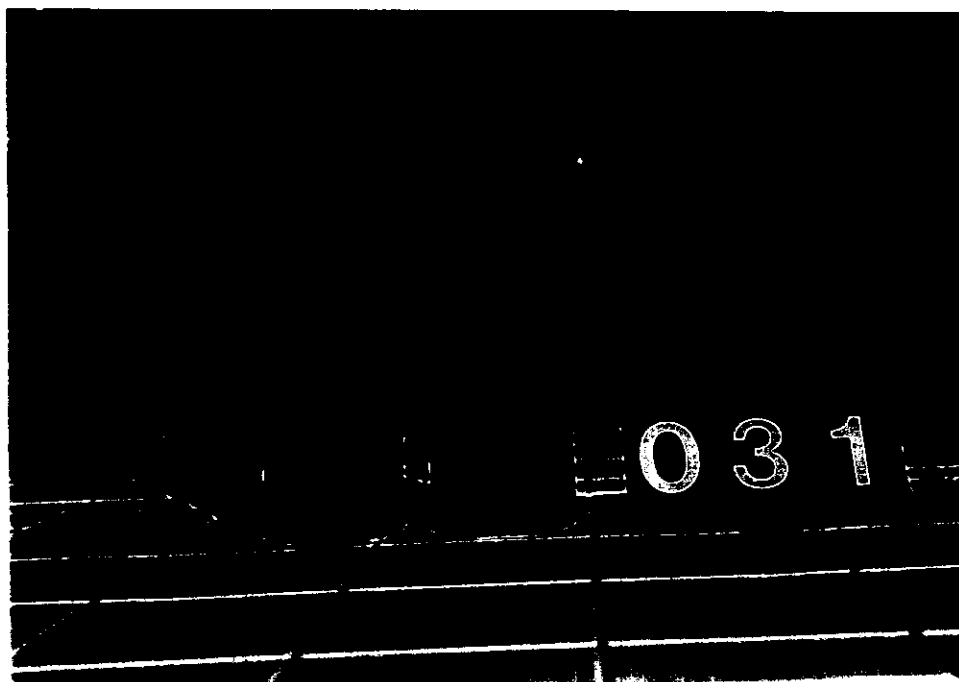


FOTO No 9. De Izq. a der. relación  $A/C = 0.42 - 5.8\%$  de aire,  $A/C = 0.63 - 5.6\%$ . A los 7 ciclos.

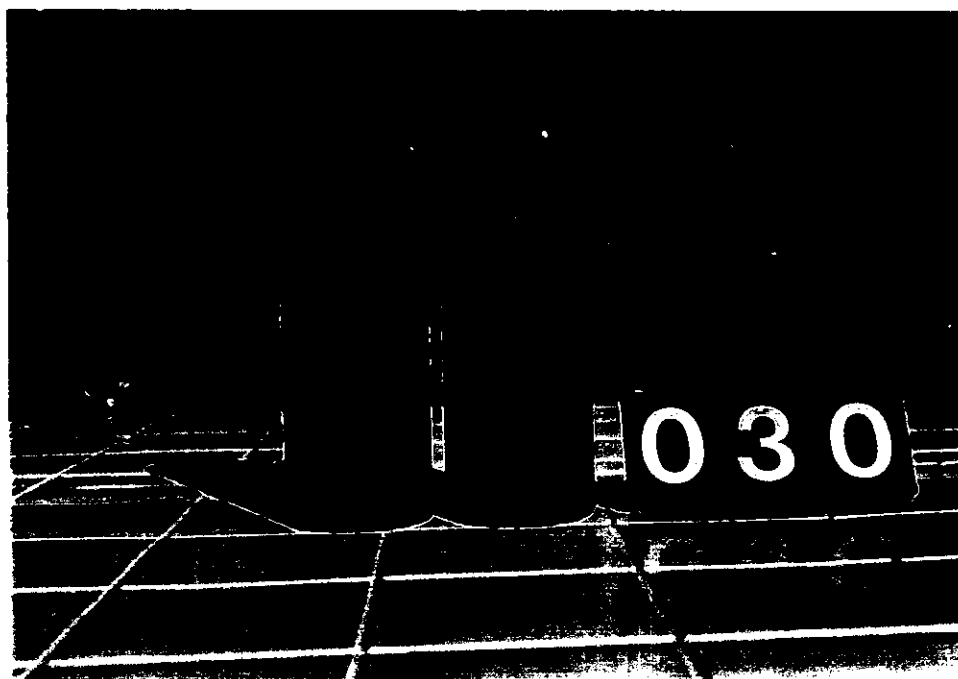
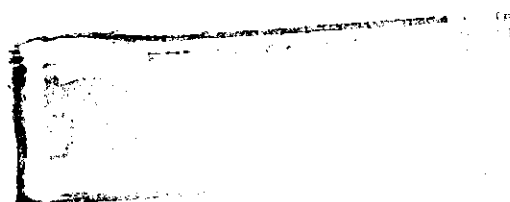


FOTO No 10. De Izq. a der. relación  $A/C = 0.42 - 5.8\%$  de aire,  $A/C = 0.63 - 5.6\%$ . A los 25 ciclos.



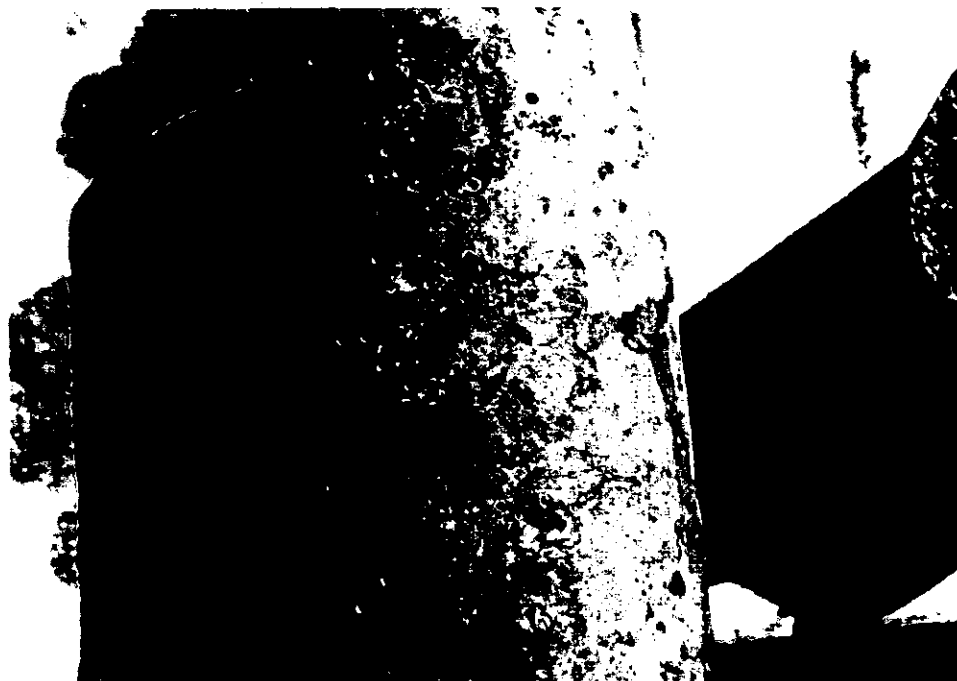


FOTO No 11. Relación A/C = 0.42 - 1.7% de aire a los 25 ciclos.



FOTO No 12. Relación A/C = 0.42 - 1.9% de aire a los 25 ciclos.





FOTO No 13. Relación A/C = 0.42 - 3.6% de aire a los 25 ciclos.



FOTO No 14. Relación A/C = 0.42 - 4.1% de aire a los 25 ciclos.



FOTO No 15. Relación A/C = 0.42 - 5.8% de aire a los 25 ciclos.



FOTO No 16. Relación A/C = 0.42 - 6.6% de aire a los 25 ciclos.

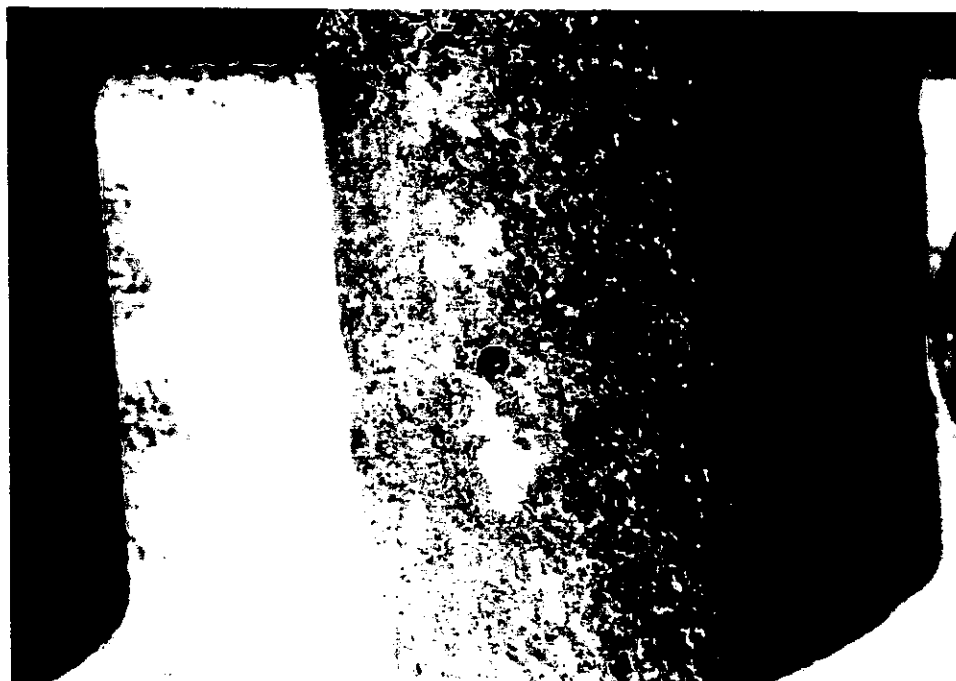


Figura #3

FOTO No 17. Relación A/C = 0.63 - 1.5% de aire a los 25 ciclos.



Figura #4.

FOTO No 18. Relación A/C = 0.63 - 5.6% de aire a los 25 ciclos.



FOTO No 19. Relación A/C = 0.63 - 3.5% de aire a los 25 ciclos.

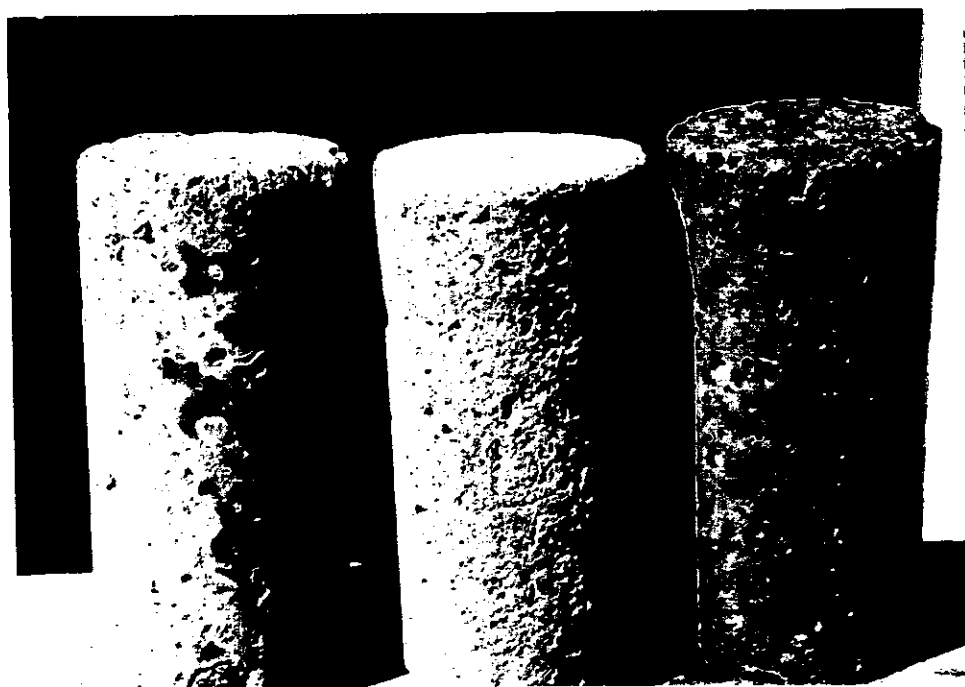
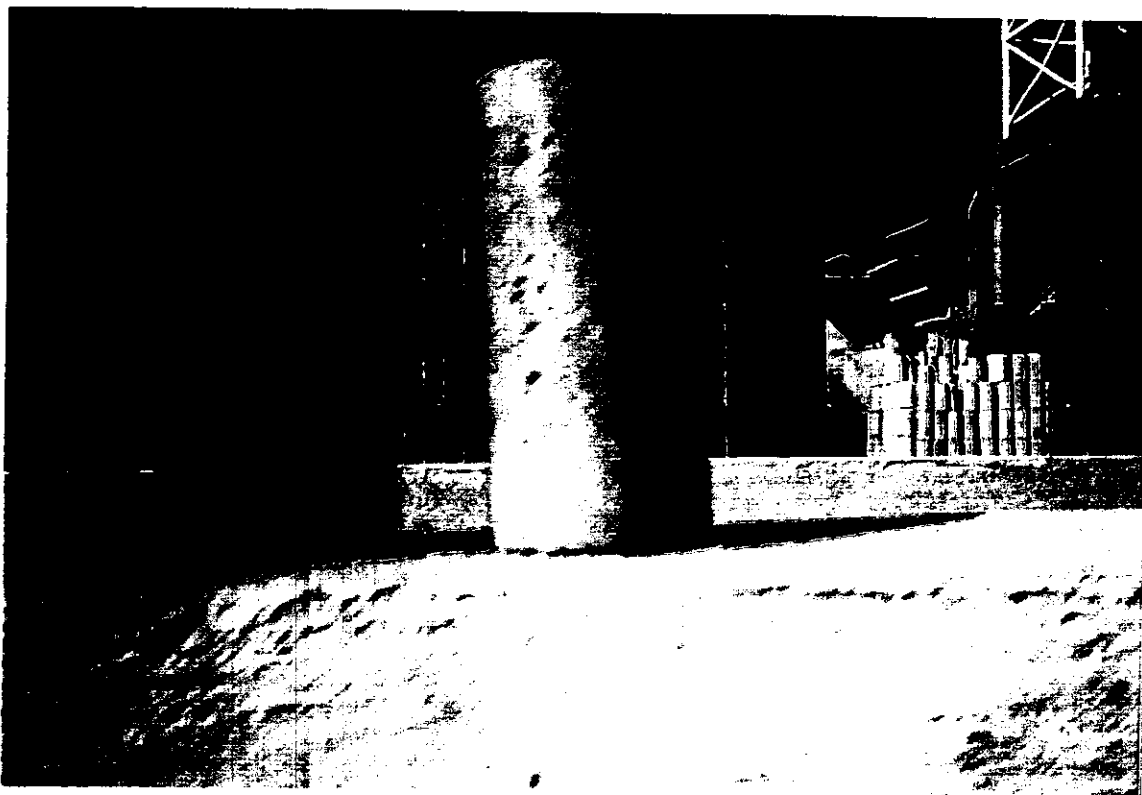


FOTO No 20. Relación A/C = 0.63, de izq. a der. 1.5%, 3.5 %, 5.6% de aire, a los 25 ciclos.



205

87

FOTO No 21. Cambios tempranos de color en las probetas atacadas. Izq. en agua de mar, der. patrón.



FOTO No 22. Incrustaciones de sales en la zona externa de probetas atacadas con agua de mar

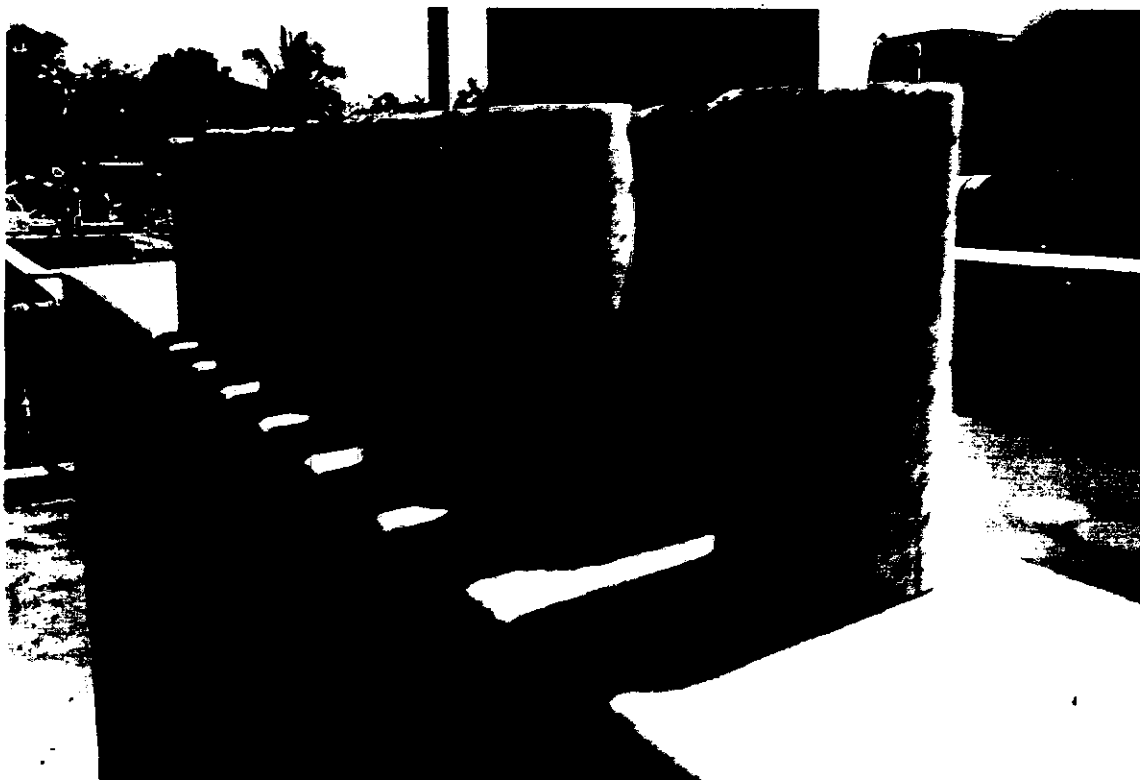
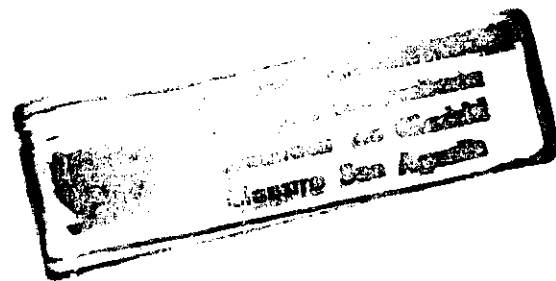
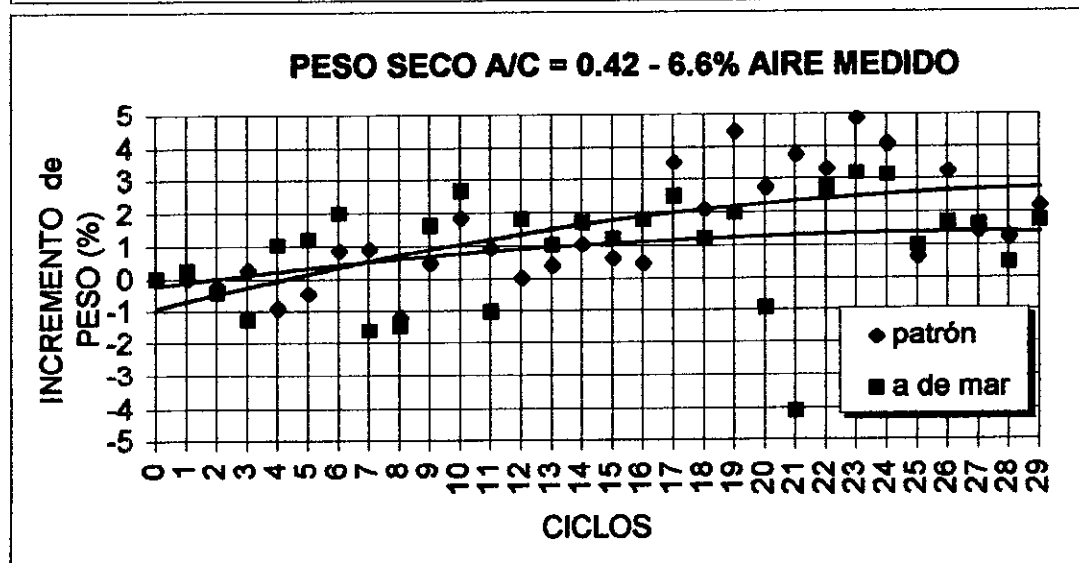
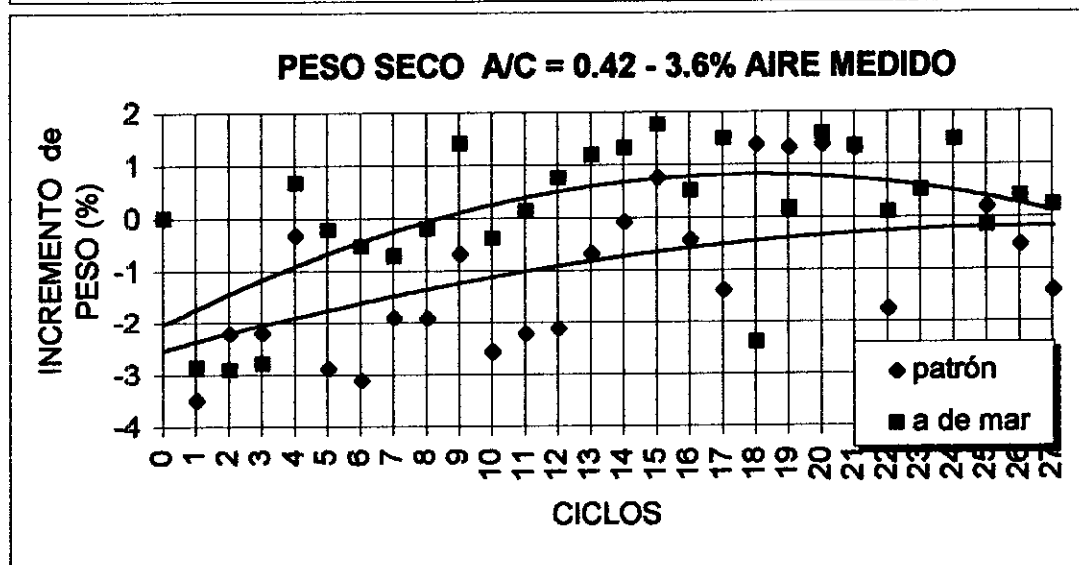
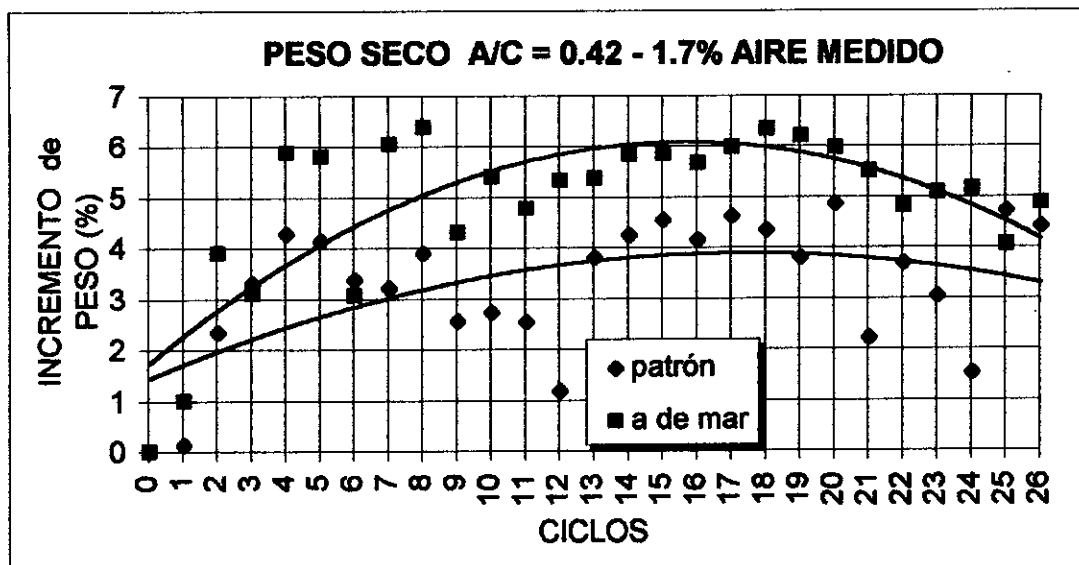


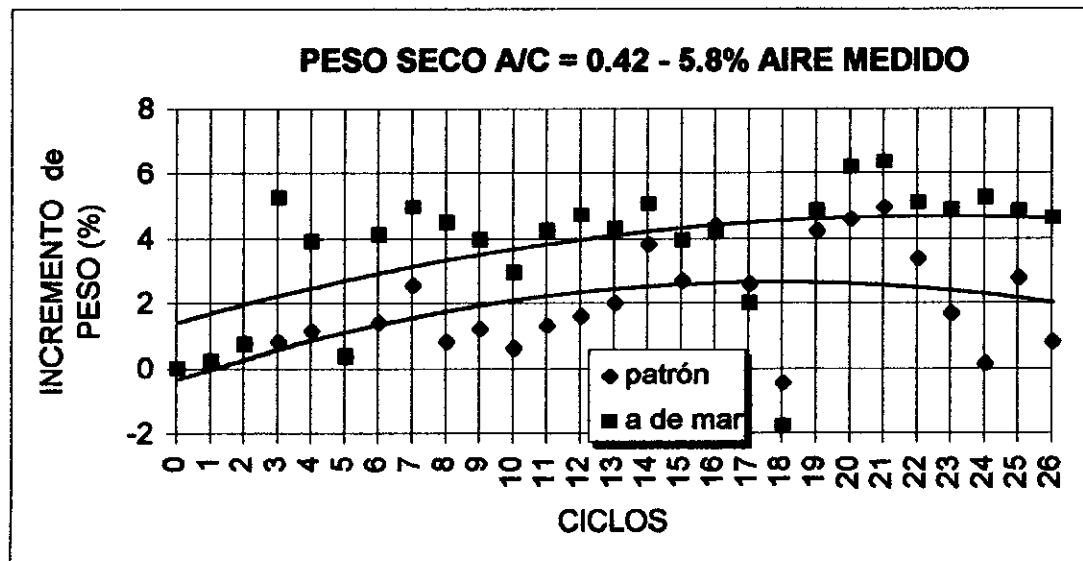
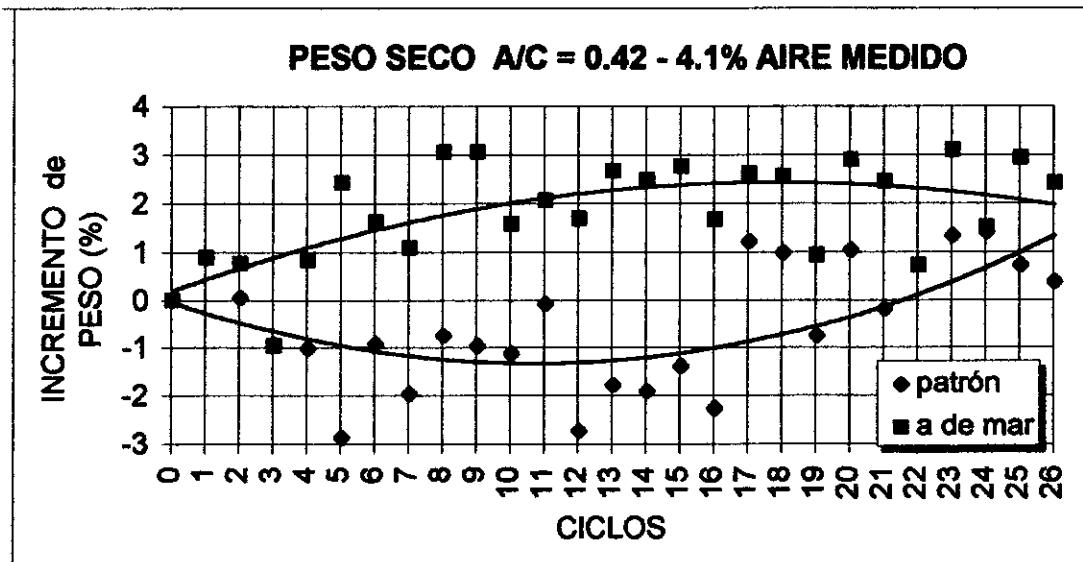
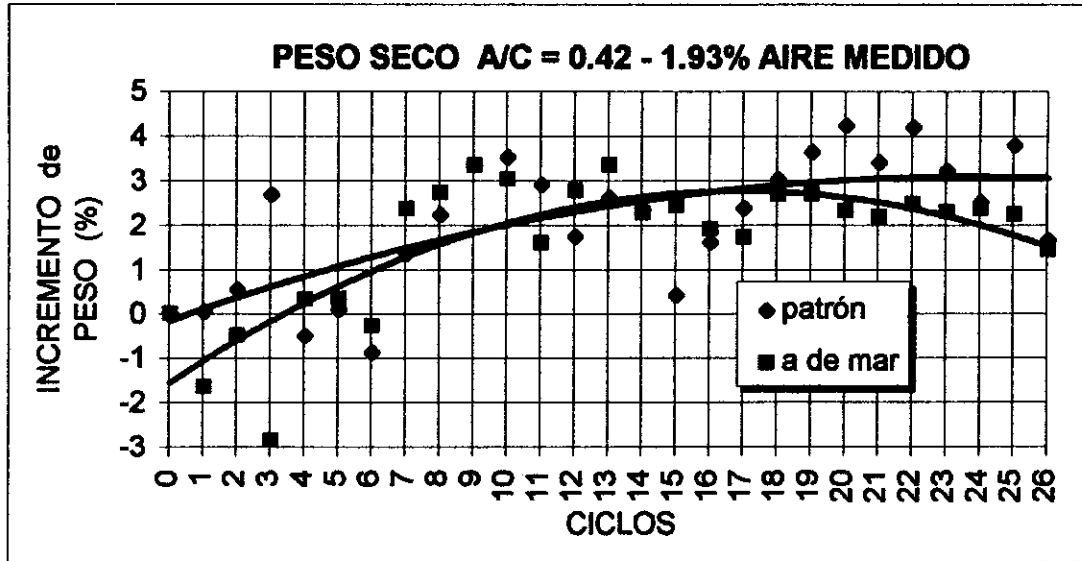
FOTO No 23. Capa superficial de apariencia blanquecina en pobetas atacadas por agua de mar.

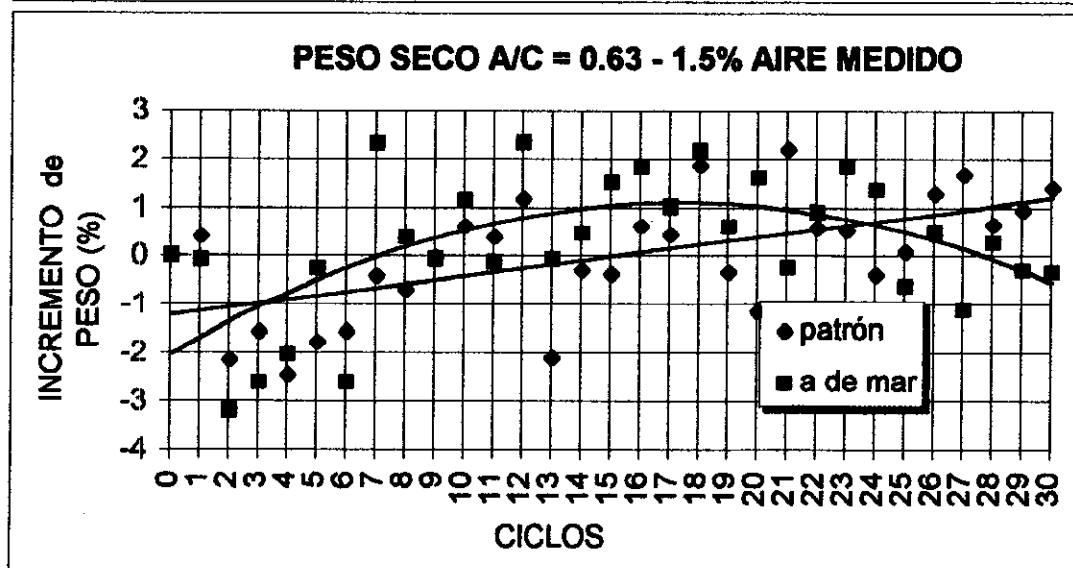
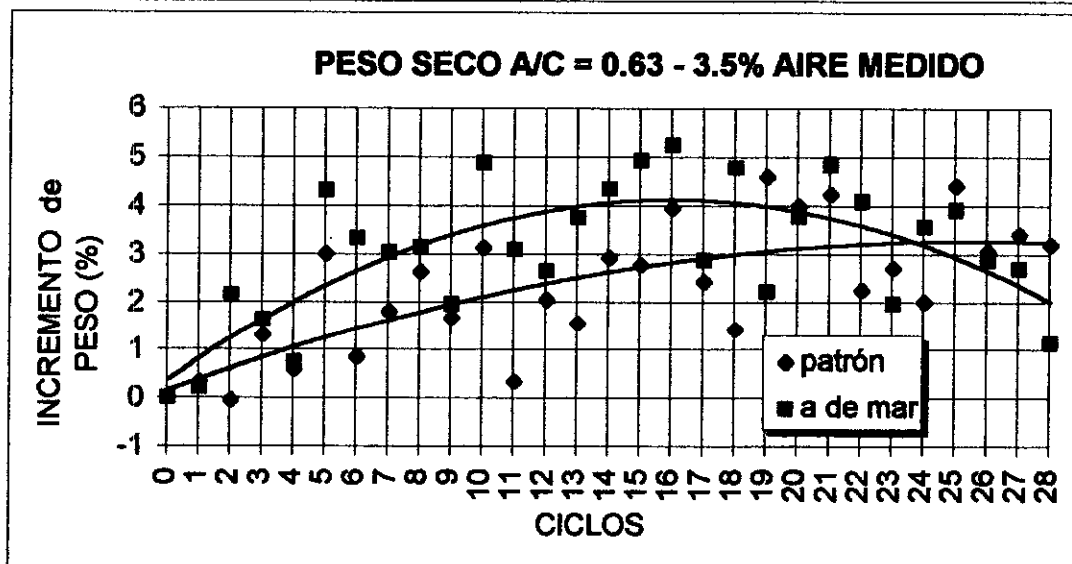
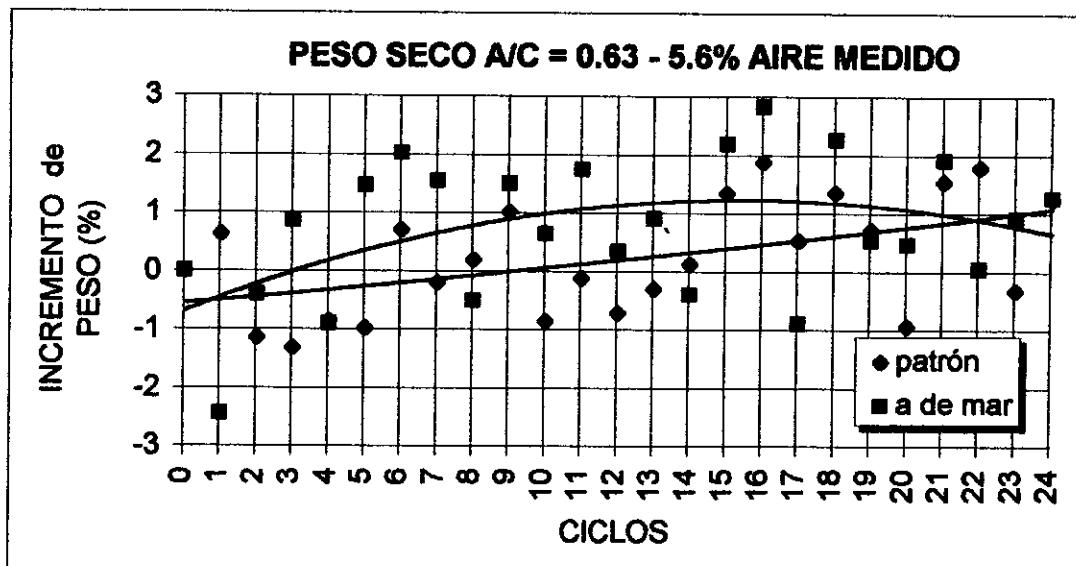
## Anexo B. Pesos de las probetas secas







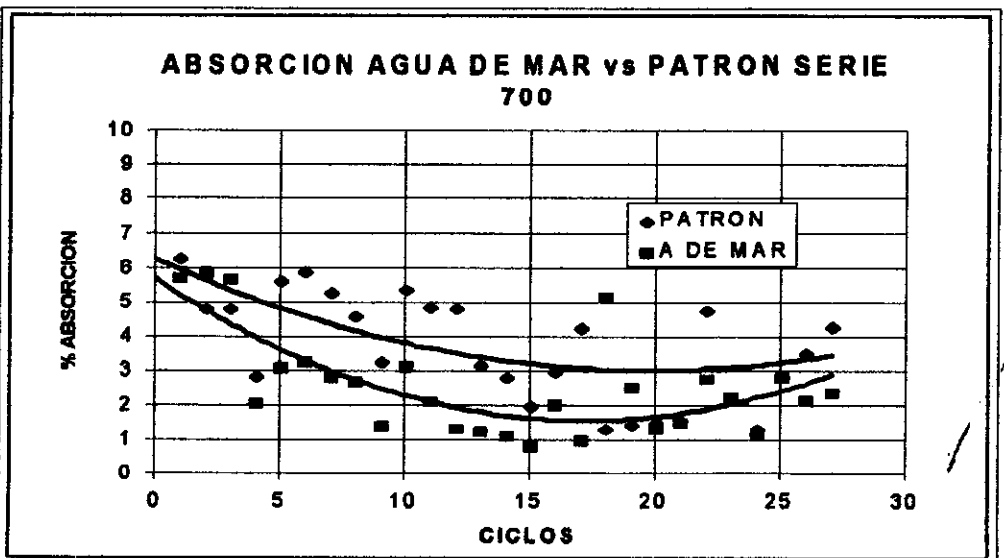
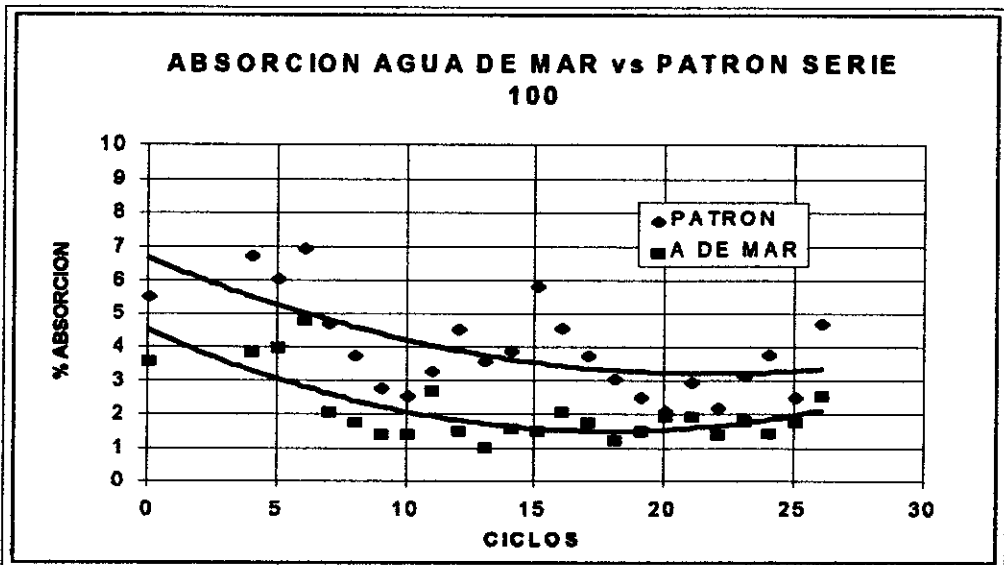
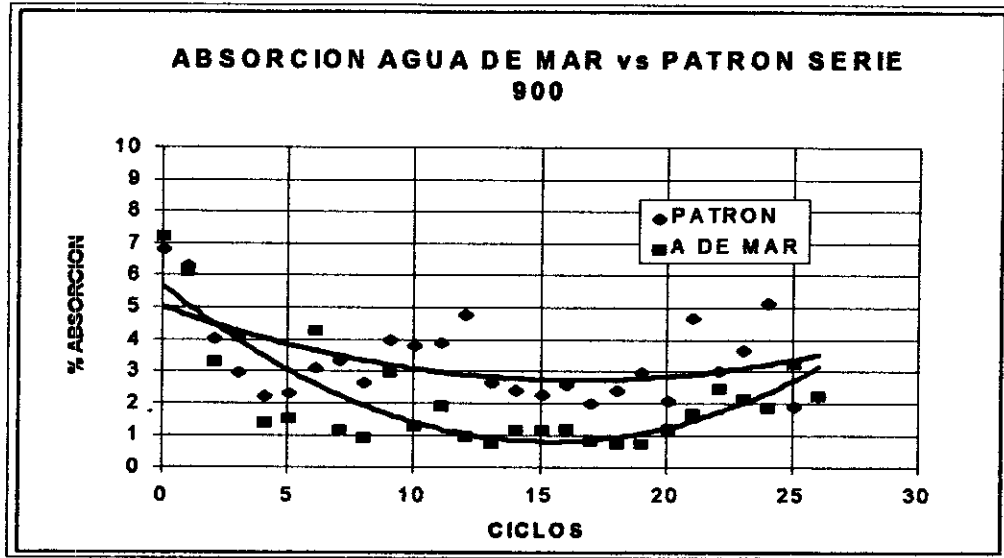




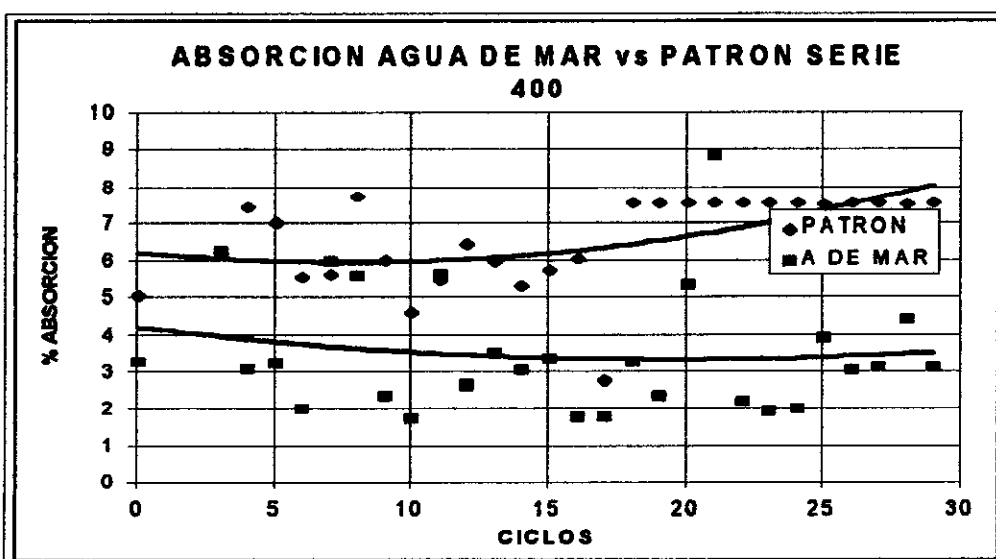
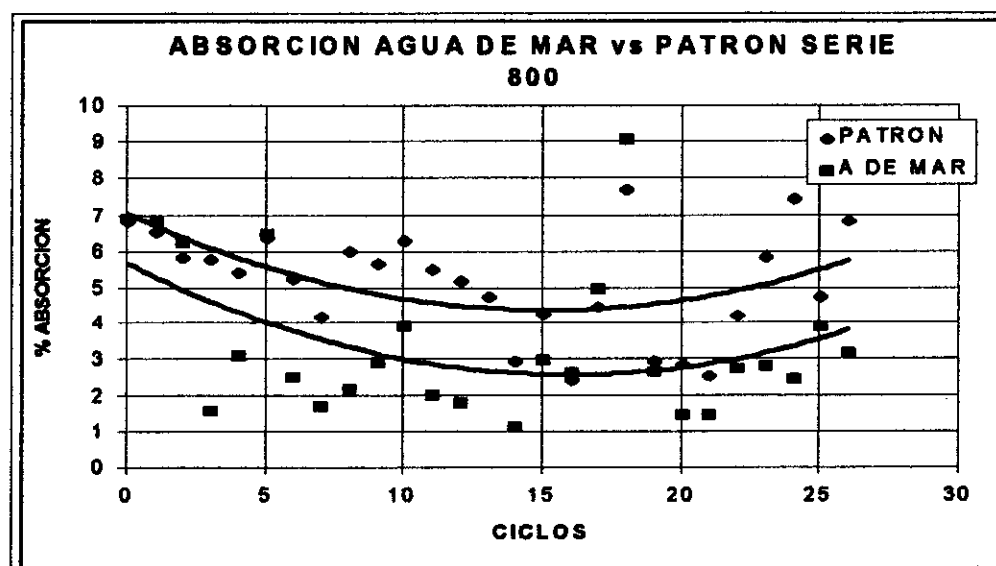
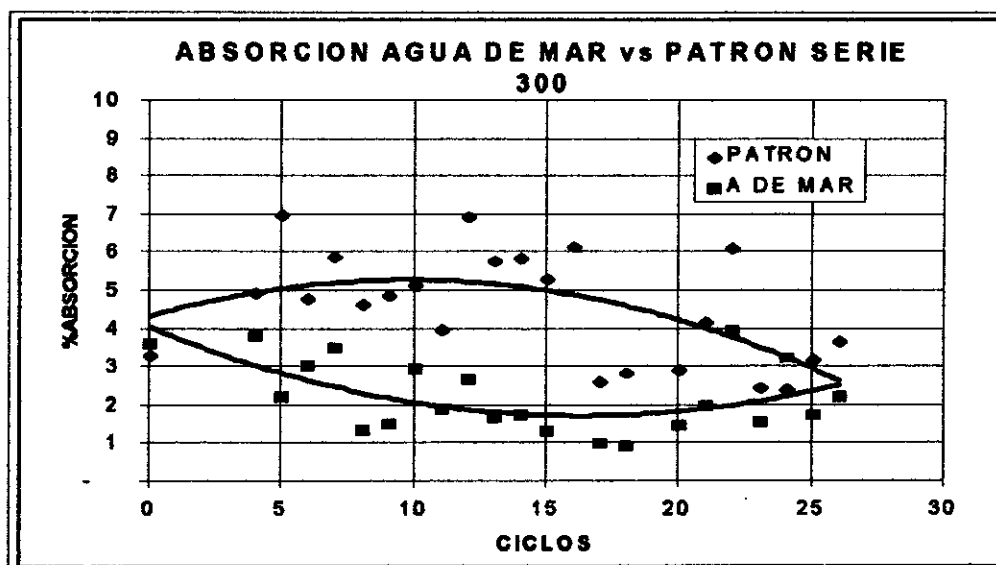
### **Anexo C. Absorción**

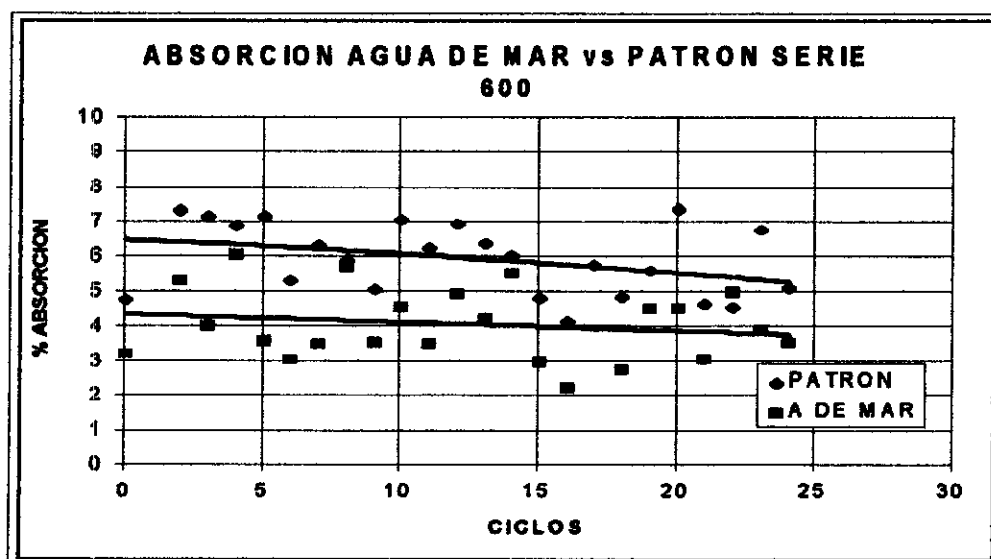
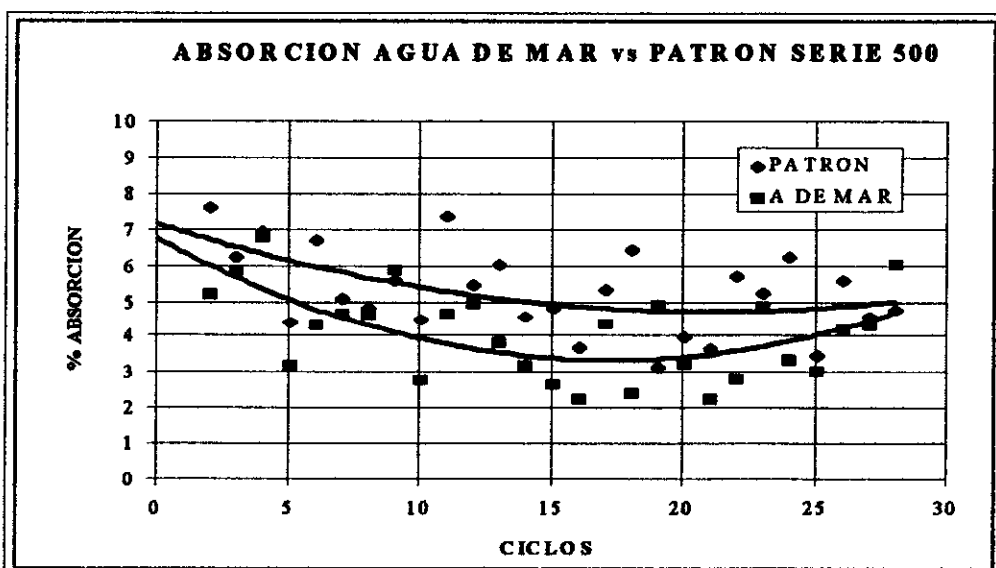
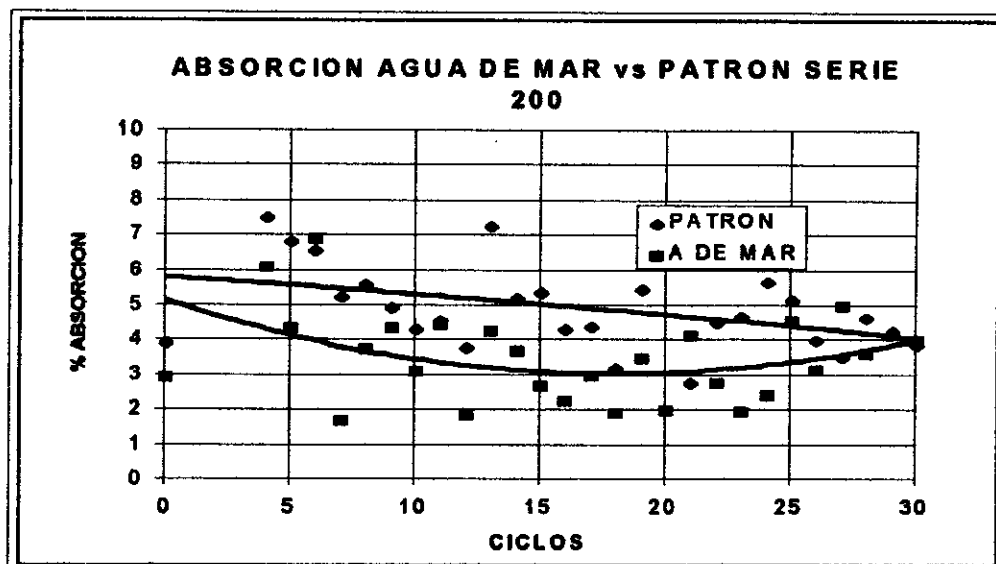
210

194



RECEIVED BY C...  
[Illegible text]





### **Anexo D. Granulometría de los agregados empleados**

# GRANULOMETRIA DE LOS AGREGADOS EMPLEADOS

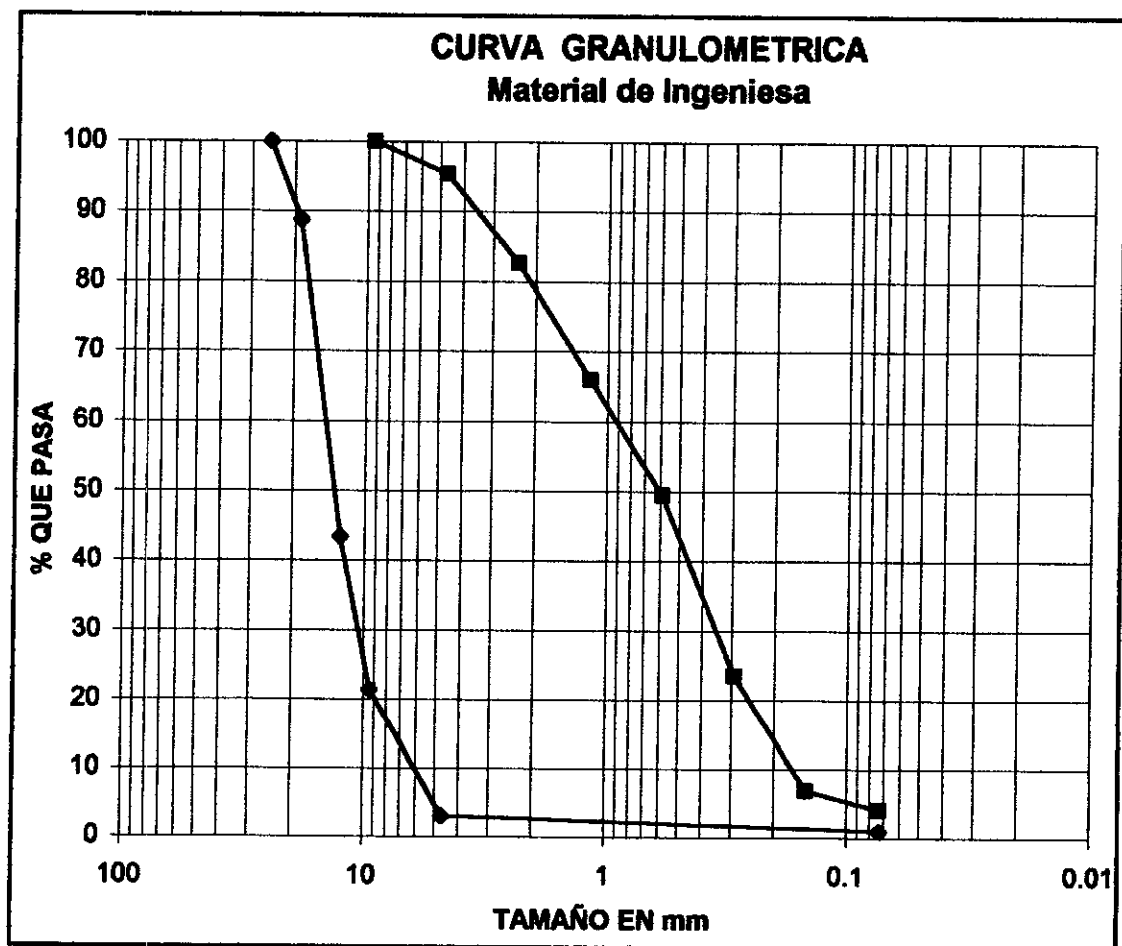
## Arena de Ingeniesa

Peso 1 ( g ) = 1711		Módulo de Finura: 2.7				
Peso 2 ( g ) = 1645						
TAMIZ No.	ABERTURA DEL TAMIZ		PESO MAT.	%	% ACUM.	% QUE
	pulg	mm	RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO	PASA
*	3/8	9.51	0	0.00	0.00	100.00
4	0.187	4.76	77.9	4.55	4.55	95.45
8	0.0937	2.38	220.2	12.87	17.42	82.58
16	0.0469	1.19	284.9	16.65	34.07	65.93
30	0.0234	0.595	281.5	16.45	50.53	49.47
50	0.0117	0.297	443.3	25.91	76.43	23.57
100	0.0059	0.149	288.7	16.87	93.31	6.69
200	0.0029	0.074	45.5	2.66	95.97	4.03
SUMA DE PESOS			1642.00			
PESO DEL FONDO			69.70			
PESO TOTAL			1711.70			

## China de Ingeniesa

Peso 1 ( g ) = 2122		Tamaño Máximo Nominal: 3/4"				
Peso 2 ( g ) = 2103.2						
TAMIZ No.	ABERTURA DEL TAMIZ		PESO MAT.	%	% ACUM.	% QUE
	pulg	mm	RETENIDO	RETENIDO	RETENIDO	PASA
*	1	25.4	0	0.00	0.00	100.00
*	3/4	19.0	237.8	11.21	11.21	88.79
*	1/2	12.7	962.6	45.36	56.57	43.43
*	3/8	9.51	466.5	21.98	78.55	21.45
4	0.187	4.76	391.5	18.45	97.00	3.00
200	0.0029	0.074	43.1	2.03	99.03	0.97
SUMA DE PESOS			2101.50			
PESO DEL FONDO			20.50			
PESO TOTAL			2122.00			





**Anexo E: Diseño de mezclas**

## DISEÑO DE MEZCLAS

Datos obtenidos de ensayos de densidad y absorción:

Arena ingeniera: densidad específica aparente= 2546(KGS/ M<sup>3</sup>)  
absorción=1.48%

Grava ingeniera : densidad específica aparente= 2555(KGS/ M<sup>3</sup>)  
absorción=1.56%

Habiendo escogido la la proporción de los agregados (50%-50%) por el método de Fuller procedemos de la siguiente manera:

- 1-.Selección del asentamiento: 4"
- 2-.Selección del tamaño máximo del agregado: 1"
- 3-.Estimación del contenido de aire: 2%
- 4-.Estimación del agua de mezclado: 190Kgs
- 5-.Selección de la relación agua-cemento:0.42
- 6-.Cálculo del contenido de cemento:  $C=A/(A/C)=190/0.42=450\text{Kgs.}$
- 7-.Estimación de las proporciones de agregados:

$$V_r = 1 - (V_a + V_c + A)$$

$V_r$ =Volumen absoluto de los  
agregados(kgs/m<sup>3</sup>)

$V_a$ =Volumen absoluto del agua  
(kgs/m<sup>3</sup>)

$V_c$ =Volumen absoluto del  
cemento(kgs/m<sup>3</sup>)

$A$ =Volumen absoluto del contenido  
de aire(kgs/m<sup>3</sup>)

$$V_r = 1 - (0.19 + 0.145 + 0.02) = 0.645\text{m}^3$$

$$G_a = G_{ag} * G_{af} / (G_{ag} * n + G_{af} * m)$$

$G_a$ =Peso específico aparente de los  
agregados

$G_{ag}$ =Peso específico aparente del  
agregado grueso

$G_{af}$ =Peso específico aparente del  
agregado fino

$n, m$ =Porcentajes en que se van a  
encontrar el agregado fino y

grueso respectivamente (50-50%)

$$G_a = 2546 \cdot 2555 / (2546 \cdot 0.5 + 2555 \cdot 0.5) = 2550.5 \text{ kgs/m}^3$$

$$P_r = G_a \cdot V_r$$

$P_r$  = Peso seco de los agregados.

$$P_r = 2550.5 \cdot 0.645 = 1645. \text{ kgs}$$

$$P_{ag} = P_r \cdot m = 1645 \cdot 0.5 = 823. \text{ Kgs}$$

$P_{ag}$  = Peso seco del agregado grueso

$$P_{af} = P_r \cdot n = 1645 \cdot 0.05 = 823. \text{ kgs}$$

$P_{af}$  = Peso seco del agregado fino

Procediendo analogamente obtenemos

A/C	AGUA (LTS/M <sup>3</sup> )	CEMENTO (KGS/ M <sup>3</sup> )	AIRE ( %/ M <sup>3</sup> )	AGREGADO FINO (KGS/ M <sup>3</sup> )	AGREGADO GRUESO (KGS/ M <sup>3</sup> )
0.42	190	450	2	823	823
0.42	190	450	3.5	804	804
0.42	190	450	6	772	772
0.63	190	300	2	883	883
0.63	190	300	3.5	864	864
0.63	190	300	6	832	832

**Anexo F: Aditivo Plastiment VZ**

Extraído de la ficha tècnica del aditivo

## PLASTIMENT VZ

**DESCRIPCION:** Plastiment VZ es un aditivo liquido , color café oscuro, retardador del tiempo de fraguado del concreto y reductor de agua. No contiene cloruros.

**USOS:** Plastiment VZ tiene tres usos :

**-.Como plastificante:** Adicionado a una mezcla con consistencia normal se consigue incrementar su asentamiento sin tener que adicionar más agua.

Plastiment VZ extiende notablemente el tiempo de manejabilidad de la mezcla facilitando el transporte, colocación y vibrado del concreto.

**-.Como reductor de agua:** Adicionándolo en la última porción del agua de amasado permite reducir un 10% del agua para conseguir cierta manejabilidad, obteniéndose un incremento notable de la resistencia a compresión a todas las edades. La impermeabilidad y durabilidad del concreto se ven incrementadas.

**-.Como economizador de cemento:** Se puede aprovechar el incremento de resistencia, logrado al reducir agua con el aditivo, para disminuir el contenido cemento y hacer más económico el diseño.

Plastiment VZ se recomienda especialmente para la elaboración, transporte y bombeo de concreto en climas cálidos, igualmente para evitar juntas frías cuando se colocan grandes volúmenes de concreto.

**VENTAJAS :** -Extiende el tiempo de manejabilidad de la mezcla.

-Especial par la elaboración y transporte de concreto en clima cálido .

-Retarda el tiempo de fraguado de acuerdo a la dosis.

-Evita la formación de juntas frías.

-Permite revibrar la mezcla y densificar el concreto.

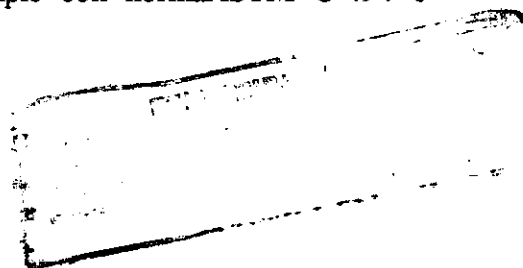
-Aumenta la resistencia del concreto a todas las edades.

**MODO DE EMPLEO:** Adicionarlo en la última porción del agua de amasado durante la preparación de la mezcla.

**Dosificación :** Del 0.2 al 0.5% del peso del cemento.

**DATOS TECNICOS:** Plastiment VZ cumple con norma ASTM C-494 e ICONTEC 1299 como aditivo D.

**Densidad:** 1.16kg/lt aprox.



**PRECAUCIONES:** La dosis optima se debe obtener mediante ensayos con los materiales y en las condiciones de la obra.

Dosificaciones superiores a las recomendadas pueden ocasionar retardos prolongados del fraguado del concreto que no afectan la resistencia final.

### **Anexo G: Aditivo sika Aer-D**

.

Extraido de la ficha tècnica del aditivo



## **S I K A     A E R   - D**

**Descripción:** Sika aer D es un aditivo líquido, color blanco, que incorpora una cantidad controlada de aire de acuerdo con la dosis utilizada. No contiene cloruros .

**Usos:** Sika aer D se emplea en los diferentes tipos de concreto prefabricados o no, de carreteras, vías, puentes, diques, muros de presa, placas, etc., cuando se requiera:

- Disminuir notablemente su permeabilidad y por ende su durabilidad.
- Aumentar su durabilidad y resistente al medio agresivo.
- Excelente auxiliar en el bombeo de concreto.
- Disminuye la fricción en las tuberías al bombear concreto.
- Mejora notablemente la apariencia y consistencia de las mezclas ásperas elaboradas con agregados de trituración o deficiencia de finos.
- No afecta el tiempo de fraguado.

**Modo de empleo:** Adicionarlo a la mezcla disuelto en la última porción del agua de amasado, preferiblemente antes de incorporar el cemento y los áridos.

**Dosificación:** Sika aer d se dosifica del 0.1 al 0.5% del peso de cemento de la mezcla.

**Datos técnicos:** Sika aer d cumple la norma ASTM C-260 como aditivo incorporador de aire. Densidad: 1.0kg/lit aprox.

**Precauciones:** El uso de aditivos incorporadores de aire en el concreto exige un perfecto control sobre:

- La granulometría de la mezcla , especialmente la zona de los agregados finos(finos).
- La dosis de aditivo y el contenido de aire obtenido el cual no debe sobrepasar de 6%.
- El tiempo de mezcla se debe incrementar un 25% aprox. para favorecer la formación de las burbujas de aire.
- Concretos con endurecedores superficiales de piso requieren controlar y regular la cuantía de aire incorporado.
- El contenido de aire obtenido con cierta dosis del aditivo dependerá de: La temperatura del sitio, la cuantía y finura del cemento y el asentamiento del concreto.
- La dosis óptima se debe determinar mediante ensayos con los materiales y en las condiciones de la obra.

- Los resultados óptimos se obtienen, cuando los componentes que intervienen en la preparación del concreto cumple con las normas vigentes.
- Dosificar por separado cuando se usen otros aditivos en la misma mezcla .
- El curado del concreto con agua y/o antisol antes y después de su fraguado es indispensable.