

COMPORTAMIENTO DE LOS CEMENTOS PORTLAND  
NACIONALES SUMERGIDOS EN AGUA DE MAR

Ing. Oscar R. Batic \*

Tco. Qco. Jorge D. Sota

SERIE II, Nº 343

\* Responsable del Area Ligantes Hidráulicos del LEMIT; Jefe de Trabajos Prácticos de Tecnología del Hormigón, Facultad de Ingeniería U.N.L.P.

---

## INTRODUCCION

---

Durante el seminario "El Concreto en el Mar" organizado por el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC) y el American Concrete Institute (ACI) en el mes de diciembre de 1975, y realizado en la ciudad de México, los más sobresalientes expertos en construcciones marinas de hormigón en el mundo, tanto flotantes como fijas, presentaron una revisión del espectacular desarrollo que ha tenido en todo el mundo la utilización del hormigón en los mares.

Las estructuras de hormigón han concitado la atención e imaginación de los ingenieros. Hasta hace unos pocos años se rechazaba la idea de realizar construcciones de hormigón en el mar y normalmente los proyectistas encontraban resistencia a materializar obras en este medio. Ahora la idea parece ser la más aceptada, en base a criterios técnicos y económicos.

En esta época donde las posibilidades de creatividad se han incrementado por los avances tecnológicos, se da la oportunidad de utilizar el hormigón de cemento portland en forma amplia en grandes estructuras marinas.

Estas estructuras, instaladas de por vida, quedan expuestas a las más severas condiciones ambientales posibles: el mar, con sus aguas salinas agresivas y el rociado con amplio suministro de oxígeno, tanto en la superficie como debajo de ella, imponen una constante amenaza de corrosión, si no se aplican los pasos adecuados y no se lleva a cabo ningún control. Están frecuentemente expuestas a grandes cambios en su temperatura interna, lo que puede producir deformaciones, tanto repentinas como a largo plazo, de magnitud igual o superior a las causadas por la carga.

Se intenta exponer en este trabajo la experiencia acumulada sobre la corrosión que provoca el agua de mar en las estructuras de hormigón de cemento portland.

La agresión del agua de mar se debe a la combinación de varios factores. En primer lugar, son perjudiciales las sales magnésicas y los sulfatos, y su acción se ejerce a plazos no

muy largos.

Si se realiza el análisis químico del agua de mar que baña las costas de la provincia de Buenos Aires, se observa que el contenido total de sales es de aproximadamente 35 gramos por litro o sea 5,5 por ciento.

Los iones perjudiciales presentes en el agua de mar son los siguientes:

$\text{SO}_4^{=}$ .....	2 810 partes por millón
$\text{Mg}^{++}$ .....	1 410 partes por millón
$\text{Ca}^{++}$ .....	480 partes por millón
$\text{Cl}^{-}$ .....	20 000 partes por millón
$\text{Na}^{+}$ .....	11 100 partes por millón
$\text{K}^{+}$ .....	400 partes por millón

Puede observarse que las sales del agua de mar están constituidas aproximadamente por 88 % de cloruros y 8 % de sulfatos.

En algunas zonas de nuestras costas, se produce el encuentro de corrientes de agua dulce con agua de mar, resultando una mezcla conocida comúnmente como agua salobre. Esta combinación tiene la característica de ser muy agresiva para el hormigón y el acero, debido al alto contenido de dióxido de carbono y al bajo pH. Por el contrario, el agua de mar contiene menor cantidad de dióxido de carbono y su pH normal es de 8,2. También pueden observarse a lo largo de la costa y a distintas profundidades, notables diferencias en las cantidades de sustancias disueltas en el agua. Por ello para cada caso es necesario realizar un estudio particular del proyecto.

Como ya se ha dicho en un trabajo anterior, las soluciones de sales que integran el agua de mar son menos agresivas de lo que podría esperarse por su contenido de iones perjudiciales. La corrosión sulfática provocada por el agua de mar es mucho más lenta que la producida por las aguas dulces sulfatadas. Por otra parte, en presencia de cloruro de sodio, tanto el hidróxido de calcio como el hidróxido de magnesio, se disuelven con mayor facilidad (con una veloci-

dad casi cuádruple) lo que justificaría la hipótesis de una corrosión más violenta producida por el agua de mar. Por el contrario, la película protectora del hidróxido de magnesio que se forma, ejerce una acción retardadora y hace disminuir el grado de agresividad.

La resistencia de un determinado hormigón al poder agresivo del agua de mar es difícil de pronosticar, debido a la naturaleza compleja del ataque que tiene lugar.

La posibilidad de formación de sulfoaluminato de calcio en el hormigón es gobernada tanto por la concentración de sulfatos y cloruros como por la composición mineralógica del cemento portland. Hasta el presente sólo se han estudiado algunos aspectos aislados de la corrosión, que no tienen una relación íntima con las condiciones reales de trabajo de las construcciones. Las causas reales de la acción del ambiente sobre el hormigón de las obras marinas, no se han tenido con frecuencia en consideración.

La elevada concentración de sulfatos, cerca del 8 por ciento del total de las sales (aproximadamente 2,8 gramos por litro en relación a 35 gramos de sales contenidas en un litro de agua de mar), sería suficiente para crear las condiciones para que se produzca una corrosión intensa. Las sales de magnesio, que representan 1,3 por ciento de ión magnesio, favorecen el ataque.

Si el cemento contiene un porcentaje alto de aluminato tricálcico y el grado de saturación es elevado, los cloruros existentes en el agua de mar no pueden evitar la formación de sulfoaluminato de calcio, atacándose en consecuencia el hormigón. Si por el contrario el cemento empleado tiene un contenido bajo de aluminato tricálcico, la corrosión sulfoaluminosa puede quedar totalmente inhibida por la acción de los cloruros. El papel representado por el yeso, que se incorpora como regulador del tiempo de fraguado del cemento, es insignificante; en presencia del cloruro de calcio la solubilidad del yeso aumenta de tal manera que no es probable una cristalización del mismo.

Varios investigadores afirman que en presencia de cloruro de sodio se forman cantidades muy reducidas de cristales de sulfoaluminato de calcio hidratado. Jung, por ejemplo, estima que el sulfoaluminato no puede llegar a formarse en pre-

sencia de las sales de magnesio, disueltas en gran cantidad en el agua de mar, pues el sulfato de magnesio disuelve el aluminato tricálcico.

El hidróxido de magnesio se presenta en estado amorfo y se deposita en los poros del hormigón. También se destruyen rápidamente los cristales del sulfoaluminato de calcio hidratado, en una solución de sales de magnesio. Esta circunstancia también impide el desarrollo del proceso de corrosión.

La corrosión magnésica producida por el agua de mar es poco importante, pues la cantidad de iones de magnesio es suficientemente pequeña para ser precipitada en forma de  $Mg(OH)_2$ . La resistencia del hormigón a la corrosión producida por el agua de mar se controla realmente por la posibilidad de formación de sulfoaluminato de calcio hidratado. El papel de la densidad es importante a este respecto.

El proceso de la destrucción del hormigón por el ataque del agua de mar, obedece a una gran cantidad de reacciones diferentes y más o menos simultáneas. Recordemos que el agua de mar contiene cloruros y sulfatos combinados tanto con los álcalis como con el magnesio y además dióxido de carbono disuelto proveniente de la atmósfera.

Debe tenerse también presente el hecho de que las aguas de mar se encuentren sometidas a permanente movimiento; su ataque al hormigón se refuerza por la acción del oleaje, que intenta arrancar de su sitio los trozos reblandecidos de hormigón, exponiendo a la agresión las nuevas partes que quedan al descubierto.

La temperatura es otro factor de importancia. Se puede afirmar que la resistencia a la congelación es el factor decisivo de la durabilidad de las construcciones marinas de hormigón que se encuentran en las zonas frías, mientras que la resistencia a la agresión es el factor decisivo en las zonas tropicales, ya que el incremento de temperaturas dentro de ciertos límites favorece el proceso de corrosión.

---

## PARTE EXPERIMENTAL

---

Con el propósito de estudiar el comportamiento de los cementos portland argentinos, se programaron ensayos basados en la experiencia acumulada en trabajos previos, referentes a la durabilidad de hormigones y morteros a la acción de aguas y suelos con sulfatos.

Con este objeto se confeccionaron probetas de mortero con el cemento en estudio, las que fueron sumergidas en agua de mar. Para ello, un grupo de probetas fue colocado en la balsa experimental de pinturas fondeada en el Puerto de Mar del Plata y otro grupo fue sumergido en agua potable en el laboratorio. Estas últimas sirvieron como patrón de referencia.

Como característica de valoración del comportamiento se midió la estabilidad dimensional con un comparador de una aproximación de 0,0025 mm, lo que se complementó con la observación visual del aspecto exterior de las probetas.

Estos ensayos son normalmente de larga duración. De acuerdo con la bibliografía consultada se obtienen resultados concluyentes recién luego de varios años. En las tablas V y VI se dan los resultados de expansiones hasta los 54 meses. Sin embargo, este informe tiene su validez, pues permite ir adelantando conclusiones sobre el verdadero comportamiento de los ligantes a esta agresión de complicado mecanismo, y que no puede ser reproducida en condiciones de laboratorio.

### Cementos portland empleados en el estudio

Se emplearon cementos con y sin adiciones, y de diferentes procedencias. De acuerdo con la experiencia acumulada en estudios previos sobre la acción de los sulfatos, se tenía una idea del comportamiento frente a diversos ensayos de laboratorio, y corroborados en alguna medida mediante los resultados de estudios realizados en la Planta Potabilizadora de la Dirección de Obras Sanitarias, en Punta Lara, y en otras obras en las que se aconsejó sobre la conveniencia de uso de determinado tipo de cemento.

En esta investigación se usaron muestras de las siguientes marcas y procedencias:

Avellaneda  
Avellaneda Extra  
Comodoro  
Comodoro, Clase G  
Corcemar, Pipinas  
Corcemar, Yocsina  
Corcemar, Puzolánico, Yocsina  
Hércules, Puzolánico, Mendoza  
Loma Negra, Puzolánico, Olavarría  
Loma Negra, ARS, Olavarría  
Loma Negra, Zapala  
Loma Negra, ARS, Zapala  
Loma Negra, Clase G  
San Martín, Sierras Bayas

Puede observarse la variedad de cementos incluidos en el estudio, habiéndose empleado cementos portland normales, cementos portland puzolánicos y cementos portland declarados por el fabricante como resistentes a los sulfatos (ARS).

Todas las muestras llegaron al LEMIT en bolsas cerradas y perfectamente identificadas.

#### Técnica de confección de las probetas

Para el estudio del comportamiento de los ligantes sumergidos en el mar, se siguió la técnica de confección de las probetas aconsejada por P. Wolocho (14), consistente en elaborar prismas de 4 x 4 x 16 cm, con una mezcla de cemento y arena en proporción 1:4 (en peso). La arena graduada tiene aproximadamente la siguiente granulometría: 70 por ciento de las partículas están comprendidas entre los tamices números 35 y 50 y 30 por ciento entre los números 50 y 100.

Para el mezclado del mortero se siguió la técnica descrita en la norma IRAM 1622. La cantidad de agua fue la necesaria para lograr una consistencia en el mortero de  $110 \pm 5$  por ciento, medida en la mesa de asentamiento con 25 golpes en 15 segundos. La compactación se realizó mediante un apisonado manual en dos capas. Es de notar, que el mortero tiene escaso contenido de ligante y además una razón agua/cemento



alta, generalmente comprendida entre 0,75 y 0,80. Además la arena empleada no tiene una buena granulometría, lo que trae como consecuencia, que la probeta tenga menor compacidad y mayor porosidad y por lo tanto el ataque al ligante se produce en un plazo menor.

El curado de las probetas se realizó colocando el molde 24 horas en ambiente de cámara húmeda ( $21 \pm 2^{\circ}\text{C}$  y más de 95 por ciento de humedad relativa; al cabo de este período se procedió a desmoldar y las probetas se sumergieron luego en agua potable durante 28 días. A esta edad, se las midió, considerándose esta lectura como inicial o de referencia.

Un grupo de seis probetas fue colocado en agua potable en ambiente de  $21 \pm 1^{\circ}\text{C}$ , y otro grupo de seis probetas gemelas, se colocaron en bastidores adecuados y se sumergieron en agua de mar. Como ya se indicó anteriormente, los dos grupos de probetas se midieron y sumergieron el mismo día; las lecturas posteriores de control se realizaron también en las mismas fechas.

---

## RESULTADOS OBTENIDOS

---

Utilizando el análisis químico de los cementos portland en estudio, expresado en óxidos, se calculó en primer término la composición potencial según Norma ASTM C-150, a fin de identificar el comportamiento de los mismos desde el punto de vista de su composición.

Puede observarse (tabla I) que se han empleado cementos de distinta composición potencial. Esto se diagramó así, pues se deseaba establecer diferencias de comportamiento y utilizar alguno de ellos como patrón de ensayo. Por este motivo, en estas series, la gran mayoría contienen un porcentaje elevado de aluminato tricálcico  $\text{AC}_3$ . Además se ha incorporado a esta tabla I una columna con el valor de contenido de escorias, determinado mediante el método establecido en la norma IRAM 1 616 que es el mismo que ha sido puesto a punto por el CERILH.

La bibliografía consultada pone de manifiesto que se ha buscado pronosticar el comportamiento de los hormigones, morteros y cementos sumergidos en agua de mar, mediante fórmulas por medio de las cuales se logran valores numéricos, denominados módulos. Todas ellas tratan de caracterizar los cementos portland desde el punto de vista de la estabilidad frente a la corrosión.

Estos módulos sólo tienen sentido en relación con la composición mineralógica del clinker. Si se adicionan al cemento sustancias tales como escorias de alto horno o algún aditivo ácido, es decir, cuando se trata de un cemento heterogéneo, no es posible deducir ningún módulo de la determinación global de los óxidos.

El más elemental es el propuesto por Van Der Burgh, y que está representado por la siguiente fórmula, a la que habitualmente se la conoce como factor de agresividad:

$$A = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO}}$$

De los valores numéricos consignados en las tablas II y III para diferentes cementos, se infiere que la utilización de este factor no ofrece gran confianza. Las diferencias observadas son muy pequeñas comparando cementos de alta resistencia a los sulfatos (ARS), estables frente a la corrosión por acción del agua de mar, con otros tipos. Aquella propiedad no queda reflejada por el valor numérico del módulo.

En el año 1956 Meier y Grolman introdujeron el siguiente factor de agresividad:

$$A = \frac{\text{SC}_3 + \text{SC}_2 + \text{FAC}_4}{\text{CaO libre} + 1,27 \text{ AC}_3 + 0,7 \text{ álcalis} + \text{SO}_4\text{Ca}}$$

Los valores más altos indican una mayor resistencia a la agresividad.

Una objeción lógica a este valor numérico es la limita-

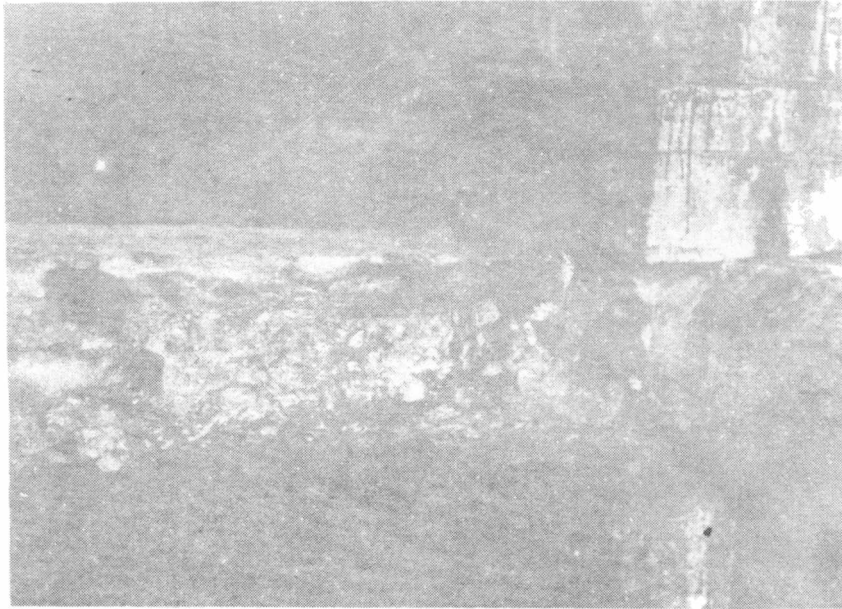


Fig. 1.- Corrosión de una estructura de hormigón armado, emplazada en Mar del Plata y expuesta a la acción del agua de mar en la zona de fluctuación de las mareas

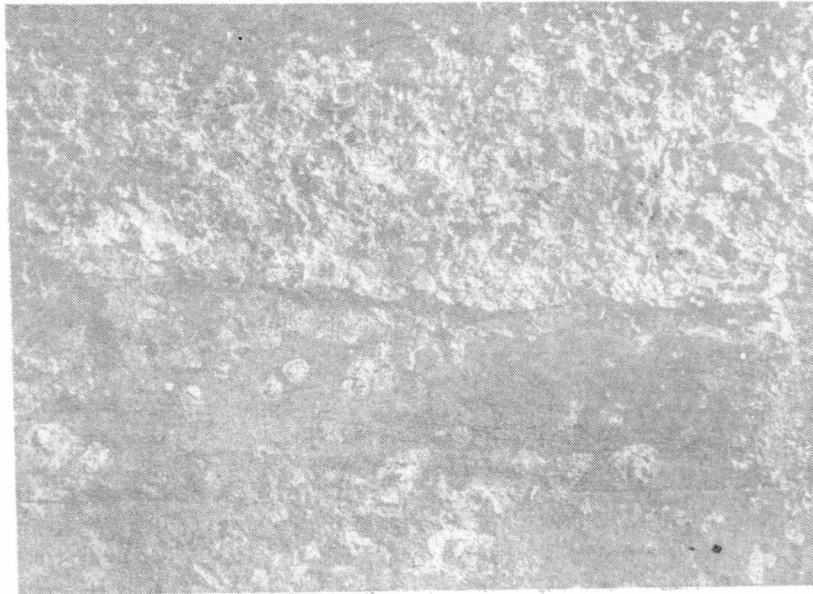


Fig. 2.- Ataque producido por el agua de mar en un espigón expuesto en condiciones similares a las del caso anterior

ción producida por los errores inherentes al cálculo de la composición del cemento, mediante las fórmulas de Bogue.

Una crítica a este módulo es que en el numerador, en el que figuran los componentes resistentes a la corrosión, aparece el silicato tricálcico  $SC_3$ . Sin embargo sabemos que en la hidratación de este compuesto se forma gran cantidad de hidróxido de calcio (portlandita), lo que en general, no se puede considerar como ventajoso desde el punto de vista de la corrosión.

Al valorar los diferentes módulos, no debe olvidarse que en muchos casos la capacidad de resistencia a la agresión no sólo depende de la composición química del cemento, determinada mediante el contenido de óxidos o de la composición mineralógica, sino también de la coincidencia de diferentes efectos agresivos externos.

Otro módulo utilizado y que aparentemente ha dado mejores resultados, es el de la Circular 54 del Ministerio Francés de Obras Públicas. Se expresa:

$$A = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{MgO + CaO} - \frac{2Al_2O_3}{100}$$

De acuerdo con la misma, los cementos que son resistentes al agua de mar tienen que poseer un módulo superior a 0,51. Sin esta condición no son admitidos para estudios de verificación por inmersión en agua de mar (en la balsa experimental).

En la tabla IV se ha consignado los resultados del método propuesto por Le Chatelier - Anstett - Blondiau, y es el que se adoptó en la norma IRAM 1659. Se considera sumamente riguroso para el control de la sensibilidad de los cementos portland a la acción de los sulfatos. La determinación demanda un largo período de ensayo, aproximadamente 150 días, pero sus resultados son inobjectables.

Se estima que tal vez este ensayo no sea el más idóneo para predecir la posible agresión del agua de mar; no obstante ello, resulta interesante comparar estos resultados obtenidos con los dados por las barras sumergidas en agua de mar.

En otra columna se han consignado los resultados de los ensayos realizados de acuerdo a la norma ASTM C-452. Este ensayo, al igual que en el caso anterior, es específico para el ataque de sulfatos, pero exclusivamente para cementos portland sin adiciones, es decir puros.

Por último, en esta tabla se ha incluido una columna con los resultados de otro ensayo destinado a establecer el comportamiento de los cementos portland frente a la acción de los sulfatos, y que consiste en valorar las formaciones coposas que generan los cementos en ciertas condiciones. El ensayo es bastante rápido, pues se realiza en 7 días, pero sus resultados son poco coherentes con el resto de los estudios.

En la tabla V se transcriben los resultados obtenidos en las determinaciones de la variación de longitud de las probetas sumergidas en agua potable. Estas fueron usadas como patrón de comparación, pues son gemelas de las sumergidas en agua de mar.

Se observa que la mayor parte de los resultados son de contracción (valores negativos), como estaba previsto en base a los antecedentes bibliográficos.

Los resultados obtenidos sobre las probetas sumergidas en agua de mar se hallan consignados en la tabla VI. A primera vista se puede ver que la mayoría de los valores son de expansión (positivos) pero estas expansiones no alcanzan valores elevados, salvo en dos casos observados en probetas que acusan un grado muy avanzado de alteración. Por tal motivo la lectura puede estar viciada y no ser la real, debido a que los pernos de referencia estaban en algunas probetas algo flojos.

En las probetas confeccionadas con uno de los cementos, el ataque fue intenso a los dos años. En otros recién comienza a insinuarse, mediante el redondeo de bordes y aristas, a las edades de tres años o más. Todo esto ocurre en las probetas de la primera serie.

Desde el punto de vista de la valoración del avance de la corrosión, observamos que la variación de longitud no es en todos los casos el método más adecuado. Por ejemplo en el cemento de número de orden 11, (tabla VI) se produjo un in-

tenso ataque, puesto de manifiesto por la rotura de los bordes y alteración de la superficie, pero la medida de la probeta todavía acusa contracción.

Es por este motivo que se realizó un nuevo estudio de las formas que están a nuestro alcance, para valorar el grado de alteración que sufren las probetas.

---

#### TECNICAS DE VALORACION DEL ENSAYO DE BARRAS

---

Como se ha expresado anteriormente, la técnica de valoración que se ha empleado para estimar el comportamiento de las barras de mortero fue la de observar visualmente los desperfectos superficiales de las probetas y además complementarla con la medición de las variaciones de longitud.

El examen ocular de las probetas puede permitir obtener un juicio del grado de corrosión y de su naturaleza (lixiviación, degradación superficial, melladuras de esquinas y cantos, expansiones, desmoronamientos, etc.).

Naturalmente, este método es absolutamente subjetivo. Sin embargo los ensayos a largo plazo realizados en Estados Unidos de América demuestran una notable coincidencia entre el valor obtenido, como medida de calificación de varios observadores independientes, y el deducido por estudio de las resistencias mecánicas y el módulo de elasticidad.

Con respecto a la valoración de la alteración de una probeta en base a la variación de longitud, en muchos casos, permite estudiar un proceso de corrosión en forma rápida y segura.

Para ciertas reacciones es mucho más cómodo y sensible que la valoración se realice a través de la variación de la resistencia mecánica. Esta ha sido la causa de la amplia difusión que este método ha alcanzado. Varios autores la recomiendan como medida de la resistencia a los agentes agresivos, ya que el aumento de volumen es una de las principales

consecuencias de la corrosión.

Sin embargo, los nuevos ensayos de control y comparación demuestran que los resultados no son susceptibles de una única interpretación, y que de la variación lineal observada en las dimensiones, no siempre se puede deducir la resistencia a los agentes agresivos de los cementos u hormigones. Tampoco la medición de la variación de volumen nos da una idea clara de la acción de los distintos medios agresivos. Pero los valores obtenidos pueden servir como puntos de partida generales para la determinación del probable comportamiento del cemento.

Algo de esto nos ha ocurrido en nuestro estudio. Al cabo del tiempo transcurrido (en algunos casos casi cuatro años) se observa que, de acuerdo a la inspección visual de las probetas, se ha producido un ataque intenso, mientras que la estabilidad dimensional ha dado unas pocas unidades de expansión y en algunos casos las probetas sólo han tenido contracción.

Es por ello que se ha realizado una nueva revaloración de los métodos destinados a determinar el grado de corrosión de las probetas.

Además de los ya mencionados, pueden utilizarse en nuestro laboratorio:

- Variación del peso de las probetas
- Variación de la resistencia mecánica
- Variación del módulo de elasticidad
- Investigación de los cambios químicos de la probeta
- Examen rápido al microscopio.

Si se realiza un somero análisis de estos métodos se observa que el método enunciado en primer término (variación de peso de las probetas), no puede aplicarse eficientemente, pues las probetas se cubren de organismos incrustantes, cuyos restos, al quedar adheridos, modifican el peso y falsean los resultados; su eliminación completa podría alterar la estructura superficial de la probeta.

Con respecto al método citado en segundo término (resistencia mecánica) si bien el progreso de la corrosión corresponde a una disminución de resistencia, tiene el inconvenien-

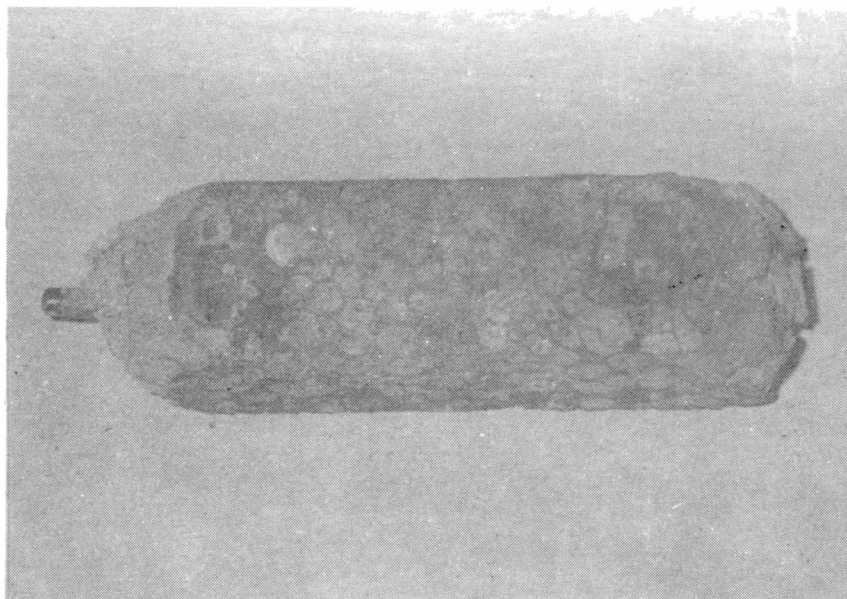
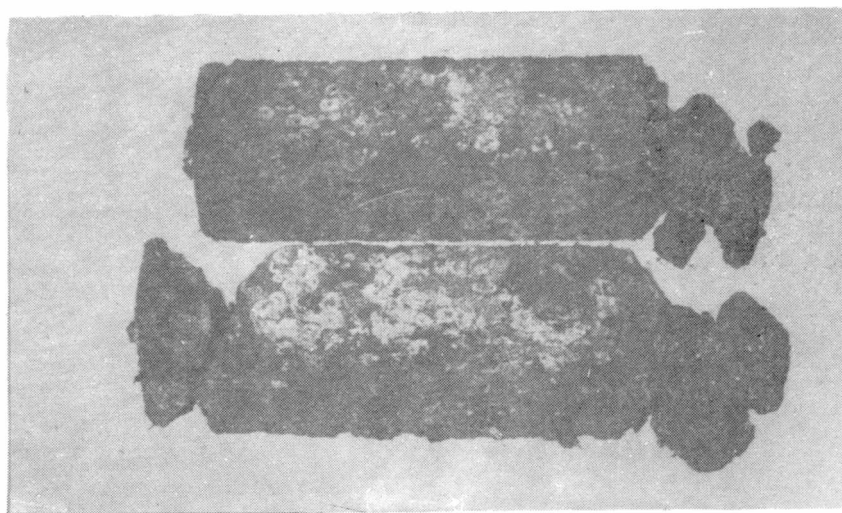


Fig. 3.- Probeta de mortero elaborada con un cemento portland poco resistente al agua de mar, luego de 28 meses de inmersión



CEMENTO 13  
EXPERIENCIA 2M

Fig. 4.- Probeta de mortero elaborada con un cemento portland puzolánico no resistente al agua de mar, luego de 30 meses de inmersión



te de ser necesario confeccionar un gran número de probetas, pudiéndose calcular como mínimo dos por edad. Esto trae aparejada la necesidad de espacio, que en la balsa está limitado. Por otra parte se debe tener presente que al avanzar el deterioro de las probetas por la agresión del medio, es difícil realizar el ensayo en forma eficiente, pues las zonas de apoyo de las probetas o el lugar de aplicación de la carga pueden no estar planos y por lo tanto los resultados de los ensayos se hacen cada vez menos exactos.

Por aplicación del método enunciado en cuarto término, es decir establecer la variación de composición química en las distintas capas de la probeta, se puede determinar la penetración de las disoluciones y su correspondiente velocidad. Como en el caso anterior el ensayo es destructivo y por ello es necesario contar con gran cantidad de testigos, a fin de tomar trozos de las probetas para realizar las determinaciones.

El método propuesto en quinto término permite apreciar los efectos de la agresión, mediante la inspección al microscopio. Ha sido usado con éxito en el estudio de pastas puras sometidas a agentes agresivos y puede ser empleado para estudiar la resistencia a los ataques usuales al mortero y al hormigón. Exige tener un operador especializado en realizar las apreciaciones.

Existen otros métodos de valoración que hemos dejado de lado, por no contar con los equipos necesarios o bien por no merecer nuestra consideración. Es el caso de medición del coeficiente de difusión (técnica de isótopos), los métodos numéricos, el empleo de la derivatografía (estudio de los cambios relativos de los minerales del clinker, debido al proceso de corrosión), etc.

Se ha dejado para considerar en último término el método de valoración, enunciado en tercer lugar, basado en la variación del módulo de elasticidad, pues se estima que es, posiblemente, el más adecuado para nuestro estudio. Por tratarse de un ensayo no destructivo, es posible vigilar y observar los progresos de la corrosión en la misma probeta, hasta que se llega a la total destrucción, no sólo mediante el examen visual exterior, sino caracterizándola mediante

una medida exacta. Los métodos sugeridos consisten en la determinación del módulo de elasticidad, estático o dinámico.

El primero de ellos se determina midiendo las variaciones de longitud, y de la flecha. El dinámico se establece con la medida de las vibraciones longitudinales sónicas.

Los autores se inclinan por el dinámico, por contar con el equipo necesario, y por ser más moderno y de mejor resultado.

Según la bibliografía y algunos intentos ya realizados en nuestro laboratorio, es el más apropiado para conocer el comportamiento de morteros y hormigones en un medio agresivo, tanto en el primer momento como durante la marcha de la corrosión.

Para realizar esta valoración se debe establecer la velocidad de propagación de una onda en el material. La velocidad del sonido en los cuerpos sólidos depende del valor del módulo de elasticidad dinámico  $E_d$  y del valor de la densidad  $n$ . Como esta última es de fácil determinación, es posible calcular el módulo de elasticidad de morteros y hormigones partiendo de la medición de la velocidad del sonido.

El módulo de elasticidad de la probeta puede expresarse por:

$$E_d = \frac{V^2 n (1 + \mu) (1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}$$

Siendo  $V$  velocidad de propagación en m/s

$n$  densidad en  $\text{kg/m}^3$

$\mu$  la razón de Poisson (aproximadamente 0,15 para hormigón rígido y aproximadamente 0,30 para hormigón débil)

El módulo dinámico suministra una imagen clara de las variaciones que tienen lugar en el hormigón atacado por fluidos o por agentes agresivos.

Es interesante destacar que la frecuencia propia, producida por el equipo de ensayo causa un nivel de tensiones muy reducido en la probeta y, por lo tanto, la influencia de la

tensión queda totalmente eliminada. En este método de ensayo existe una tendencia a que las zonas externas de la probeta ejerzan una mayor influencia sobre los resultados que el núcleo, lo cual produce desviaciones hasta un cierto grado del resultado exacto.

El LEMIT cuenta con un equipo para determinaciones mediante el empleo de ultrasonido, de marca C.S.I. Concrete Tester Type RBT2 Design T.N.G. - IBBC. Es un equipo de peso reducido, portátil, con una batería recargable (níquel-cadmio) que da la posibilidad de transportarlo fácilmente al lugar de trabajo.

Debido a los inconvenientes ya comentados y con el fin de proseguir con el estudio de los cementos portland, en mayo de 1976 se comenzó una nueva serie de ensayos. Se desea realizar la valoración del comportamiento de morteros sumergidos en agua de mar, mediante el empleo del aparato de ultrasonido y por supuesto continuando con el método de control usado en la primera parte del estudio.

---

#### CONSIDERACIONES FINALES

---

1. Para realizar este estudio se han utilizado cementos portland puros de diversa composición y también con adiciones. Se observa que los cementos portland puzolánicos, de distintas partidas, tuvieron diferente comportamiento.
2. Los cementos con menores contenidos de aluminato tricálcico  $AC_3$  y algunos puzolánicos fueron los que mejor se han comportado hasta el presente en la inmersión en agua de mar.
3. No se ha encontrado buena correlación entre los diversos factores de agresividad y el comportamiento de las barras sumergidas en agua de mar.
4. Para poder realizar estudios numéricos y hacer pronósticos sobre el comportamiento de los hormigones de cemento portland, es necesario tener absoluta seguridad

sobre el análisis químico, pues todas las fórmulas y módulos son derivados de áquel. Pequeños errores analíticos desvirtúan totalmente las correlaciones posibles.

5. LLama poderosamente la atención que existan barras que se hayan destruido sin acusar expansión, por lo que se estima que la agresión no ha llegado al núcleo de la probeta, afectando solamente las capas superficiales e intermedias.
6. Se confirma la necesidad de tener que incorporar un nuevo método de valoración de la corrosión del hormigón. El sistema de medición longitudinal clásico no refleja en forma clara y rápida la degradación del hormigón.
7. Nos proponemos, en base a los resultados obtenidos hasta el presente, utilizar como método de valoración la determinación del módulo de elasticidad dinámico Ed.
8. El período de estudio, para tener resultados completos debe ser superior a 5 años, empleando morteros.

---

#### BIBLIOGRAFIA

---

1. Anónimo. - Constataciones recientes y nuevas precauciones con respecto a la descomposición de morteros y hormigones por la acción del agua de mar. Revista Construcciones, nº 55, 1949.
2. Batic, O. R. y Wainsztein, M. - Estudio preliminar de la resistencia de los cementos portland nacionales a la acción del agua de mar. LEMIT-ANALES, 1-1974,
3. Biczok, J. - La corrosión del hormigón y su protección. Ediciones Urmo, Bilbao, 1972.
4. Bulletin Rilem - Coloquio de Palermo, 1965, nº 50, marzo 1966.

5. Bulletin Rilem. - Artículos varios, nº 32, setiembre 1966.
6. Colina, J. F. y Wainsztein, M. - Experiencias realizadas en el LEMIT sobre el comportamiento de cementos nacionales a la acción de los sulfatos. Revista de Ingeniería, XI, nº 41, abril-junio 1963.
7. Colina, J. F., Wainsztein, M. y Batic, O. R. - Durabilidad de hormigones de cemento portland. Experiencias realizadas en el LEMIT. Serie II, nº 115, 1967.
8. Gerwick, B. C. - El futuro del concreto en el mar. 4º Seminario Internacional ACI - IMCYC. El concreto en el mar, México, diciembre 1975.
9. Keil, F. - Cemento, fabricación, propiedades y aplicaciones. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona, 1973.
10. Lafuma, H. - Conglomerados hidráulicos. Dunod, París, 1952.
11. Papadakis, M. y Venuat, M. - Fabricación, características y aplicaciones de los diversos tipos de cemento. Editores Técnicos Asociados, S.A. Barcelona, 1968.
12. Ruiz, C. - Corrosión del hormigón. Su origen, mecanismo y su prevención. Revista Construcciones, nº 99, agosto 1953.
13. Taylor, H. F. W. - La química de los cementos. Ediciones Urmo, Bilbao, 1967.
14. Wolochow, P. - Determination of the sulfate resistance of portland cement. Proceedings ASTM, Vol. 52, 1952.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen al personal de la Sección Ligantes Aéreos e Hidráulicos por su colaboración, y en especial al operador Néstor Rosell por su colaboración directa en la realización de las experiencias.

**TABLA I**  
**RESULTADO DE LOS ANALISIS QUIMICOS DE LOS CEMENTOS PORTLAND EMPLEADOS EN EL ESTUDIO (%)**

Nº	Marca	Residuo insoluble	P.x. cel.	SO <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Cal libre	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
<b>Serie I:</b>												
1	A-1	0,5	1,3	1,7	0,8	22,4	3,1	5,9	63,4	0,20	0,15	0,89
2	B-1 (*)	0,4	1,4	2,1	1,2	21,9	1,8	6,4	63,6	0,32	0,89	0,34
3	F-1	0,4	4,3	1,6	1,3	20,7	2,9	5,9	61,5	0,60	0,95	0,29
4	F-5	0,4	2,9	1,3	0,9	22,5	4,0	3,0	64,6	0,00	0,50	0,20
5	J-1	0,6	1,6	1,9	0,8	22,4	2,4	4,9	64,2	0,22	0,09	0,80
6	J-1	0,4	1,4	1,8	1,0	22,3	2,9	5,0	64,2	0,38	0,12	1,04
7	L-1	0,7	2,9	1,1	0,4	20,4	3,3	6,8	63,6	0,30	0,06	0,37
8	L-5	0,6	1,7	2,3	0,5	22,2	3,1	5,7	63,1	0,36	0,10	0,52
9	L-5	1,1	2,2	2,0	0,8	20,7	3,3	7,4	61,5	0,18	0,11	0,63
10	P-1	0,3	4,0	1,6	2,2	20,3	3,4	4,4	62,4	0,00	0,39	0,67
11	H-3 (*)	23,1	2,0	1,0	0,8	17,8	2,9	5,3	45,8	0,15	0,69	0,45
12	L-3 (*)	23,0	2,8	2,6	0,5	14,8	6,7	2,8	46,2	0,40	0,03	0,32
<b>Serie II y III:</b>												
1	A-1 (*)	0,4	1,2	1,8	1,3	22,2	4,4	4,5	63,1	0,31	0,20	0,76
2	B-1	0,3	1,1	1,6	0,6	22,5	3,8	5,2	63,6	0,37	1,00	0,25
3	B-1 (*)	0,4	1,3	2,4	1,4	23,2	3,6	3,8	63,0	0,92	0,80	0,40
4	B-1 (*)	0,3	1,5	2,3	0,9	22,5	3,5	3,9	64,2	0,83	0,87	0,45
5	F-1	0,6	2,1	1,7	1,4	21,7	3,3	5,8	62,8	1,10	1,02	0,34
6	H-3 (*)	16,9	2,0	1,6	0,9	21,5	3,8	2,8	50,3	0,10	0,49	0,61
7	J-1	0,5	1,9	1,8	0,7	22,7	3,0	3,4	65,5	0,52	0,07	0,80
8	L-3 (*)	20,4	2,3	3,4	0,6	15,5	3,4	4,6	48,4	0,56	0,08	0,67
9	P-1	0,4	2,0	2,2	2,4	21,8	3,2	3,2	63,0	0,83	0,47	0,89
10	P-4	0,9	1,8	2,0	1,6	18,6	6,8	4,1	63,7	1,00	0,32	0,51
11	D-1	0,7	2,6	1,8	3,4	20,4	3,4	5,6	60,3	1,46	0,80	1,00
12	C-3 (*)	12,4	5,7	2,3	2,7	17,3	2,9	5,4	48,9	0,43	0,62	0,89
13	A-2 (*)	1,0	1,1	1,9	0,8	21,8	3,5	4,9	63,5	0,43	0,97	0,44

(\*) Cementos portland con adiciones declaradas por el fabricante o detectadas por ensayos

**TABLA II**  
**CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS DE LOS CEMENTOS PORTLAND EMPLEADOS EN EL ESTUDIO**

Nº	Marca	Composición potencial en compuestos (Norma IRAM 1504)				Contenido de SO <sub>3</sub> (%)	Circular 54 MOP Francia	Factores de agresividad	
		SC <sub>3</sub> (%)	SC <sub>2</sub> (%)	AC <sub>3</sub> (%)	FAC <sub>4</sub> (%)			Según Van der Burgh	Según Meier Grolmann
1	A-1	39	45	10,4	9	1,7	0,323	0,446	4,960
2	B-1 (*)	-	-	-	-	2,1	0,248	0,445	-
3	F-1	45	26	10,7	9	1,6	0,412	0,432	4,461
4	F-5	62	17	1,2	12	1,3	0,328	0,394	22,819
5	J-1	49	27	8,9	7	1,9	0,322	0,425	5,500
6	J-1	49	27	8,4	9	1,8	0,318	0,425	5,808
7	L-5	50	20	12,3	10	1,1	0,289	0,427	4,512
8	L-5	39	34	9,9	9	2,3	0,324	0,442	4,834
9	L-5	33	35	13,9	10	2,0	0,303	0,457	3,579
10	P-1	61	12	5,9	10	1,6	0,283	0,396	7,996
11	H-3 (*)	-	-	-	-	1,0	0,390	0,504	-
12	L-3 (*)	-	-	-	-	2,6	0,321	0,381	-

**Serie I:**

(\*) Cementos portland con adiciones declaradas por el fabricante o detectadas por ensayos  
 Nota: El cemento nº 2 tiene un contenido de escoria de alto horno de 8 %

**TABLA III**  
**CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS DE LOS CEMENTOS PORTLAND EMPLEADOS EN EL ESTUDIO**

Nº	Marca	Composición potencial en compuestos (Norma IRAM 1504)					Contenido de escoria (%)	Contenido de SO <sub>3</sub> (%)	Circular 54 MOP Francia	Factores de agresividad	
		SC <sub>3</sub> (%)	SC <sub>2</sub> (%)	AC <sub>3</sub> (%)	FAC <sub>4</sub> (%)	SS(C <sub>4</sub> AF + C <sub>2</sub> F) (%)				Segdn Van der Burgh	Segdn Meier Grellmann
1	A-1 (*)	-	-	-	-	-	12,0	1,8	-	-	-
2	B-1	43	32	7,4	12	-	-	1,6	0,333	0,415	8,806
3	B-1 (*)	-	-	-	-	-	19,5	2,4	-	-	-
4	B-1 (*)	-	-	-	-	-	7,4	2,3	-	-	-
5	F-1	42	30	9,8	10	-	-	1,7	0,312	0,437	4,779
6	B-3 (*)	-	-	-	-	-	16,0	1,6	-	-	-
7	J-1	62	19	3,9	9	-	-	1,8	0,326	0,398	9,962
8	L-3 (*)	-	-	-	-	-	-	2,8	-	-	-
9	P-1	61	16	0	10	12,2	-	2,2	0,295	0,396	-
10	F-4	71	-	0	20	22,7	-	2,0	0,265	0,356	-
11	D-1	40	29	8,3	10	-	-	2,1	0,296	0,430	5,472
12	C-3 (*)	-	-	-	-	-	16,0	2,3	-	-	-
13	A-2	50	25	4,5	15	-	-	1,9	-	-	-

Serie II y III:

(\*) Cemento portland con adiciones declaradas por el fabricante o detectadas por ensayos



**TABLA IV**  
**RESISTENCIA POTENCIAL A LOS SULFATOS. METODOS DE LABORATORIO**

Número	Marca	Resistencia a los sulfatos (Norma IRAM 1659)			Norma ASTM C-452	Formaciones coposas, %
		28 días	% variación 90 días	Penetración 90 días		
<b>Serie I:</b>						
1	A-1	2,77	3,34	14	0,022	-
2	B-1	3,52	13,64	Fondo	-	0,007
3	F-1	-	-	-	-	-
4	F-5	0,59	0,59	0	0,027	-
5	J-1	1,94	16,50	33	0,047	-
6	J-1	0,59	1,46	29	0,060	-
7	L-5	0,19	1,37	0	-	-
8	L-5	0,10	1,47	10	-	-
9	L-5	0,00	0,00	0	0,047	-
10	P-1	0,28	0,75	14	0,043	0,011
11	H-5	0,38	1,89	22	-	-
12	L-5	1,17	1,57	0	-	-
<b>Serie II y III:</b>						
1	A-1	12,2	34,6	Fondo	-	0,012
2	B-1	10,0	30,5	Fondo	0,010	0,010
3	B-1	29,2	35,1	Fondo	-	0,004
4	B-1	0	0	0	-	0,005
5	F-1	9,6	30,8	Fondo	0,070	0,008
6	H-5	0,19	0,19	0	-	0,005
7	J-1	-	-	-	-	-
8	L-5	0,58	0,58	0	0,041	0,007
9	B-1	1,16	3,26	2,5	-	-
10	P-4	0,94	1,16	1	0,017	0,010

TABLA V  
ESTABILIDAD DE MORTEROS SUMERGIDOS EN AGUA POTABLE

Nº	Marca	Variación de longitud a la edad de (meses), %											
		8	15	24	33	36	38	40	44	46	54		
<u>Serie I:</u>													
1	A-1	- 0,008	--	- 0,002	- 0,003	- 0,004	- 0,003	- 0,003	- 0,006	- 0,001(9)	--	--	
2	B-1	- 0,006	- 0,012	0,032	- 0,009	0,028	- 0,033	- 0,030	- 0,009	- 0,011	- 0,023	--	
3	F-1	- 0,027	- 0,032	0,025	0,021	0,018	0,008	- 0,030	0,009	0,012	- 0,013	--	
4	F-5	- 0,025	0,025	0,026	0,023(8)	0,009	- 0,001(10)	--	--	--	--	--	
5	J-1	- 0,076	- 0,124	0,000	0,022(4)	0,003	0,003	0,003	0,001	0,001(9)	--	--	
6	J-1	- 0,014	0,054	0,042(5)	0,020(8)	0,018	0,022(10)	--	--	--	--	--	
7	L-5	- 0,061	- 0,062	0,018	0,014	0,001	0,010	0,009	0,009	0,048	- 0,020	--	
8	L-5	- 0,092	- 0,070	0,024	0,025(4)	0,027	0,024	0,027	- 0,003	0,005(9)	--	--	
9	L-5	- 0,008	0,047	0,045(5)	0,028(8)	0,033	0,020(10)	--	--	--	--	--	
10	P-1	- 0,006	- 0,024	0,026	0,024(4)	0,024	0,025	0,025	0,051	0,023(9)	--	--	
11	B-3 Paz.	- 0,008	- 0,019	0,030	0,019	0,018	0,039	0,044	0,026	0,027	0,002	--	
12	B-3 Paz.	- 0,040	- 0,036	0,007	0,012(4)	0,009	0,004	0,003	0,005	0,018(9)	--	--	

Notas: (4) Lectura a 30 meses  
(5) Lectura a 22 meses  
(8) Lectura a 29 meses  
(9) Lectura a 49 meses  
(10) Lectura a 41 meses

TABLA V (cont)  
ESTABILIDAD DE LOS MORTEROS SUMERGIDOS EN AGUA POTABLE

Nº	Marca	Variación de longitud a la edad de (meses), %												
		3	6	9	11	12	15	16	18	20	22	28		
<b>Series II y III:</b>														
1	A-1	- 0,007	0,005	- 0,010	- 0,041	- 0,020	- 0,067	- 0,058	- 0,001	- 0,056	- 0,034	- 0,035	- 0,035	
2	B-1	- 0,008	0,011	- 0,002	- 0,008	- 0,011	- 0,029	- 0,025	- 0,026	- 0,033	- 0,033	- 0,035	- 0,034	
3	B-1	- 0,003	0,008	- 0,003	0,004	- 0,009	- 0,028	- 0,018	- 0,002	- 0,017	- 0,021	- 0,021	- 0,028	
4	B-1	- 0,008	0,017	- 0,005	- 0,025	- 0,014	- 0,016	- 0,024	- 0,004	- 0,016	- 0,031	- 0,031	- 0,031	
5	F-1	- 0,002	0,009	- 0,005	- 0,007	- 0,013	- 0,002	- 0,024	- 0,023	- 0,032	- 0,034	- 0,034	- 0,033	
6	H-3	- 0,004	0,008	- 0,006	- 0,014	- 0,011	- 0,023	- 0,019	- 0,025	- 0,026	- 0,027	- 0,027	- 0,033	
7	J-1	- 0,001	0,010	0,002	- 0,009	- 0,009	- 0,017	- 0,020	- 0,020	- 0,020	- 0,020	- 0,020	- 0,024	
8	L-3	- 0,008	0,007	- 0,021	- 0,013	- 0,015	- 0,028	- 0,028	- 0,029	- 0,034	- 0,031	- 0,031	- 0,028	
9	P-1	- 0,009	0,000	- 0,005	- 0,017	- 0,008	- 0,026	- 0,028	- 0,025	- 0,016	- 0,032	- 0,032	- 0,029	
10	P-4	- 0,003	0,005	- 0,005	- 0,015	- 0,016	- 0,021	- 0,024	- 0,028	- 0,027	- 0,031	- 0,031	- 0,029	
11	D-1	0,010	- 0,037	- 0,029	- 0,011	- 0,024	--	--	--	--	--	--	--	
12	C-3	0,003	0,000	- 0,001(6)	--	- 0,006	--	--	--	--	--	--	--	
13	A-2	- 0,001	0,006	- 0,009(6)	--	- 0,006	--	--	--	--	--	--	--	

Nota: (6) Lectura a 7 meses

TABLA VI  
ESTABILIDAD DE MORTEROS SUMERGIDOS EN AGUA DE MAR

Nº	Marca	Variación de longitud a la edad de (meses)										
		8	15	24	33	36	38	40	44	46	54	
<u>Serie I:</u>												
1	A-1	- 0,012	- 0,017	0,036	0,032(4)	0,042	0,014	0,015	0,042	0,032(11,2)	--	--
2	B-1	0,009	0,031	0,035	0,035(3)	0,047	0,043	0,020	0,034	0,035	0,000	0,000
3	F-1	0,065	0,070	0,040	(2)	--	--	--	--	--	--	--
4	F-5	- 0,015	0,034	0,035(5)	0,023(8)	- 0,007	--	0,014(10,2)	--	--	--	--
5	J-1	- 0,004	0,008	0,020	0,024(4)	0,040	0,030	0,026	0,041	0,018(11,2)	--	--
6	J-1	- 0,015	0,031	0,036(5)	0,027(3,8)	0,207(7)	--	0,299(7,2)	--	--	--	--
7	L-5	0,030	0,035	0,040	0,033	0,029(3)	0,033	0,020	0,004	0,035	0,017	0,017
8	L-5	- 0,030	0,024	0,046	0,050(4)	0,050(9,2)	--	--	--	--	--	--
9	L-5	0,031	0,029	0,042(5)	0,034(8)	0,051	--	0,018(10,2)	--	--	--	--
10	P-1	0,014	0,002	0,036	0,052(4)	0,029	- 0,009	- 0,014	- 0,004	- 0,034(11,2)	--	--
11	H-3 Puz.	0,014	0,006	- 0,027	0,044(4)	- 0,002(7)	- 0,078(7)	- 0,077	- 0,065(2)	--	--	--
12	L-3 Puz.	0,018	0,022	(1) Retas	--	--	--	--	--	--	--	--

Nota: (1) Lectura a 30 meses 0,284, muy atacadas, fisuras, pernos sueltos  
 (2) Se sacaron muy atacadas, en especial en los extremos  
 (3) Principio de ataque en puntas y bordes  
 (4) Lectura a 30 meses  
 (5) Lectura a 22 meses; (6) Lectura a 33 meses; (7) Muy atacadas  
 (8) Lectura a 29 meses; (9) Se sacaron, desgaste mecánico  
 (10) Lectura a 41 meses; (11) Lectura a 49 meses

TABLA VI (cont).

ESTABILIDAD DE MORTEROS SUMERGIDOS EN AGUA DE MAR

Nº	Marca	Variación de longitud a la edad de (meses)															
		3	6	9	11	12	15	16	18	20	22	28					
<b>Series II y III:</b>																	
1	A-1	- 0,038	0,017	- 0,005	- 0,012	- 0,011	- 0,015(3)	0,011	- 0,013(3)	- 0,017	0,004	- 0,034					
2	B-1	- 0,037	0,013	- 0,010	- 0,011	- 0,003	- 0,005(4)	--	--	--	--	--					
3	B-1	- 0,041	0,013	- 0,005	- 0,015	- 0,011	- 0,002(3)	- 0,019(5)	- 0,007(5)	- 0,011	0,016	(4)					
4	B-1	- 0,049	0,019	- 0,003	- 0,026	0,003	0,000(2)	- 0,019(5)	- 0,007(5)	- 0,026	- 0,002	0,106(4)					
5	F-1	- 0,035	0,012	- 0,026	- 0,017	- 0,017	0,002(3)	- 0,016	- 0,003(5)	- 0,025	0,007	(5)					
6	H-3	- 0,034	0,012	- 0,006	- 0,014	- 0,011	0,006(3)	- 0,011	- 0,016	- 0,026	0,009	- 0,023					
7	J-1	- 0,038	0,010	- 0,008	- 0,021	- 0,006	0,006(3)	- 0,013	- 0,024	- 0,030	0,009(5)	- 0,077(5)					
8	L-3	- 0,034	0,015	- 0,026(2)	- 0,024	- 0,017	- 0,015(3)	- 0,025	- 0,029	- 0,030	- 0,010	- 0,057					
9	P-1	- 0,042	- 0,023	- 0,004	- 0,014	- 0,014	0,006(2)	0,000	- 0,010(3)	- 0,018	0,005	- 0,030					
10	P-4	- 0,022	0,019	0,024	0,009	0,005	0,005	0,014	0,006	- 0,023	0,014	0,011					
11	D-1	- 0,002	0,015	- 0,024	- 0,021(3)	- 0,015(3)	--	--	--	--	--	--					
12	C-3	- 0,001	0,000	0,032(6)	--	- 0,001	--	--	--	--	--	--					
13	A-2	- 0,001	- 0,012	0,022(6)	--	- 0,010	--	--	--	--	--	--					

- Nota: (1) Los resultados son promedio, por lo menos de seis probetas  
 (2) Vértices de probetas redondeados  
 (3) Principio de ataque en puntas y bordes  
 (4) Las probetas se sacaron muy atacadas  
 (5) Muy atacadas  
 (6) Lectura a siete meses