



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

DEGRADACION DEL CONCRETO EN AMBIENTE MARINO

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA (CONSTRUCCION)**

PRESENTA:

ING. VICTOR JIMENEZ ARGÜELLES



ASESOR DE TESIS:

ING. ALFONSO M. ELIZONDO RAMIREZ

MEXICO, D.F. 1997



DEPFI

T. UNAM

1 9 9 7

JIM

ej. 2

INDICE

	Pág.
OBJETIVOS	5
INTRODUCCION	6
CAPITULO 1 EL CONCRETO EN AMBIENTE MARINO	7
1.1 OBRAS MARITIMAS	8
1.2 ANTECEDENTES	8
1.3 DETERIORO DEL CONCRETO	9
1.3.1 INADECUADO DISEÑO DE LA MEZCLA	9
1.3.2 DEFICIENTE FABRICACION DEL CONCRETO	9
1.3.3 GRIETAS EN EL CONCRETO	10
1.4 REACCIONES ENTRE EL AGUA DE MAR Y LOS PRODUCTOS DE HIDRATACION DEL CEMENTO PORTLAND	11
1.5 EFLORESCENCIA	14
1.6 CORROSION DEL ACERO EN EL CONCRETO	15
1.6.1 PROTECCION NATURAL CONTRA LA CORROSION DEL ACERO	15
1.6.2 CAUSAS DE LA CORROSION DEL ACERO	15
1.6.3 CARACTER ELECTROQUIMICO DE LA CORROSION DEL ACERO	16
1.6.4 CORROSION LOCALIZADA: ATAQUE POR CLORUROS	17
1.6.5 MECANISMOS DE PENETRACIÓN DE CLORUROS	17
1.6.6 MECANISMOS DE ATAQUE DE CLORUROS	18
1.6.7 NIVELES DE CLORUROS INICIADORES DE LA CORROSION	18
1.6.8 CORROSION GENERALIZADA: CARBONATACION	19
1.6.9 INFLUENCIA DE LAS GRIETAS EN LA CORROSION DEL ACERO	20
1.7 LA ABRASION EN EL CONCRETO MARINO	21
1.8 CAVITACION EN EL CONCRETO	22

CAPITULO 2 REQUISITOS PARA UNA ESTRUCTURA EN AMBIENTE MARINO	25
2.1 REQUISITOS PARA LA CONSTRUCCION DE CONCRETO DURABLE EN AMBIENTE MARINO	26
2.2 RECOMENDACIONES PARA LOGRAR MODERNAS ESTRUCTURAS MARINAS DE CONCRETO	27
2.3 SELECCION DE LOS MATERIALES PARA LA FABRICACION DEL CONCRETO	31
2.3.1 COMPOSICION DEL CEMENTO	31
2.3.2 AGREGADOS	34
2.3.3 AGUA	38
2.3.4 ADITIVOS	40
2.4 ESPECIFICACIONES PARA EL CONCRETO	41
2.4.1 PROPORCIONAMIENTO	42
2.4.2 MEZCLADO Y TRANSPORTACION	43
2.4.3 COLOCACION	45
2.4.4 COMPACTACION	46
2.4.5 ACABADO DE LA SUPERFICIE	47
2.4.6 CURADO	47
2.4.7 RECUBRIMIENTO DE CONCRETO PARA EL ACERO DE REFUERZO	48
2.4.8 JUNTAS	49
2.4.9 CONTROL DEL AGRIETAMIENTO TERMICO	51
CAPITULO 3 EVALUACION	54
3.1 OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA INSPECCION	55
3.2 NIVELES DE INSPECCION	60
3.2.1 NIVEL I. PREINSPECCION	60
3.2.2 NIVEL II. INSPECCION BAJO EL AGUA	60
3.2.3 NIVEL III. PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS Y DESTRUCTIVAS	60
3.3 PREINSPECCION	62
3.3.1 INFORMACION ANTECEDENTE DE LA ESTRUCTURA	62
3.3.2 INSPECCION VISUAL GENERAL	64
3.3.3 PLANEACION DE LA INSPECCION	64
3.4 INSPECCION BAJO EL AGUA	70
3.4.1 LIMPIEZA	70
3.4.2 INSPECCION BAJO EL AGUA CON Y SIN BUZOS	71
3.4.3 NATURALEZA DE LA INSPECCION BAJO EL AGUA	72
3.4.4 PROCEDIMIENTO TIPICO DE INSPECCION BAJO EL AGUA	75

3.4.4.1 INSPECCION PALPABLE	76
3.4.4.2 MEDICION DE LAS DIMENSIONES FISICAS	76
3.4.4.3 RESONANCIA ACUSTICA	76
3.5 PRUEBAS DESTRUCTIVAS Y NO DESTRUCTIVAS	77
3.5.1 PRUEBAS DESTRUCTIVAS	77
3.5.1.1 CORAZONES DE CONCRETO	77
3.5.2 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS	77
3.5.2.1 VELOCIDAD DEL PULSO	78
3.5.2.2 LECTURAS DEL POTENCIAL DE VOLTAJE	78
3.5.2.3 TOMOGRAFO ASISTIDO POR COMPUTADORA	78
3.5.2.4 MEDICIONES DE LA RESISTENCIA-POLARIZACION	78
3.5.2.5 SISTEMA DE MAPEO CON LASER	79
3.6 DETERMINACION DE LA CAUSA O FUENTE DEL PROBLEMA	80
3.6.1 DOCUMENTACION DE LA INSPECCION	81
3.6.2 EVALUACION DE LA RESISTENCIA DE LA ESTRUCTURA	83
3.6.2.1 MÉTODOS DE PORCENTAJES PREESTABLECIDOS	83
3.6.2.2 ANALISIS DEL ESTADO DE ESFUERZOS	84
3.6.2.3 PRUEBAS DE CARGA	84
CAPITULO 4 REPARACION	86
4.1 ELECCION DE UN METODO DE REPARACION	87
4.2 REMOCION DEL CONCRETO DETERIORADO	88
4.3 SELLO DE GRIETAS	90
4.4 REPARACION DEL ACERO DE REFUERZO	91
4.5 REEMPLAZO DEL CONCRETO	92
4.6 APLICACION DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES	92
4.6.1 REMOCION DE LA EFLORESCENCIA	92
4.6.2 CONCRETO COLADO CON METODOS CONVENCIONALES	93
4.6.3 REPARACION A BASE DE CONCRETO CON FIBRAS (ENCAMISADO)	94
4.6.4 REPARACION A BASE DE CONCRETO LANZADO	96
CONCLUSIONES	103
BIBLIOGRAFIA	105

OBJETIVOS

Con el presente trabajo, se pretende proporcionar la información suficiente para aquellas personas que deseen conocer las causas que originan el deterioro del concreto localizado en agua de mar, así como también los procedimientos a seguir en cuanto a inspección y reparación se refiere.

Por lo anterior el ingeniero civil deberá cumplir con lo siguiente:

- Lograr que las estructuras de concreto que se construyen en ambiente marino, sean más durables y además que ofrezcan adecuadas condiciones de servicio.
- Inspeccionar y evaluar las estructuras de concreto existentes, para conocer el estado en que se encuentran y así poder determinar si se requiere de algún tipo de reparación.
- Tener la posibilidad de elegir el método de reparación, en caso de ser requerido.

INTRODUCCION

La degradación del concreto en ambiente marino, es un problema que afecta a muchas estructuras realizadas en México y en el mundo entero. Por lo tanto, existe la necesidad de contar con procedimientos, técnicas y materiales que permitan la construcción de estructuras de concreto con la suficiente capacidad para resistir ante todos aquellos factores involucrados con el agua de mar, pudiendo ser éstos mecánicos o químicos.

El presente trabajo pretende explicar los principales factores que intervienen de manera directa o indirecta en la degradación del concreto, así como también las características que presentan las estructuras dañadas por el agua de mar.

También se analizarán los materiales que intervienen en la fabricación del concreto, además de las técnicas y procedimientos a seguir en la colocación del mismo; todo lo anterior con el fin de que la estructura a construir ofrezca una seguridad estructural durante un periodo de tiempo mayor y además cuente con adecuadas condiciones de servicio.

En cuanto a las estructuras ya existentes y, que presentan daños ocasionados por el agua de mar, se tratará la forma en que dichas estructuras deben ser revisadas y evaluadas.

Finalmente, se analizarán los diferentes métodos de reparación que existen, para así poder reparar las estructuras con el método más adecuado.

CAPITULO 1

EL CONCRETO EN AMBIENTE MARINO

1.1 OBRAS MARITIMAS

Un puerto marítimo se compone de obras exteriores (las cuales están formadas por rompeolas) y de obras interiores (muelles, almacenes y vialidades).

Los rompeolas son estructuras que dan protección contra el oleaje del mar, para que las embarcaciones puedan contar con el abrigo necesario para realizar adecuadamente su carga y descarga.

Las instalaciones para el atraque y amarre de las embarcaciones en el interior del puerto (en los muelles), pueden ser de madera, metal o concreto. En México se utiliza la madera en atracaderos pequeños para lanchas y yates.

Las estructuras de los muelles pueden estar formadas a base de muros de gravedad, los cuales pueden ser de bloques o cajones de concreto. La cimentación generalmente esta hecha a base de pilotes precolados y la superestructura a base de losas nervadas y/o placas planas, coladas in situ o con sistema mixto, es decir con piezas precoladas y unidas por medio de concreto colado en el lugar.

1.2 ANTECEDENTES

Los principales materiales de construcción que se utilizan en las obras marítimas son: El acero, la madera, los materiales pétreos, el concreto reforzado y el concreto pretensado.

La utilización en mayor o menor grado de los materiales ya mencionados, depende del desarrollo tecnológico del país y además de la disponibilidad de las materias primas. Así por ejemplo, en países como Holanda y algunos países Arabes, los materiales que más comúnmente utilizan por razones económicas, son el acero y el concreto. Por otro lado, en países como Estados Unidos y Canadá, además de utilizar el acero y el concreto, utilizan mucho la madera para rompeolas de pequeñas profundidades y en gran parte de sus muelles. En México, el material pétreo se utiliza para rompeolas; el concreto reforzado para muelles; y la madera se utiliza únicamente en muelles para pequeñas embarcaciones. En cuanto al concreto pretensado y/o presforzado, se ha utilizado muy poco para la superestructura y nunca para la cimentación (por ejemplo pilotes) de muelles.

Se recomienda que las pilas, cimentaciones, muros contenedores y rompeolas para estructuras en el mar se realicen de concreto. Esto es porque, en el contexto de la naturaleza agresiva del agua de mar, el concreto no es únicamente el material estructural más económico para la construcción de grandes estructuras, sino que también es el más durable. Además, la utilización del concreto en la fabricación de tanques de almacenaje de petróleo en el Mar del Norte, también son un indicativo que muestra la tendencia a seguir utilizando el concreto en la fabricación de estructuras marinas.

Por lo anterior, para la producción de recursos energéticos y minerales, las estructuras que se localicen en agua de mar, deberán fabricarse de concreto. Es claro que, para que una estructura de concreto sea durable, debe contar con un adecuado programa de mantenimiento durante su vida de servicio. Por otra parte, en ésta época de ahorro de energía, se espera que el concreto reemplace a otros materiales estructurales, los cuales requieren de mayor cantidad de energía para producirse.

Debido a las exigencias actuales, se ha notado una tendencia hacia las estructuras de concreto cada vez más grandes, expuestas a mayores profundidades y al ataque de las aguas agresivas del mar. En consecuencia, todo lo anteriormente expuesto en cuanto a la durabilidad del concreto en ambiente marino, nos obliga a prestarle mayor atención a dicho tema. Otro punto de importancia es que las estructuras de concreto de alta resistencia bien realizadas, han pasado decenas de años en agua de mar sin presentar grandes daños, y en cambio, otras de inferior calidad en la mano de obra o pobre calidad en el concreto, y sin tener muchos años desde su realización, si se les ha encontrado deterioros, por lo que, el control de la calidad en el concreto también tiene gran importancia en el tema de la durabilidad de las estructuras.

1.3 DETERIORO DEL CONCRETO

De los estudios que se han realizado en estructuras de concreto dañadas por el agua de mar, se ha encontrado que los concreto realizados con cemento portland invariablemente contienen granos de degradación potencial. Dichos granos se presentan en forma de productos de hidratación del cemento (especialmente el hidróxido de calcio, el cual básicamente inicia en la naturaleza), los cuales son vulnerables a la descomposición química como resultado de la interacción química con ciertos componentes del agua de mar.

Estos granos se convierten en productos nocivos, dependiendo principalmente de la capacidad de un concreto para guardar el agua que penetra hacia el interior. Por lo tanto, la permeabilidad del concreto es la más importante propiedad que determina su durabilidad.

A continuación se mencionan las principales causas que originan la permeabilidad de un concreto:

1.3.1 Inadecuado diseño de la mezcla.

La permeabilidad del concreto se deriva principalmente de la permeabilidad de la pasta del cemento. Un bajo contenido de cemento y una alta relación agua/cemento produce un producto fácilmente hidratable. La graduación pobre de los agregados también puede ser causa de la permeabilidad del concreto.

1.3.2 Deficiente fabricación del concreto.

Aún cuando se tiene una alta calidad en la mezcla del concreto, se puede producir un concreto permeable si el concreto no se compacta adecuadamente. Las juntas pobremente construidas pueden también permitir la penetración del agua. Las

deficiencias en la colocación, tales como la segregación de los agregados en la mezcla de concreto y la formación de capas gruesas en las juntas, o la dilución de la mezcla de concreto con agua adicional, ha sido frecuentemente identificada como una causa de la permeabilidad en el concreto.

1.3.3 Grietas en el concreto.

A pesar de la buena calidad del concreto y la fabricación adecuada, las estructuras de concreto pueden sin embargo ser permeable al agua de mar si se desarrollan grietas durante el transcurso de su endurecimiento y su vida de servicio. Entre las causas comunes de agrietamiento están las contracciones por secado (que son originadas por los cambios de temperatura y humedad) o cambios de temperatura en condiciones de restricción, los ciclos de congelamiento y deshielo en concretos sin aire incluido, corrosión del acero de refuerzo, expansión de las reacciones químicas que involucran la formación de hidrato de sulfoaluminato y gel de álcali-sílice, deflexión excesiva debida a la carga, deficiencias en el transporte de los miembros precolados y en el manejo en obra de las pilas precoladas, esfuerzos debidos al gradiente térmico en estructuras de concreto de secciones grandes.

Otro aspecto importante es que, dependiendo de la línea de marea, los procesos individuales de deterioro tienden a limitarse en diferentes partes de la estructura. Desde este punto de vista, una estructura puede ser dividida en tres zonas:

- 1) La *parte superior* que está arriba de la línea de la marea alta, y que no se encuentra directamente expuesta a el agua de mar. Sin embargo, está expuesta al aire, al vapor de agua salada transportada por el viento y a la acción de la helada. Consecuentemente, el agrietamiento debido al congelamiento y/o deshielo del concreto, es el fenómeno nocivo predominante en ésta zona.
- 2) La *zona de marea* que está entre los límites de la marea alta y la marea baja. Esta zona no es únicamente vulnerable al agrietamiento y al desconchamiento del concreto debido al humedecimiento y secado, y a la acción de la helada, sino también a la pérdida de material debido a la descomposición química de los productos de hidratación del cemento y al impacto de las olas que en muchas ocasiones contienen hielo flotante, arena y grava.
- 3) La *parte baja* de la estructura que está siempre sumergida en el agua de mar, es vulnerable a los esfuerzos y a la pérdida de material como un resultado de las reacciones químicas entre el agua de mar y los productos de hidratación del cemento. Sin embargo, esta parte de la estructura es la menos afectada gracias a que no actúa la acción del viento y no se llevan a cabo los ciclos de congelamiento y deshielo.

1.4 REACCIONES ENTRE EL AGUA DE MAR Y LOS PRODUCTOS DE HIDRATACION DEL CEMENTO PORTLAND

Las estructuras de concreto en ambiente marino, son estructuras que están expuestas a graves ataques químicos, lo cual representa una gran desventaja para las mismas, ya que la resistencia del concreto a los agentes químicos suele ser menor que cuando se trata de otras formas de ataque.

Las formas más frecuentes de ataque de los agentes químicos al concreto son la lixiviación del cemento y la acción de los sulfatos, la agresividad de las aguas del mar y las aguas ligeramente ácidas (*ver tabla 1.1*).

TABLA 1.1 VELOCIDAD DE ATAQUE DE ALGUNOS PRODUCTOS QUIMICOS DE USO COMUN EN EL CONCRETO

VELOCIDAD DE ATAQUE A LA TEMPERATURA AMBIENTE	SOLUCIONES SALINAS	DIVERSOS
RAPIDO	CLORURO DE ALUMINIO	
MODERADO	NITRATO DE AMONIO SULFATO DE AMONIO SULFATO DE SODIO SULFATO DE MAGNESIO SULFATO DE CALCIO	BROMO (GAS) SULFITO LIQUIDO
LENTO	CLORURO DE AMONIO CLORURO DE MAGNESIO CIANURO DE SODIO	CLORO (GAS) AGUA DE MAR AGUA SUAVE
MINIMO	CLORURO DE CALCIO CLORURO DE SODIO NITRATO DE ZINC CROMATO DE SODIO	AMONIACO (LIQUIDO)

En términos generales, la resistencia del concreto varía de acuerdo con la cantidad y tipo de cemento utilizado, ya que, se ha observado que la resistencia aumenta en el siguiente orden:

1. Cemento Portland de fraguado normal y rápido.
2. Cemento Portland de alto horno o cemento de bajo calor.
3. Cemento Portland resistente a los sulfatos o cemento puzolánico.
4. Cemento supersulfatado.
5. Cemento de alta alúmina.

Lo que es importante notar es que, en algunos casos, la densidad y permeabilidad del concreto influyen en su durabilidad a tal grado, que la influencia del tipo de cemento empleado, pasa a segundo término.

La química de las reacciones responsable de la acción de descomposición del agua de mar sobre los constituyentes del cemento se resume en la *tabla 1.2*.

Las sales en estado sólido no atacan al concreto, pero cuando se encuentran en solución pueden reaccionar con la pasta de cemento endurecida. Por ejemplo, algunas arcillas contienen álcalis, magnesio y sulfato de calcio y el agua subterránea de ese tipo de arcillas es, en realidad, una solución de sulfato; en consecuencia, puede atacar el cemento, puesto que el sulfato reacciona con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y con los hidratos de aluminato de calcio. Los productos de la reacción, yeso y sulfoaluminato de calcio, tienen un volumen mucho mayor que los compuestos que reemplazan, de modo que su reacción con los sulfatos produce expansión y ruptura del concreto.

Normalmente, el agua de mar contiene cerca de 3.5% de sales solubles por peso; de los cuales, los iones de cloruro tienen considerable influencia en la corrosión del acero de refuerzo en el concreto y las sales de magnesio ejercen el más dañino efecto sobre los productos de hidratación del cemento portland. Además, el bióxido de carbono disuelto en el mar puede también llegar a ser un instrumento en la descomposición de la pasta de cemento endurecida. Normalmente, el pH del agua de mar es cerca de 8 y solamente muy pequeñas cantidades de bióxido de carbono (CO_2) disuelto están presentes. Sin embargo, debido a la presencia de materia orgánica desintegrándose, las aguas de mar altamente carbonatadas muestran valores de pH de 7 o menos, por lo que, pueden ser completamente nocivos a la hidratación de los productos del cemento.

En un estudio que involucró 30 años de inmersión a 2500 especímenes de concreto en agua de mar, hechos con diferentes tipos de cemento y mezclas, contando con una relación agua/cemento de 0.55 a 0.65; Gjorv (*Ref.1*) estableció que los concretos fabricados con cemento con aluminato de calcio, cemento supersulfatado y cemento con cenizas volantes resistieron al agua de mar bastante bien, incluso cuando los especímenes no fueron curados antes de sumergirlos en el agua. Los únicos especímenes que mostraron daños severos, fueron los que se fabricaron con cementos bajos en aluminato tricálcico (C_3A).

TABLA 1.2 ACCION NOCIVA DEL AGUA SOBRE LOS COMPONENTES DEL CEMENTO PORTLAND HIDRATADO

Componente del agua de mar que puede intervenir de forma nociva durante la reacción química con el cemento.	Posibles reacciones químicas	Efectos físicos asociados con las reacciones químicas.
<p>BIOXIDO DE CARBONO</p> <p>Pequeñas cantidades de bióxido de carbono (CO₂), derivados principalmente de la absorción del bióxido de carbono atmosférico, están presentes siempre en el agua de mar. Sin embargo, el deterioro de la materia orgánica, suspendida en el agua de mar, puede conducir a una la mayor concentración de bióxido de carbono disuelto, el cual, generalmente se refleja con una reducción del pH del agua de mar (a valores menores que 8).</p> <p>Sales de magnesio. Normalmente, el agua de mar contiene 3200 ppm de cloruro de magnesio y 2200 ppm de sulfato de magnesio. Con relación a la hidratación de los productos del cemento, estas sales de magnesio, aún en la presencia de pequeñas concentraciones, son consideradas como dañinas.</p>	<p style="text-align: center;">CO₂</p> <p>$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2$ Donde: CaCO₃ (<i>ARAGONITA</i>) y Ca(HCO₃)₂ (<i>BICARBONATO DE CALCIO</i>)</p> <p>$CO_2 + [Ca(OH)_2 + 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 18H_2O] \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot H_2O + CaSO_4 \cdot 2H_2O$ Donde: CaSO₄ · 2H₂O (<i>YESO</i>)</p> <p>$3CO_2 + 3CaO \cdot 2SiO_2 \rightarrow 3CaCO_3 + 2SiO_2 \cdot H_2O$ Donde: 3CaCO₃ (<i>ARAGONITA</i>)</p> <p>$MgCl_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + CaCl_2$ Mg(OH)₂ (<i>BRUCITA</i>)</p> <p>$MgSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + CaSO_4 \cdot 2H_2O$</p> <p>$MgSO_4 + [Ca(OH)_2 + 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 18H_2O] \rightarrow Mg(OH)_2 + 3CaO \cdot Al_2O_3 + 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$</p> <p>$MgSO_4 + [Ca(OH)_2 + 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O] \rightarrow 4MgO \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O + CaSO_4 \cdot 2H_2O$</p>	<p>Tanto el bicarbonato de calcio como el yeso, son solubles en agua de mar. La pérdida de material y la debilitación ó ablandamiento de la pasta de cemento endurecida puede por lo tanto ser asociada con la formación de dichos componentes. Puesto que toda la hidratación de los productos de cemento portland, incluyendo el hidrato de silicato cálcico, pueden ser descompuestos por las reacciones de la carbonatación; los concretos permeables en el agua de mar contienen más concentración de CO₂ que lo normal estando probablemente en deterioro</p> <p>El cloruro de calcio y el yeso, siendo solubles en el agua de mar, conducen a la pérdida de material y a la debilitación. Se ha encontrado que la conversión de: 3CaO · 2SiO₂ · 3H₂O a 4MgO · SiO₂ · 8H₂O (mostrada en la última fórmula) produce fragilidad y pérdida de resistencia.</p>

Para la protección tanto del acero como del concreto contra el ataque del agua de mar, es recomendable remover una parte del potencial de la cal libre con el cemento Portland con una adición de puzolana. Se ha encontrado que la adición de 15% (por peso de cemento) de puzolana de buena calidad será capaz de remover una parte del potencial de la cal libre de la pasta de cemento bien hidratada.

Por otra parte es necesario conocer el movimiento de las corrientes marinas, para poder calcular el peligro que representa el ataque de los sulfatos, ya que, además de la concentración del sulfato, la velocidad con que es atacado el concreto depende también de la velocidad con que se puede reabastecer el sulfato que se pierde en la reacción con el cemento.

El ataque de sulfatos contra el concreto tiene una apariencia blanquecina característica. El daño suele iniciarse en bordes y esquinas, y va seguido de agrietamiento y descascaramiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

1.5 EFLORESCENCIA

En determinadas circunstancias, la lixiviación de los componentes de la cal puede provocar la formación de depósitos de sal sobre la superficie del concreto, lo cual se conoce como eflorescencia. Esto se observa por ejemplo, cuando el agua se filtra en el concreto mal compactado, a través de grietas o de las juntas mal hechas y cuando puede haber evaporación desde la superficie del concreto. El carbonato de calcio formado por la reacción del hidróxido de calcio con el bióxido de carbono queda como residuo en forma de depósito blanco. Asimismo, se pueden encontrar depósitos de sulfato de calcio.

Cuando se tienen poros cerca de la superficie del concreto, las probabilidades de que se presente la eflorescencia aumentan considerablemente. De tal manera que, además del grado de compactación y la relación agua/cemento, el tipo de cimbra puede representar un factor importante. La eflorescencia es mayor en climas fríos y húmedos seguidos de una época de calor. Al principio de esa secuencia hay una ligera carbonatación, la cal se disuelve con la humedad de la superficie y, finalmente, el hidróxido de calcio es arrastrado hacia el exterior del concreto.

La eflorescencia también se puede deber al uso de agregados de arena de mar sin lavar. El recubrimiento de sal que rodea el agregado puede, a medida que pasa el tiempo, formar un depósito blanco sobre la superficie del concreto. El yeso y los álcalis de los agregados pueden ejercer un efecto similar.

Además del aspecto de la lixiviación, la eflorescencia es importante sólo en el sentido de que mancha el concreto. La eflorescencia temprana se puede limpiar con una cepillo y agua.

Otra imperfección que aparece en la superficie son las manchas oscuras de forma irregular y visibles según la dirección de la luz. Su origen es completamente diferente del de

la eflorescencia; son formaciones compactas de pasta de cemento que casi no tienen poros. Esto puede ser causado por el conjunto de granos gruesos de cemento, que se han hidratado sólo un poco, en sitios en los que la relación agua/cemento es muy baja. El color oscuro se debe a la falta de hidratación y producción de cal. Este tipo de segregación de partículas gruesas puede ser causada por la acción filtrante de una cimbra con fugas de agua o de partículas de agregado. Con el tiempo se puede lograr la hidratación y puede desaparecer el color oscuro.

1.6 CORROSION DEL ACERO EN EL CONCRETO

1.6.1 Protección natural contra la corrosión del acero

El concreto posee una característica de gran importancia para la construcción: protege natural y eficazmente las estructuras de acero contra la corrosión que causa el medio ambiente. Dicha protección se debe, en primer lugar, a que la solución contenida en los poros del concreto tiene un pH fuertemente alcalino y, por ello, mantiene inactivo naturalmente al acero. El hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos y principalmente de los óxidos de sodio(Na) y potasio(K) presentes en el cemento (álcalis), hacen posible que el pH de la fase acuosa contenida en los poros del concreto fluctúe entre 12.5 y 13.5 de la escala de pH. Entre dichos valores de pH, se forma espontáneamente una capa inerte de óxido de hierro, la cual es transparente, compacta y continua y, que preserva al acero contra la corrosión por períodos indefinidos, aún cuando existen grandes cantidades de humedad en el concreto endurecido. Además, de la protección por inactividad química, el concreto proporciona al acero una protección física contra los agentes externos causantes de la corrosión, ya que preserva al acero del agua, oxígeno, cloruros y otras sustancias que pueden tomar parte en el proceso de la corrosión. Si bien el concreto no constituye una barrera perfecta debida a la red de poros que presenta y a la tendencia que tiene a formar grietas, la importancia de la barrera física que representa un recubrimiento de concreto se relaciona principalmente con su capacidad para preservar las condiciones de un pH alto, necesarias para mantener el estado inerte del refuerzo al limitar la velocidad de penetración de sustancias ácidas desde el exterior.

1.6.2 Causas de la corrosión del acero

La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto ocurre por la destrucción de la capa pasivante formada naturalmente sobre el acero embebido en concreto. Esta tiene dos causas principales:

- a) La presencia de una cantidad suficiente de cloruros (añadidos durante la fabricación del concreto o por la penetración del exterior) u otros iones despasivantes en contacto con el refuerzo.
- b) La disminución de la alcalinidad del concreto, cuando éste reacciona con sustancias ácidas del medio ambiente.

Los iones despasivantes provocan una corrosión de tipo localizado, mientras que la reducción de la alcalinidad del concreto permite la disolución completa de la capa despasivante y, por lo tanto, ocasiona una corrosión del tipo generalizado.

1.6.3 Caracter electroquímico de la corrosión del acero

El concreto es un material poroso, por lo que se puede hablar de la existencia de dos fases: una fase sólida de minerales hidratados y una fase líquida contenida en el interior de los poros (solución del poro).

Actualmente se reconoce que la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto ocurre por un proceso de tipo electroquímico, esto es que la reacción global de la corrosión es el resultado de dos o más reacciones electroquímicas parciales (independientes entre sí) que se llevan a cabo en la interfase metal (acero)/electrolito (solución del poro). Dichas reacciones electroquímicas parciales alejan al metal que se corroe de su estado de equilibrio, dando como resultado su disolución.

Como en todo proceso de corrosión electroquímica, en el acero de refuerzo debe formarse una pila de corrosión, es decir que debe haber un ánodo y un cátodo conectados eléctricamente y un conductor iónico debe cerrar el circuito.

La existencia de ánodos y cátodos en el refuerzo está garantizada en el sistema acero/concreto debido a las heterogeneidades del sistema:

- a) En la escala macroscópica, que resulta de la estructura porosa del concreto y del empleo de agregados, así como del proceso de fabricación y de las condiciones de curado, que dan origen a regiones con diferentes propiedades tanto químicas como físicas; y
- b) En la escala microscópica, las heterogeneidades pueden ser originadas por los gradientes de temperatura, acceso no uniforme de agua y sales, y a defectos durante la puesta en obra del concreto.

Por lo que respecta a las características de la solución del poro que controlan la corrosión del refuerzo, se tiene:

- a) Composición y cantidad de la solución en los poros del concreto: La composición de la solución del poro es un factor decisivo para determinar si la barra está corroída o no. Se ha encontrado que cuando la solución del poro contiene cantidades elevadas de álcalis (óxidos de sodio y potasio), el pH de ésta se mantiene elevado, teniendo de esta manera un ambiente muy alcalino alrededor del refuerzo, lo que contrarresta la acción de los cloruros. De acuerdo con la cantidad de solución que contengan los poros en el concreto se puede determinar el grado de saturación, el cual incide fuertemente en la cinética de la corrosión y determina el estado de corrosión en la interfase acero/concreto.
- b) Estructura y distribución de la red de poros del concreto: El tamaño, la distribución y la interconexión de los poros determina la disponibilidad de oxígeno y humedad necesarios para la permanencia de la capa pasivante, así como la tasa de ingreso de iones agresivos y otros agentes iniciadores de la corrosión.

c) Presencia de hidróxido de calcio $[Ca(OH_2)]$ precipitado: La solubilidad de este compuesto es limitada en soluciones acuosas y el volumen del producto de la reacción de hidratación permanece como una sustancia sólida embebida en la pasta de cemento. Aunque su contribución a la resistencia mecánica del concreto es pobre, mantiene la solución del poro en un valor elevado de pH.

1.6.4 Corrosion localizada: ataque por cloruros

La situación más agresiva y común que puede desencadenar la corrosión localizada en el acero de refuerzo en el concreto es la presencia de cloruros.

Existen otros iones despasivantes como los sulfuros y sulfatos, pero son menos frecuentes y peligrosos que los cloruros.

El ingreso de los cloruros puede ocurrir de varias formas: del exterior, a través de los poros del concreto; por la adición, durante la fabricación de éstos como aditivos; o por el uso de materiales contaminados.

En muchas partes del mundo, por ejemplo en el Cercano Oriente, es difícil disponer de agregados libres de sal y agua potable para la fabricación del concreto, por lo que la incorporación de cloruros es inevitable. Los cloruros también pueden ingresar al concreto a través de aditivos acelerantes del fraguado, o reductores de agua, los cuales suelen contener cloruros en su composición. Por las razones anteriormente expuestas, en algunos países se ha prohibido el uso de cloruro de calcio ($CaCl_2$) como acelerantes del fraguado por su elevada agresividad en la corrosión del acero de refuerzo. En países con clima frío, el empleo de cloruro de sodio ($NaCl$) como anticongelante en puentes y carreteras provoca un severo deterioro por la corrosión del acero de refuerzo. En las regiones tropicales de México, la principal fuente de contaminación es la sal proveniente de la brisa del mar.

1.6.5 Mecanismos de penetración de cloruros

Los cloruros pueden penetrar el concreto por succión capilar del agua salada en el concreto más o menos seco a través de la red de poros. Por medio de este proceso, el agua salada puede penetrar con gran rapidez y provocar daños severos al producirse la corrosión en poco tiempo.

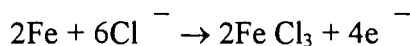
En cambio, en las estructuras sumergidas, los cloruros pueden penetrar principalmente por difusión, debida al gradiente de concentraciones de la solución de poro y en éste caso, el fenómeno de la corrosión sucede más lentamente.

La penetración de cloruros ocurre, por lo general, a través de la combinación de varios mecanismos, por lo que es importante que los modelos para simular los ataques por cloruros tengan en cuenta todos los factores. Por ejemplo, además de un mecanismo de difusión, que es relativamente lento, los cloruros pueden penetrar mucho más rápidamente por fuerzas capilares, mecanismo muy propio de ambientes con brisa de mar, existente en climas cálidos marítimos, como el que existe en las regiones costeras de nuestro país, ya que

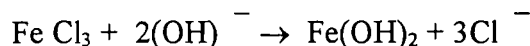
los cloruros se encuentran suspendidos en la niebla salina. En este fenómeno influye mucho la dirección predominante del viento y la insolación.

1.6.6 Mecanismos de ataque de cloruros

Una vez que los cloruros han llegado a la barra de refuerzo en cantidades suficientes, estos pueden destruir la pasividad natural del acero de refuerzo, provocando su corrosión. Aún se discute el mecanismo por el cual estos iones destruyen la pasividad, sin embargo se han propuesto varias teorías, entre ellas la de "formación del compuesto". Esta teoría plantea que los iones libres del Cl^- forman un compuesto soluble con los iones de hierro, de acuerdo con la siguiente ecuación:



El compuesto así obtenido se dispersa hacia otra zona alejada del ánodo, donde el pH y la concentración de oxígeno disuelto son elevados. En consecuencia, el compuesto se disocia, precipitándose el hidróxido de hierro y liberándose los iones cloruro:



Debido a que los cloruros no se agotan en este proceso y la corrosión no se detiene por la alta concentración de hierro en la vecindad del acero, el proceso puede continuar catalíticamente, emigrando desde el acero y reaccionando con el oxígeno para formar óxidos o hidróxidos. Por lo tanto en vez de que la corrosión se propague a lo largo del acero de refuerzo, se mantiene en las zonas anódicas, lo que provoca picaduras profundas en el acero.

En general, estas teorías sugieren que sólo los cloruros libres, es decir los disueltos en la solución de poro, participan en el proceso de corrosión. Sin embargo, es probable que los cloruros que se han unido a algún proceso de hidratación del cemento rompan ese enlace y regresen a la solución.

1.6.7 Niveles de cloruros iniciadores de la corrosión

Para que los cloruros rompan la capa inerte de la barra y comiencen el proceso de corrosión, requieren estar en una concentración llamada nivel iniciador de la corrosión. Este nivel depende de numerosos factores, entre ellos:

- *El proporcionamiento del concreto
- *El tipo de cemento (finura, contenido de yeso, contenido de aluminato tricálcico, etc.)
- *La relación agua-cemento
- *El contenido de sulfatos
- *Las condiciones de curado, edad, historia ambiental del concreto, rugosidad y limpieza de la barra de refuerzo
- *Las reacciones álcali-agregado.

Por esta razón no se puede determinar un valor fijo general del nivel iniciador de la corrosión, para el concreto en los tres niveles de marea. Sin embargo, se han desarrollado

varias investigaciones para conocer el nivel de cloruros iniciadores de la corrosión. Asimismo, algunos países han establecido límites en sus normas o reglamentos de construcción. El contenido límite de cloruros suele expresarse en porcentaje por peso de cemento, en porcentaje por peso del concreto o en kg de cloruro por m³ de concreto.

1.6.8 Corrosion generalizada: carbonatacion

La concentración típica de bióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera es de 0.03%; debido a sus características ácidas, el bióxido de carbono reacciona con el concreto húmedo, gracias a la naturaleza alcalina de éste último. Este proceso se conoce como carbonatación.

El proceso de carbonatación se lleva a cabo de la siguiente manera: el aire que está en contacto con la superficie de concreto penetra por los poros capilares y el bióxido de carbono que contiene, reacciona rápidamente con los hidróxidos en la solución de poro.

El aire que entra entonces en los poros ya no contiene bióxido de carbono, creándose de esta manera una diferencia de concentración del mismo entre el aire del exterior y el interior. Esta diferencia produce la difusión del bióxido de carbono hacia el exterior de los poros. Los productos precipitados durante la reacción del bióxido de carbono con los hidróxidos disminuyen la permeabilidad del concreto y reducen el pH de la solución del poro. Si la carbonatación continúa, entonces la fase sólida de la pasta de cemento también reacciona con el bióxido de carbono, desligando los cloruros de los cloroaluminatos e incrementándose de esta manera el peligro de corrosión.

La principal consecuencia de la carbonatación es una caída abrupta del pH de la solución del poro y por lo tanto aparece un frente de carbonatación, separando dos zonas: una hacia la superficie, con un pH menor de 8 y otra, hacia el interior del concreto, con un pH superior a 12. Estas zonas se pueden distinguir fácilmente por medio de un indicador de pH, como la fenolftaleína.

Cuando el frente de la carbonatación llega al acero de refuerzo, la capa pasiva se vuelve inestable, rompiéndose la protección que le confería al acero e iniciándose el proceso de corrosión. Este último, es generalizado y homogéneo, tal como si el refuerzo estuviera expuesto a la atmósfera sin ninguna protección, pero con el agravante de que la humedad permanece en el interior del concreto y, por lo tanto, en contacto con el acero durante mucho más tiempo. Dicha circunstancia produce, a largo plazo, una reducción en la sección transversal de la barra y una cantidad significativa óxidos y productos de corrosión, los cuales pueden inducir esfuerzos de tensión, en el concreto que agrieten el recubrimiento, o bien pueden difundirse a través de los poros hacia la superficie del concreto y producir manchas en el acabado. Cuando la carbonatación se produce en un concreto que contiene cloruros, los efectos dañinos de la primera se suman a los efectos nocivos de los segundos, y generan una corrosión severa.

Aunque el proceso de carbonatación en el concreto es muy lento, hay dos factores que pueden reducir la vida esperada de las estructuras: una delgada capa de recubrimiento de concreto y la existencia de grietas. Si se proporciona un adecuado recubrimiento al

refuerzo, la carbonatación no penetra tanto como para dañar la pasividad del acero durante la vida útil de la estructura.

1.6.9 Influencia de las grietas en la corrosión del acero

Las grietas en el concreto constituyen un camino para que los agentes externos (humedad, aire y contaminantes) lleguen rápidamente hasta el acero de refuerzo. A través de las grietas, tanto la carbonatación como los cloruros tienden a penetrar más de prisa hacia el acero; una vez que llegan al refuerzo, se forman macropilas de corrosión, de manera que el acero expuesto en la fisura actúa anódicamente mientras que el proceso catódico ocurre en áreas sin fisuras (*Ref. 2*).

Se han recomendado algunos espesores de recubrimiento y anchos permisibles de grietas (*ver tabla 1.3*). La presencia de grietas en dirección transversal al acero de refuerzo, no es un fenómeno que conduzca serios problemas de corrosión, excepto en áreas muy restringidas. Si la grieta es suficientemente estrecha, la corrosión que se presente puede ser local y no profunda. Por otro lado, si las grietas se forman en dirección paralela al acero de refuerzo, se puede proporcionar un acceso más acelerado de las sustancias que propician la corrosión y por consiguiente, acelerar el ataque de dichas sustancias y agravar la corrosión.

<i>Tabla 1.3</i> Anchos de grieta tolerables para concreto reforzado.	
Condición de exposición	Ancho de grieta tolerable (mm)
Secado al aire o membrana protectora	0.41
Humedad, aire húmedo, suelo	0.30
Productos químicos descongelantes	0.10
<i>Agua de mar y brisa de agua de mar; humedecimiento y secado</i>	<i>0.15</i>
Estructuras de retención de agua	0.10

1.7 LA ABRASION EN EL CONCRETO MARINO

Las principales circunstancias por las cuales el concreto puede sufrir el fenómeno de la abrasión son el deslizamiento, el rozamiento o la percusión. En el caso de las estructuras hidráulicas, la acción de los materiales abrasivos arrastrados por el agua suelen causar erosión.

Es difícil evaluar la resistencia del concreto a la abrasión, ya que el daño depende de la causa exacta del desgaste y no existe ningún procedimiento de prueba que sea útil para determinar todas las condiciones que intervienen: la prueba de fricción incluyendo los baleros, la rueda de afilar y el pulido con arena pueden ser útiles en diferentes casos. La norma ASTM C 418-76 prescribe el procedimiento de pulido con chorro de arena para determinar el desgaste, pero no queda claro cómo adoptarlo como criterio de resistencia al desgaste en situaciones diferentes.

La erosión del concreto es un tipo de desgaste muy importante, que puede ocurrir cuando éste se encuentra en contacto con corrientes de agua. Es conveniente distinguir entre la erosión debida a partículas sólidas arrastradas por el agua y la que se debe a picaduras, resultado de la formación y colapso de pequeñas burbujas localizadas dentro de las corrientes de agua, las cuales fluyen a gran velocidad.

La velocidad de la erosión depende de la cantidad, forma, dimensiones y dureza de las partículas transportadas, de la velocidad de su movimiento, de la presencia de remolinos, así como de la calidad del concreto. Como sucede en los casos de abrasión general, parece ser que la calidad del concreto se mide mejor a partir de la resistencia a la compresión, pero también es importante la dosificación de la mezcla. En particular el concreto que contiene agregados grandes causa menos erosión que un mortero de igual resistencia, y además, los agregados duros mejoran la resistencia a la abrasión. No obstante en ciertas condiciones de desgaste, los agregados más pequeños producen una abrasión más uniforme de la superficie.

En términos generales, con un revenimiento constante, la resistencia a la abrasión aumenta conforme disminuye el contenido de cemento, esto tiene la ventaja de reducir la formación de escurrimientos de lechada. Cuando el contenido de cemento es constante, la resistencia mejora cuando disminuye el revenimiento: probablemente esto concuerda con la influencia general de la resistencia a la compresión.

Por supuesto que en todos los casos lo único importante es la calidad del concreto en la superficie y no en los sitios cercanos a ella, pero hasta el mejor de los concretos soporta pocas veces una fuerte abrasión durante periodos prolongados.

1.8 CAVITACION EN EL CONCRETO

La cavitación es una forma de impacto que puede ser muy destructiva si sucede en la periferia del concreto. El fenómeno se origina en las corrientes de agua y termina cuando sucede un cambio de presión.

Aunque un concreto de buena calidad puede soportar corrientes de agua de manera constante, tangencial y a gran velocidad, el daño grave ocurre si hay cavitaciones. Las cavidades en el agua pueden ser grandes huecos simples, que después se rompen, o grupos de burbujas pequeñas. Las burbujas fluyen corriente abajo y, al penetrar en un área de presión más alta, sufren un colapso que causa un gran impacto. Puesto que el colapso de las cavidades significa la entrada de agua a gran velocidad en los espacios que antes estaban ocupados por el vapor, se genera una presión sumamente alta a intervalos muy cortos y el colapso repetido sobre determinada parte del concreto es el que produce las picaduras. Los grupos de cavidades diminutas que se encuentran en los remolinos son los que causan el mayor daño. Dichas cavidades suelen unirse momentáneamente para formar una cavidad grande y amorfa que se aplasta con enorme rapidez. Muchas de ellas pulsan a altas frecuencias y parece ser que eso es lo que agrava el daño en las áreas extensas.

Aunque la frecuencia de cavitaciones se debe primordialmente a los cambios de presión (y como consecuencia también a los cambios de velocidad), es especialmente posible que ocurra en presencia de pequeñas cantidades de aire sin disolver dentro del agua. Dichas burbujas se comportan como núcleos en los que puede presentarse más fácilmente un cambio de estado líquido a vapor. Las partículas de polvo ejercen un efecto similar, probablemente porque "dan cabida" al aire no disuelto. Por otra parte, el aire libre en grandes cantidades (hasta un 2% por volumen), aunque fomenta las cavidades, sirve de amortiguador contra el colapso de las mismas y, por lo tanto, reduce el daño. Así pues, puede ser beneficiosa la inclusión deliberada de aire en el agua.

Las superficies del concreto afectadas por la cavitación son irregulares, burdas y picadas, comparadas con las superficies lisas que han sido erosionadas por los sólidos arrastrados por el agua. El daño no progresa de manera constante: generalmente, después de un período inicial de menor deterioro, el daño aumenta con rapidez, para continuar más lentamente.

En concretos de alta resistencia se logra mejor resistencia contra la cavitación, debido a la baja relación agua/cemento. Es recomendable, que el tamaño máximo de agregado que quede cerca de la superficie no sea mayor de 20 mm (3/4"), porque la cavitación tiende a remover las partículas grandes. La dureza de los agregados es de gran importancia, pero lo que es vital, es que haya una buena adherencia entre los agregados y el mortero.

El concreto que contiene polímeros muestra buena resistencia, lo que depende principalmente del tipo de relleno, de la cohesión del aglomerante y de la adherencia al relleno. El uso de fibras de acero en el concreto mejora su resistencia a la cavitación;

también es posible combinarlas con la polimerización. Asimismo, se pueden aplicar revestimientos elásticos para reducir el esfuerzo hasta un nivel que pueda tolerar el concreto subyacente. Se ha observado que algunos recubrimientos de neopreno y poliuretano resultan satisfactorios, pero deben adherirse fuertemente a la base del concreto.

A pesar de que el uso del concreto adecuado puede reducir los daños causados por la cavitación, ni siquiera el concreto de la mejor calidad puede soportar las fuerzas de cavitación por tiempo indefinido. Así pues, la solución a los problemas de cavitación radica, primordialmente en reducir ésta. Esto se puede lograr formando superficies lisas y bien alineadas, libres de irregularidades (como depresiones, protuberancias, juntas y desniveles), y evitando cambios abruptos de pendiente o curvatura, que tiendan a alejar el flujo de la superficie. Si es posible, se debe impedir el aumento local de velocidad del agua, puesto que el daño es proporcional a la sexta o séptima potencia de la velocidad.

REFERENCIAS

1. GJORV, O. E.

Long-Time Durability of Concrete in Sea Water

ACI

Jour. Proc., vol. 68

1971

p. 60-67

2. CASTRO, P.

Corrosión en estructuras de concreto reforzado

Construcción y Tecnología vol. VIII No. 95

Abril 1996

IMCYC

P. 6 -15

CAPITULO 2

REQUISITOS PARA UNA ESTRUCTURA EN AMBIENTE MARINO

2.1 REQUISITOS PARA LA CONSTRUCCION DE CONCRETO DURABLE EN AMBIENTE MARINO

Para la construcción de estructuras de concreto en ambiente marino y que se requiera sean durables, se deberán tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Considerar las reacciones químicas entre los componentes de la pasta de cemento hidratado y los del agua de mar, tales como la carbonatación, el ataque de los sulfatos, y el ataque del ión magnesio, ya que solamente pueden limitarse dichos ataques hacia la superficie, siempre y cuando se implementen y realicen adecuadas medidas para asegurar la baja permeabilidad del concreto.

Las estructuras de concreto reforzado fabricadas con una baja relación agua/cemento y con un alto contenido de cemento (Más de 350 kg/m^3) comúnmente han mostrado una vida de servicio satisfactoria en un medio ambiente marino, excepto cuando han estado expuestas a elevados gradientes térmicos, a la acción del hielo, o al ataque álcali-agregado. Las estructuras construidas en los años de 1950 usualmente han sido protegidas de la acción del hielo proporcionando un adecuado aire a la mezcla del concreto, y del ataque álcali-agregado con el uso de cemento Portland bajo en álcalis y/o aditivos puzolánicos. Tanto el ataque de la carbonatación como el ataque de los sulfatos será muy insignificante en las estructuras marinas modernas, en cuanto se fabriquen con mezclas de concretos de baja permeabilidad.

2. Las causas de la permeabilidad elevada en las estructuras de concreto construidas recientemente, no están limitadas a una mezcla de concreto proporcionada pobremente, tales como las que se realizan con bajo contenido de cemento, una alta relación agua/cemento, y una granulometría inadecuada en los agregados. Con una mezcla de concreto bien proporcionada una de las causas que frecuentemente originan la alta permeabilidad, es la deficiencia en la fabricación del concreto, como por ejemplo, el mezclado incompleto del concreto, la compactación inadecuada y el curado después de la colocación, insuficiente recubrimiento de concreto sobre el acero de refuerzo, y juntas mal construidas.

3. Aun las estructuras bien construidas, fabricadas con mezclas de concreto de alta calidad, pueden llegar a ser permeables en su vida de servicio debido al agrietamiento excesivo causado por varias razones, tales como asentamientos, carga prematura, sobrecargas, e impacto repetido. Este es especialmente el caso que ocurre con el concreto reforzado, el cual en la mayoría de los ocasiones contiene microgrietas.

4. Con estructuras de concreto reforzado, es una observación común que el agrietamiento y desconchamiento están frecuentemente acompañados por la corrosión del acero de refuerzo que se encuentra ahogado en el concreto. El reforzamiento no previene el agrietamiento del concreto debido al secado o contracción térmica; para restringir la contracción del concreto, el acero reduce el

ancho de las grietas, así, se forman microgrietas en lugar de numerosas grietas de poco ancho. El ensanchamiento de dichas grietas en la vida de servicio de la estructura puede ser debido a varias causas que facilitan la penetración (a través de los poros) de iones y gases, los cuales son necesarios para la realización del proceso de corrosión. La corrosión induce a un agrietamiento adicional, y éste ciclo de corrosión-agrietamiento resulta en un aumento de la permeabilidad y eventualmente en serios daños estructurales.

En pocas palabras, para obtener una estructura de concreto marina que ofrezca durabilidad durante un periodo largo, el control del agrietamiento del concreto en servicio es tan importante como el control de la permeabilidad del concreto durante el proporcionamiento adecuado de la mezcla y la fabricación misma del concreto.

2.2 RECOMENDACIONES PARA LOGRAR MODERNAS ESTRUCTURAS MARINAS DE CONCRETO

Las experiencias que se han obtenido en los casos estudiados sobre el deterioro del concreto por el agua de mar, han sido generalmente incorporadas en los reglamentos de la industria de la construcción los cuales, si se siguen cuidadosamente, nos permitirán construir estructuras marinas de concreto que permanecerán en servicio por periodos más grandes que las construidas en el pasado. Sin embargo, muchas estructuras marinas modernas construidas durante los 10 o 15 años pasados, han sido utilizadas para resistir esfuerzos mayores y en condiciones diferentes para las cuales fueron diseñadas. Por ejemplo, estructuras de concreto costeras en el Artico y en el Mar del Norte, las cuales son expuestas a enormes presiones hidrostáticas y diferenciales, no solamente requieren de alta resistencia sino que también requieren de resistencia a la abrasión y al impacto del hielo flotante, por lo que deben ser excesivamente reforzadas.

Para proteger de la corrosión al acero de refuerzo que se encuentra ahogado en el concreto, ha llegado a ser imperativo que las mezclas de concreto a utilizarse, sean bajas en permeabilidad. La práctica recomendada para la durabilidad del concreto reforzado y presforzado en estructuras costeras, tiene por obvias razones, los más estrictos requerimientos en la industria de la construcción. Por lo tanto se dará una breve descripción de la práctica recomendada debido a que la tecnología en la fabricación de grandes cantidades de concretos impermeables de alta resistencia ha generado considerables investigaciones y desarrollos en el campo de materiales nuevos y la practica del concreto.

En los Estados Unidos y Canadá, el reporte del Comité del ACI (ACI 357R-84) es usado para el diseño de determinadas estructuras de concreto reforzado y presforzado para servicio en ambiente marino. En Europa y Asia, para el diseño y construcción de estructuras de concreto marino es costumbre usar las recomendaciones de la Federación Internacional de Estructuras de Concreto Presforzado (FIP, 4a edición, 1984). Desde el punto de vista de durabilidad, tanto el reglamento del ACI como de la FIP proponen que las estructuras marinas sean divididas en 3 zonas: la ZONA SUMERGIDA en donde el concreto esta

continuamente bajo el agua, la ZONA DE MAREA en donde el concreto está continuamente sujeto a humedecimiento y secado, y la ZONA ATOMOSFERICA la cual está situada sobre la zona de marea. Debido a que la severidad y los tipos de problemas de durabilidad son diferentes para las diferentes zonas, se requiere que las propiedades de las mezclas de concreto no sean las mismas para la estructura completa.

Hablando en términos generales, para la durabilidad de las estructuras de concreto que se localizan en la costa y las que están en contacto directo con el agua de mar, el concreto deberá mostrar una resistencia ante: *EL AGRIETAMIENTO TERMICO, LA ACCION DE LA HELADA, AL DAÑO CAUSADO POR LA EROSION/ABRASION*, y a los *FENOMENOS DE EXPANSION QUIMICA Y ELECTROQUIMICA* (Tales como la reacción álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo). La permeabilidad del concreto es importante en las tres zonas porque ésta influye en los fenómenos físicos y químicos causando el deterioro del concreto. Es importante mencionar que, el daño por erosión/abrasión está usualmente limitado a la zona de marea, mientras que los otros problemas que afectan a la durabilidad pueden ocurrir tanto en la zona de marea como en la zona atmosférica.

En la exposición a largo plazo en agua de mar, el concreto en zona sumergida, aunque permeable, puede sufrir un moderado deterioro, causado por el ataque químico. La velocidad de ataque es muy baja debido a los productos insolubles de interacción química entre el agua de mar y la pasta de cemento Portland hidratado depositada en los huecos y microgrietas, con lo cual se reduce la permeabilidad del concreto. De un estudio realizado sobre la distribución del tamaño de los poros de la pasta del cemento, por medio de un porosímetro de intrusión de mercurio, *Midgley e Illston (Ref. 1)* determinaron que aun la penetración de los cloruros reduce el tamaño de los poros pequeños y por consecuencia se reduce la permeabilidad. Debe señalarse que, esta clase de protección que forma un sello de huecos y microgrietas al formarse los productos insolubles, no estará disponible en la zona de mareas debido a que esa parte de la estructura está constantemente bajo la influencia de la acción de las mareas y del impacto de los sólidos, tales como la arena, la grava y el hielo. Como un resultado del daño del recubrimiento debido a la abrasión y al microagrietamiento, el concreto va siendo gradualmente más permeable y, por lo tanto, vulnerable a otros tipos de ataques.

Tanto las recomendaciones del ACI como de la FIP para el diseño y construcción de estructuras de concreto en el mar, están basadas en experiencias obtenidas en construcciones en el Mar del Norte durante el periodo de 1972 a 1987. Lo cual es muy útil para poder comparar las recomendaciones del ACI y de la FIP con respecto a la selección de los materiales para fabricar el concreto, las proporciones de las mezclas y la práctica en la construcción para la durabilidad a largo plazo. Las recomendaciones en cuanto a la selección de materiales y proporciones de las mezclas, se resumen en las *tablas 2.1 y 2.2*.

TABLA 2.1. MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DE CONCRETO PARA ESTRUCTURAS COSTERAS.

MATERIAL	RECOMENDACION DEL ACI 357R-84	RECOMENDACION DEL FIP-1985
COMPOSICION DEL CEMENTO	El contenido de C ₃ A, en el cemento Portland no debe ser menor que 4% para proporcionar protección al reforzamiento de acero. El C ₃ A máximo no deberá exceder del 10% para obtener una resistencia adecuada contra el ataque de los sulfatos.	En las zonas de marea y atmosférica, se recomienda un contenido moderado de C ₃ A en el cemento Portland. Los cementos de endurecimiento rápido no se deben utilizar en reparaciones. Para las estructuras de dimensiones enormes, se recomienda utilizar cementos de bajo calor de hidratación.
ADITIVOS: - CLORUROS	No se deberá agregar intencionalmente cloruros. El total de iones de cloro solubles en agua, en una mezcla de concreto del total de los materiales componentes, no deberá exceder de 0.1% por peso de cemento para concreto reforzado normal, y 0.06% para concretos presforzados.	No se deberá usar CaCl ₂ o aditivos que contengan más de 0.1% de cloruro por peso de cemento.
- QUIMICOS Y AIRE INCLUIDO	En donde se requiere durabilidad para el congelamiento y deshielo, el concreto deberá contener aire incluido como lo recomienda el ACI 201.2R	El aire incluido, ayuda a la trabajabilidad, y los retardantes son frecuentemente esenciales para obtener una mezcla de diseño óptima, pero se deberá tener precaución por el lado de los efectos de cada tipo de aditivo antes de ser usado.
- PUZOLANICOS	Las puzolanas, de acuerdo con la ASTM C618 (Solamente se incluyen puzolanas naturales y cenizas volantes) pueden ser usadas, siempre y cuando se realicen pruebas para determinar sus ventajas y desventajas, especialmente, en cuanto a la resistencia a los sulfatos, trabajabilidad y corrosión del acero de refuerzo.	Los materiales puzolanicos de alta calidad, tales como los humos de sílica especiales pueden ser agregados para producir mejor resistencia, durabilidad y trabajabilidad.
AGREGADOS	La grava y arena natural, ó roca triturada de acuerdo con la ASTM C33, y de acuerdo a la ASTM C330 para agregados ligeros; los agregados marinos pueden ser usados si estos han sido previamente lavados para eliminar los iones de cloro.	Los agregados que comúnmente sufren cambios físicos o químicos en el concreto, deberán ser evitados. No se deberá usar agregados marinos a menos que el contenido de cloro se encuentre en un nivel aceptable, y a menos que los agregados contengan un bajo contenido de concha de mar.

TABLA 2.2 ESPECIFICACIONES PARA MEZCLAS DE CONCRETO PARA ESTRUCTURAS COSTERAS

ESPECIFICACION	RECOMENDACION DEL ACI 357-84	RECOMENDACION DE LA FIP-1985
ESFUERZO MINIMO DE COMPRESION (28 DIAS)	350 kg/cm ² para todas las zonas; 420 kg/cm ² en donde es probable que se tenga degradación en la superficie.	320 kg/cm ² para todas las zonas; 360 kg/cm ² en donde se requiere resistencia a la abrasión.
RELACION MAXIMA DE AGUA/CEMENTO	0.45 para la zona sumergida y 0.40 para las zonas de marea y atmosférica.	Se especifica un máximo de 0.45, pero es preferible una relación de 0.40.
CONTENIDO MINIMO DE CEMENTO	356 Kg/m ³	320 Kg/m ³ y 360 Kg/m ³ para un tamaño máximo de 40 mm. y 20 mm. para el agregado grueso, respectivamente. Y para la zona de marea, 400 Kg/m ³ .
CONSISTENCIA	No es requisito	No es requisito
PERMEABILIDAD MINIMA	No requerida	No requerida

2.3 SELECCION DE LOS MATERIALES PARA LA FABRICACION DEL CONCRETO

2.3.1 Composicion del cemento

Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos de calcio hidráulicos. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. Durante esta reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con agua para formar una pasta de aspecto similar a una roca. Cuando la pasta (cemento y agua) se mezcla con los agregados (arena y grava) actúa como adhesivo y une a todas las partículas de agregado para formar así el concreto, el material de construcción más versátil y de mayor uso en el mundo.

La hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua. Cada partícula de cemento forma un aumento sobre su superficie mismo que gradualmente se extiende hasta enlazarse con el aumento de otras partículas de cemento o hasta que se adhiere a las sustancias adyacentes. Esta reconstitución tiene como resultado la progresiva rigidización, endurecimiento y desarrollo de resistencia. La rigidización del concreto se puede reconocer por una pérdida de trabajabilidad que normalmente ocurre dentro de las tres primeras horas luego del mezclado, pero depende de la composición y finura del cemento (*ver tablas 2.3, 2.4 y 2.5*), de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura. Posteriormente el concreto fragua y comienza a endurecer.

Tabla 2.3 Los principales compuestos que constituyen al cemento son:

NOMBRE	FORMULA QUIMICA	ABREVIATURA
Silicato Tricálcico	3CaO SiO ₂	C ₃ S
Silicato Dicálcico	2CaO SiO ₂	C ₂ S
Aluminato tricálcico	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferro Aluminato Tetracálcico	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Tabla 2.4 Composición química en porcentaje para los diferentes tipos de cemento:

TIPO	NOMBRE	SiO ₂	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
I	Normal	50	24	11	8
II	Modificado	42	33	5	13
III	Resistencia Rápida	60	13	9	8
IV	Bajo Calor	26	50	5	12
V	Resistencia a los Sulfatos	40	40	4	9

Lo que falta para ajustar el 100% corresponde a otros cuerpos como la cal libre, el yeso, la magnesia, etc.

Tabla 2.5 Composición potencial de los compuestos (%) para los diferentes tipos de cemento:

TIPO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	SO ₃	Finura Blaine (m ² /kg)
I	20.9	5.2	2.3	64.4	2.8	2.9	370
II	21.7	4.7	3.6	63.6	2.9	2.4	370
III	21.3	5.1	2.3	64.9	3.0	3.1	540
IV	24.3	4.3	4.1	62.3	1.8	1.9	380
V	25.0	3.4	2.8	64.4	1.9	1.6	380

COMPORTAMIENTO DE LOS COMPUESTOS:

Silicato Tricálcico.- Es el principal causante de la adquisición de resistencia en la primera edad, así como de la mayor producción de calor en la misma.

Silicato Dicálcico.- Madura lentamente contribuyendo a la adquisición de resistencia a edades mayores, contribuyendo poco a la producción del calor de hidratación en la primera edad.

Aluminato Tricálcico.- Contribuye poco a la resistencia temprana y libera gran cantidad de calor en la primera edad. Es el más sensible al ataque de los sulfatos.

Ferroaluminato Tetracálcico.- Favorece la fabricación del cemento al bajar la temperatura necesaria para la formación del clinker. Se hidrata rápidamente pero contribuye poco a la resistencia.

El ACI contempla un límite máximo de 10% para el C_3A en el cemento Portland, debido a que los cementos con un contenido de C_3A mayor del 10%, son susceptibles al ataque de los sulfatos en el agua de mar. Aunque el agua de mar normalmente contiene 2700mg/lit de iones de sulfato, lo cual está dentro de los límites que la ASTM permite para los cementos Portland Tipo V (C_3A menor de 5%), se encontró que en tres casos que se estudiaron (*Ref. 2*) no se observó algún ataque por sulfatos en concretos expuestos al agua de mar por mucho tiempo (De 46 a 67 años) y fabricados con cementos que contenían entre 14 y 17% de C_3A . Cabe mencionar que dichas estructuras se construyeron utilizando concretos de baja permeabilidad y alto contenido de cemento.

Desde el punto de vista de la corrosión del acero por causa de los cloruros, Rasheeduzzafar (*Ref. 3*) realizó una serie de pruebas tanto en campo como en el laboratorio, encontrando que la velocidad de difusión de los cloruros en las pastas de cemento Portland Tipo V, es algo más grande que con el cemento Portland Tipo I. Más importante fue el hecho de que, la mezcla de cemento portland que contenía 30% de ceniza volante Clase F o 65% de escoria de alto horno producían pastas con velocidades de difusión considerablemente más bajas que los cementos Portland.

También se ha observado en la práctica común en el campo, que al cambiar un cemento Portland Tipo I más grueso, por un cemento portland Tipo II más fino (Con moderado C_3A), se obtiene un cemento-superfluidificador, con lo cual se logra una superficie más lisa en el concreto.

Por lo anterior, se puede deducir que los límites del contenido de C_3A en el cemento, tal como se dan en la Práctica Recomendada del ACI, están obsoletos. La finura y el contenido de C_3A de un cemento, pueden ser importantes desde el punto de vista de la influencia sobre los concretos superfluidificados, y no debido solamente a los efectos de la durabilidad como se menciona en las recomendaciones del ACI. Teóricamente, para las estructuras de concreto en agua de mar, al usar solamente cementos Portland ordinarios (Con un contenido del 6-12% de C_3A); deben ser satisfactoriamente proporcionados los cementos con aditivos adecuados, para poder ser utilizados, por supuesto entre otras cosas, también dependerá del contenido de álcali en el cemento. En la práctica común de campo, las consideraciones para el calor de hidratación y permeabilidad requieren que, respectivamente, el uso de cementos Portland Tipo III y Tipo V sean desaprobados y el uso de cementos Portland con puzolanas y los cementos Portland con escoria de alto horno reciban consideraciones especiales.

2.3.2 Agregados

El ACI 357R permite el uso de los agregados para el concreto, como lo son la grava y arena natural o la roca triturada, siempre y cuando cumplan con las especificaciones que marca la ASTM C 33. La FIP recomienda que se evite el uso de los agregados que comúnmente sufren cambios físicos o químicos.

En cuanto a las propiedades, pruebas, materiales nocivos y materiales reactivos de los agregados, las tablas 2.5, 2.6 y 2.7 proporcionan información más detallada.

El microagrietamiento en la zona de transición entre las partículas del agregado grueso y la pasta de cemento parece ser la más importante causa que origina el incremento de la permeabilidad del concreto en su etapa de servicio. El tamaño del agregado, su forma y mineralogía tienen una gran influencia sobre la resistencia y por lo tanto en el comportamiento del microagrietamiento de la zona de transición. Generalmente, las partículas del agregado de peso normal que son mayores de 20 mm y ya sea demasiado extendido o demasiado plano, tiende a acumular agua por el sangrado en su proximidad. Esto resulta en una zona de transición porosa y frágil, en la que las microgrietas fácilmente pueden convertirse en un factor de contribución en el incremento de la permeabilidad del concreto.

Los agregados de cuarzo y de areniscas no forman una adherencia química resistente con la pasta de cemento Portland y sus coeficientes de expansión térmico son también considerablemente mayores que los de la pasta de cemento. Por otro lado, los agregados ligeros y los de areniscas además de que no forman una resistente unión química, muestran menos desproporción con la matriz de la pasta de cemento con respecto a las propiedades elásticas y térmicas. Consecuentemente, en exposición al agua de mar, las mezclas de concreto hechas con agregados de roca caliza y con agregado ligero han mostrado una mejor durabilidad que las mezclas de concreto similares hechas con agregados de roca arenisca o con cuarzo.

Los agregados para el concreto en la zona de marea, en donde se requiere una resistencia a la fuerte erosión, deberán ser duros y resistentes. Las experiencias en campo en concretos de resistencias que fluctúan entre 300 kg/cm² y 600 kg/cm² han mostrado que bajo condiciones de abrasión y erosión severas, es usualmente la unión entre la pasta de cemento y el agregado grueso quien falla, lo cual causa el desprendimiento de las partículas del agregado. La incorporación de un material reactivo altamente puzolánico (tal como lo es el humo de sílice condensado) a la mezcla de concreto, mejora considerablemente la unión entre la pasta de cemento y el agregado y, consecuentemente, aumenta la resistencia del concreto a la erosión/abrasión. *Gjorv (Ref. 6)* encontró que una mezcla de concreto de alta resistencia (1500 kg/cm²) realizado con agregados de cuarzo-diorita o con jaspe, un superfluidificante y humo de sílice condensado, mostró daño ocasionado por la erosión/abrasión en el mismo orden que los elementos de granito utilizados para los mismos propósitos.

En caso de que se tenga que utilizar arena proveniente de la playa o del estuario, se deberá tomar en cuenta que contiene sal y por lo tanto se requiere procesarla. En Gran Bretaña, más del 10% de los agregados que se utilizan son de origen marino. El procedimiento más sencillo que se le puede proporcionar a la arena, es el de lavado con agua dulce, pero se debe tener cuidado cuando se trabaja con depósitos situados encima de la marca de marea alta, ya que pueden contener grandes cantidades de sal, a veces hasta del 6% por peso de la arena. Generalmente la arena tomada del lecho marino, aunque haya sido lavada con la misma agua de mar, no contiene cantidades perjudiciales de sal.

Es importante mencionar que, en cuanto a la cantidad de cloruro de calcio anhidro que se encuentra en el agregado, no es el contenido total del cloruro en el agregado lo que más importa en la práctica, sino más bien la cantidad de cloruro soluble, o quizás el grado en que el cloruro soluble reacciona durante la hidratación del cemento. En consecuencia, si se presenta una situación en la que se tenga que utilizar el agregado con una excesiva cantidad de cloruro (por razones económicas), se deberán llevar a cabo pruebas para determinar su conveniencia.

Si no se elimina la sal, absorberá la humedad del aire y causará eflorescencia -desagradables depósitos blancos en la superficie del concreto-. También se puede producir una ligera corrosión del acero de refuerzo, pero no se cree que pueda alcanzar un grado peligroso, en especial cuando se trata de concretos de buena calidad y provistos con refuerzo adecuadamente recubierto por la pasta. En estructuras a base de concreto masivo no es de esperarse algún problema, aunque, pueden presentarse problemas especiales causados por la presencia de diversas sales en los agregados que se encuentran en regiones áridas, como en el Medio Oriente.

Las arenas de mar suelen ser extremadamente finas, por lo que se deberá verificar la granulometría de cualquier arena nueva.

El agregado grueso dragado de mar puede tener un alto contenido de conchas. Este hecho no ejerce ningún efecto adverso en la resistencia del concreto, pero la trabajabilidad del mismo si se reduce ligeramente. El contenido de conchas mayores de 5 mm se puede determinar mediante selección manual, utilizando el método que estipula la Norma Británica (BS 812: Parte 2: 1975).

TABLA 2.5 PROPIEDADES Y PRUEBAS DE AGREGADOS

PROPIEDAD	IMPORTANCIA	DESIGNACION DE LA PRUEBA	REQUISITO O CARACTERISTICAS REPORTADAS
Resistencia al desgaste y a la degradación	Índice de calidad del agregado; resistencia al desgaste	ASTM C 131 ASTM C 535 ASTM C 779	Porcentaje máximo de pérdida de peso Profundidad y tiempo de desgaste
Resistencia a la congelación y deshielo	Descascaramiento de la superficie, aspereza, pérdida de sección y deformación	ASTM C 666 ASTM C 682	Número máximo de ciclos o período de inmunidad a la congelación; factor de durabilidad
Resistencia a la desintegración por sulfatos	Sanidad contra la acción del intemperismo	ASTM C 88	Pérdida de peso, partículas exhibiendo fallas
Forma de la partícula y textura superficial	Trabajabilidad del concreto en estado fresco	ASTM C 295 ASTM C 3398	Porcentaje máximo de partículas planas y elongadas
Granulometría	Trabajabilidad del concreto en estado fresco; economía	ASTM C 117 ASTM C 136	Porcentaje máximo y mínimo que pasa las mallas especificadas
Peso volumétrico	Cálculos para el diseño de mezclas; clasificación	ASTM C 29	Peso compacto y peso suelto
Peso específico	Cálculos para el diseño de mezclas	ASTM C 127 ASTM C 128	
Absorción y humedad superficial	Control de la calidad del concreto	ASTM C 70 ASTM C 127 ASTM C 128 ASTM C 566	
Resistencia a la compresión y a la flexión	Aceptación del agregado fino cuando otras pruebas fallan	ASTM C 39 ASTM C 78	Que la resistencia exceda el 95% de la resistencia lograda con arena purificada
Definiciones de los componentes	Aclarar el entendimiento y la comunicación	ASTM C 125 ASTM C 294	
Componentes de los agregados	Determinar la cantidad de materiales orgánicos y deletéreos	ASTM C 40 ASTM C 87 ASTM C 117 ASTM C 123 ASTM C 142 ASTM C 295	Porcentaje máximo de los componentes individuales
Resistencia a la reactividad con los álcalis y al cambio volumétrico	Sanidad contra el cambio de volumen	ASTM C 227 ASTM C 289 ASTM C 295 ASTM C 342 ASTM C 586	Cambio longitudinal máximo, cantidad y componentes de sílice y alcalinidad

TABLA 2.6 MATERIALES NOCIVOS EN LOS AGREGADOS

SUSTANCIAS	EFEECTO EN EL CONCRETO	DESIGNACION DE LA PRUEBA
Impurezas orgánicas	Afectan el fraguado y el endurecimiento, pueden causar deterioros	ASTM C 40 ASTM C 87
Material más fino que la malla No. 200	Afecta a la adherencia, aumenta la cantidad de agua requerida	ASTM C 117
Cárbon, lignito u otros materiales de peso ligero	Afectan a la durabilidad, pueden ser causa de manchas y erupciones	ASTM C 123
Partículas suaves	Afectan a la durabilidad	ASTM C 123
Terrones de arcilla y partículas deleznales	Afectan a la trabajabilidad y a la durabilidad, pueden provocar erupciones	ASTM C 142
Horsteno de baja densidad relativa	Afectan a la durabilidad, pueden provocar erupciones	ASTM C 123 ASTM C 295
Agregados reactivos con los álcalis	Expansión anormal, agrietamientos en forma de mapa, erupciones	ASTM C 227 ASTM C 289 ASTM C 295 ASTM C 342 ASTM C 586

TABLA 2.7 ALGUNOS MINERALES, ROCAS Y MATERIALES SINTETICOS REACTIVOS POTENCIALMENTE DAÑINOS

SUSTANCIAS REACTIVAS ALCALIS - SILICE		SUSTANCIAS REACTIVAS ALCALI - CARBONO
Andesitas	Opalo	Dolomitas calcíticas
Argilitas	Pizarras opalinas	Calizas dolomíticas
Ciertas dolomitas y calizas silíceas	Filitas	Dolomitas de grano fino
Horstenos calcedónicos	Cuarcitas	
Calcedonia	Cuarzosas	
Cristobalita	Riolitas	
Dacitas	Esquistos	
Material volcánico	Pizarras silíceas	
Gneis granítico	Cuarzo deformado	
Grauvacas	Vidrio silícico	
Metagrauvacas	Tridimita	

2.3.3 Agua

Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga un sabor u olor pronunciado, se puede utilizar para producir concreto. Sin embargo, algunas aguas no potables pueden ser adecuadas para el concreto.

En la *tabla 2.8* se presenta un análisis típico, de suministros de agua a algunas ciudades de Estados Unidos y Canadá, y de agua de mar. El agua proveniente de cualquiera de estas fuentes es adecuada para producir concreto. Una fuente de abastecimiento cuyo análisis sea parecido a alguno de las aguas que aparecen en la tabla será probablemente satisfactoria para ser utilizada en el concreto.

TABLA 2.8 ANALISIS TIPICOS DE AGUA PARA SUMINISTROS A CIUDADES Y DE AGUA DE MAR (PARTES POR MILLON)

Productos químicos	Análisis No.			
	1	2	3	Agua de mar
Sílice (SiO ₂)	2.4	0.0	6.5	-
Hierro (Fe)	0.1	0.0	0.0	-
Calcio (Ca)	5.8	15.3	29.5	50-480
Magnesio (Mg)	1.4	5.5	7.6	260-1410
Sodio (Na)	1.7	16.1	2.3	2190-12,200
Potasio (K)	0.7	0.0	1.6	70-550
Bicarbonato (HCO ₃)	14	35.8	122	-
Sulfato (SO ₄)	9.7	59.9	5.3	580-2810
Cloruro (Cl)	2.0	3.0	1.4	3960- 20,000
Nitrato (NO ₃)	0.5	0.0	1.6	-
Sólidos disueltos totales	31	250	125	35,000

Del agua que se tenga dudas, se puede utilizar para fabricar concreto si los cubos de mortero (Norma ASTM C109) producidos con ella, alcanzan resistencias a los 7 días iguales o al menos el 90% de especímenes testigo fabricados con agua potable o destilada. Además se deberán analizar los ensayos ASTM 191 para asegurar que las impurezas en el agua no afecten el tiempo de fraguado del cemento, ya sea acortando o prolongando el mismo.

Las impurezas excesivas en el agua no sólo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también pueden ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del acero de refuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad. Por consiguiente se pueden fijar ciertos límites opcionales en el contenido de cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua o se pueden desarrollar ensayos adecuados para determinar el efecto que la impureza provoque sobre ciertas propiedades. Algunas impurezas pueden tener un efecto mínimo sobre la resistencia y el tiempo de fraguado, pero pueden afectar de manera adversa a la durabilidad y algunas otras propiedades.

El agua que contiene menos de 2000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos totales generalmente puede ser utilizada de manera satisfactoria para elaborar concreto. El agua que contenga más de 2000 ppm de sólidos disueltos deberá ser ensayada para investigar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado.

El agua de mar que contenga hasta 35000 ppm de sales disueltas, generalmente es adecuada como agua para fabricar concreto simple. Aproximadamente el 78% de la sal es cloruro de sodio y el 15% es cloruro y sulfato de magnesio. Aún cuando un concreto hecho con agua de mar puede tener una resistencia temprana mayor que un concreto normal, sus resistencias a edades mayores (después de 28 días) pueden ser inferiores. Sin embargo, esta reducción en la resistencia puede ser compensada reduciendo la relación agua/cemento.

El agua de mar no es adecuada para fabricar concreto reforzado con acero y no deberá usarse en concretos presforzados debido al riesgo de corrosión del refuerzo, particularmente en ambientes cálidos y húmedos.

La cantidad de sodio y potasio en las sales presentes en el agua de mar, que se utilice para fabricar concreto, se puede combinar con agregados reactivos a los álcalis de la misma manera que los álcalis en el cemento. Por lo anterior, el agua de mar no se deberá usar para producir concretos que contengan agregados potencialmente reactivos con los álcalis, aún cuando el contenido de álcalis en el cemento sea bajo. El agua de mar que se utiliza para producir concreto, también tiende a causar eflorescencia y humedad en superficies de concreto expuestas al aire y al agua.

2.3.4 Aditivos

Para obtener impermeabilidad y resistencia a la abrasión, lo cual es esencial para la durabilidad del concreto que es expuesto bastante tiempo en agua de mar, se deben usar tanto los aditivos reductores de agua como los minerales. Las recomendaciones de la FIP contemplan materiales puzolánicos de alta calidad, tales como el humo de sílice que puede ser agregado para producir una resistencia apropiada, durabilidad y trabajabilidad. Sin embargo, contrariamente a la evidencia del campo y del laboratorio, el ACI 357R-84 no tiene una clara postura en favor del uso de los aditivos puzolánicos y cementantes en las estructuras de concreto en el mar (El humo de sílice y la escoria de alto horno no se mencionan en la recomendación del ACI, hasta 1988). Sin embargo existen muchas publicaciones que proporcionan una abundancia de información útil sobre la composición y propiedades de los aditivos en el concreto.

Metha (*Ref. 11*) considera que para mejorar la trabajabilidad, reducir el calor de hidratación e incrementar la resistencia de la zona de transición entre los agregados y la pasta de cemento, las partículas finas de un aditivo mineral son capaces de engrandecer la homogeneidad en la microestructura del concreto endurecido. Esto mejora la capacidad de un concreto para resistir al microagrietamiento, el cual es importante para mantener impermeable al concreto durante su servicio. La cantidad de aditivo mineral requerido para este propósito variará con el tamaño de las partículas y la composición química. Mientras que del 15% al 25% de ceniza volante por peso del total de los materiales cementantes pueden ser adecuados, generalmente se requiere de 50% a 70% de escoria de alto horno granulada, para lograr propiedades similares. Debido al exceso de partículas de pequeño tamaño, solamente del 5 al 10% de humo de sílice condensado es usualmente suficiente.

Similarmente, para mejorar la homogeneidad en la microestructura del concreto endurecido, es esencial el usar una baja relación agua/cemento para obtener una dispersión adecuada de los materiales cementantes en una mezcla de concreto fresco. Los aditivos reductores de agua se usan comúnmente para éste propósito. Los lignosulfatos son un tipo de agentes reductores de agua, los cuales se originan de un producto industrial que contiene ciertas impurezas, las cuales, cuando están presentes en cantidades excesivas, originan un considerable aire incluido y causan un retardo en la mezcla de concreto fresco. Los superfluidificantes también son aditivos reductores de agua y son más recomendables porque no conducen a retardo excesivo y aire incluido.

Los aditivos inclusores de aire, son ahora invariablemente usados en las mezclas de concreto cuando se desea una resistencia al agrietamiento debida a los ciclos de congelamiento y deshielo. En concretos comunes (Con una relación agua/cemento de 0.4 o mayor), se recomienda aire incluido con un factor de espaciamento mínimo de 0.2 mm. Varios investigadores incluyendo a Malhotra (*Ref. 4*) han observado que es difícil lograr incluir aire con el factor de espaciamento mínimo requerido, cuando el contenido de humo de sílice es más del 20-30% por peso del contenido de cemento. Realizando pruebas en el laboratorio, Metha encontró que los concretos con aire incluido con más del 15% de humo de sílice resisten satisfactoriamente a los ciclos de congelamiento y deshielo. Pigeon (*Ref. 5*) reportó de pruebas realizadas en el laboratorio, que los concretos que contienen 9% de humo de sílice condensado y una relación agua/cemento igual a 0.3, muestran bastante presencia de agua congelable en los especímenes de baja relación agua/cemento a causa de los daños ocasionados por el congelamiento y deshielo, no así, en los especímenes realizados con aire incluido. Para contrarrestar la pérdida de aire cuando se agrega arena fina, puzolana o un superfluidificante a la mezcla del concreto, es esencial que el contenido de aire y el espaciamento entre los huecos se confirmen extrayendo corazones de concreto de la estructura realizada.

Tanto el ACI como la FIP previenen que cuando dos o más aditivos se usen, se deberá documentar la compatibilidad con los tipos de cemento y agregados que se utilizarán para fabricar el concreto. Además, para proteger al acero de refuerzo contra el ataque de la corrosión, no se deberá usar aditivos que contengan cloruros.

2.4 ESPECIFICACIONES PARA EL CONCRETO

Las especificaciones para el concreto estructural usualmente contienen un requisito de 28 días como mínimo para el esfuerzo a compresión, una relación agua/cemento permisible, un contenido mínimo de cemento y una consistencia mínima para la colocación y compactación de la mezcla de concreto fresco. Excepto para la resistencia ante el congelamiento y deshielo, los esfuerzos a 28 días son generalmente usados como un índice de la permeabilidad del concreto y de la durabilidad. Debido a la severidad del medio ambiente en agua de mar, los métodos y especificaciones de pruebas para la permeabilidad del concreto, deben tomar como guía las recomendaciones del ACI y de la FIP, ya que, éstas son las organizaciones que más tiempo han dedicado a la investigación del concreto en ambiente marino.

Las recomendaciones tanto del ACI como de la FIP requieren un contenido mínimo de cemento de aproximadamente 360 kg/m^3 , sin embargo, el primero recomienda un mínimo de cemento de 400 kg/m^3 para la mezcla de concreto en zona de marea. El uso de concretos con alto contenido de cemento en estructuras masivas frecuentemente conducen a un agrietamiento térmico, lo cual trae como consecuencia un incremento en la permeabilidad y por consiguiente una reducción en la durabilidad. Este tipo de problemas fueron notados en los años setentas, por lo que, para las construcciones posteriores se limitó el contenido de cemento a 380 kg/m^3 . A pesar del bajo contenido de cemento, la resistencia en el concreto se puede mejorar con el uso de un cemento más fino, un agregado de menor tamaño y usando algún superfluidificante.

Una observación relevante es que, para evitar el agrietamiento térmico se deben tomar medidas adecuadas para controlar los gradientes de temperatura en el concreto. Por lo tanto, la selección adecuada de los materiales y el proporcionamiento de la mezcla, implican que la industria de la construcción ponga mayor énfasis en la etapa anterior a la fabricación del mismo concreto (su primera etapa de nacimiento), para así poder lograr estructuras de concreto durables. Al respecto, Metha menciona:

“En la profesión médica es muy reconocido que para desarrollarse sanamente una persona, un nacimiento de un bebe requiere de atención especial durante su primera etapa de crecimiento. Algo similar se debe aplicar al concreto. Los especialistas en concreto coinciden en que las deficiencias durante los trabajos con el concreto fresco (Pérdida de trabajabilidad en la colocación o antes de la colocación, segregación y sangrado durante la compactación y además de las velocidades anormales que se puedan presentar durante la colocación y endurecimiento) pueden dañar a un concreto permanentemente y reducir su vida de servicio”.

2.4.1 Proporcionamiento

El objetivo de diseñar una mezcla de concreto consiste en determinar la combinación más práctica y económica de los materiales con los que se dispone, para producir un concreto que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo las condiciones particulares de uso. Para lograr tal objetivo, una mezcla de concreto bien proporcionada deberá poseer las siguientes propiedades:

1. En el concreto fresco, *trabajabilidad aceptable*
2. En el concreto endurecido, *durabilidad, resistencia y presentación uniforme*
3. *Economía*

El entendimiento de los principios básicos del diseño de mezclas es tan importante como la realización de los cálculos mismos. Por lo que, para poder obtener las propiedades anteriores al producir un concreto, se requerirá de una selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla, así como con un proporcionamiento adecuado.

Los métodos y secuencia de dosificación deben dirigirse hacia la producción de una mezcla de concreto que sea tan homogénea como sea posible. Por ejemplo, las partículas del cemento así como también las partículas de otros materiales, tales como el humo de sílice condensado, pueden ser mezclados a una elevada velocidad antes de que los agregados sean añadidos, mediante un aditivo fluidificante. Por otra parte, si el agregado fino se encuentra seco, una parte del agua de la mezcla puede ser usada para humedecerlo antes de agregar el material a el mezclador de concreto.

Antes de efectuar el proporcionamiento de una mezcla, se seleccionan sus características en base al uso que se propone dar al concreto, a las condiciones de exposición, al tamaño y forma de los miembros y a las propiedades físicas del concreto (tales como la resistencia) que se requieran para la estructura. Una vez que estas características se han elegido, la mezcla se puede proporcionar a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayor parte de las propiedades que se busca obtener en el concreto endurecido, dependen fundamentalmente de la calidad de la pasta de cemento, el primer paso para proporcionar una mezcla de concreto es la selección de una relación agua/cemento acorde con la durabilidad y resistencia requerida. Las mezclas de concreto deberán mantenerse lo más sencillas posibles, pues un número excesivo de ingredientes, a menudo provocan que la mezcla de concreto sea difícil de controlar.

2.4.2 Mezclado y transportación

Todo concreto se debe mezclar completamente hasta que sea uniforme en apariencia, con todos sus ingredientes, distribuidos equitativamente. Los mezcladores no deben ser cargados por encima de sus capacidades evaluadas y deberán ser operados aproximadamente a la misma velocidad para la cual fueron diseñados. Se podrá aumentar la salida con el uso de un mezclador mayor o con mezcladores adicionales en lugar de acelerar o sobrecargar el equipo con que se cuenta. Si las espas del mezclador se han desgastado o se han recubierto de concreto endurecido, la acción de mezclado será menos eficiente. Se deben reemplazar las espas muy desgastadas y el concreto endurecido deberá ser removido periódicamente, de preferencia después de cada día de producción de concreto.

Si el concreto ha sido mezclado adecuadamente, las muestras que se tomen de distintas porciones de una mezcla tendrán los mismos pesos volumétricos, contenidos de aire, revenimientos, y contenidos de agregado grueso.

Los concretos ligeros estructurales se pueden mezclar de la misma manera que los concretos de peso normal, cuando los agregados tengan menos de 10% de absorción total en peso o cuando la absorción en peso sea menor de 2% durante la primera hora después de haber sido sumergidos en agua.

El concreto fresco que se deja agitar en el tambor mezclador tiende a rigidizarse antes de que se desarrolle el fraguado inicial. Tal concreto se puede utilizar si al remezclarlo se vuelve lo suficientemente plástico para ser compactado en las cimbras. Además de que,

bajo una supervisión cuidadosa, se puede agregar una pequeña cantidad de agua siempre y cuando se cumpla con las especificaciones siguientes:

1. No exceder la relación agua/cemento máxima permisible
2. No rebasar el revenimiento máximo permisible
3. No sobrepasar el tiempo máximo de mezclado y de agitación
4. Que se remezcle el concreto por al menos la mitad del tiempo de mezclado mínimo requerido.

Se puede esperar que el concreto remezclado endurezca rápidamente y eventualmente se podría desarrollar una junta fría al colocar concreto de manera adyacente o por encima del concreto remezclado (*Ref. 11*).

El concreto mezclado puede ser transportado por un medio adecuado para su posterior colocación en sitio, sin embargo es importante que la homogeneidad de la mezcla fresca no sea afectada adversamente durante su transportación. De acuerdo con *Gerwick (Ref. 8)*, para camiones de mezclado rápido, la continua agitación de la cantidad total recibida, deberá ser asegurada. Esto significa que las aspas del camión deben ser frecuentemente checadas, ya que el uso que se les da es muy frecuente. Aunque no existe una forma perfecta para transportar y manejar el concreto, una planeación anticipada puede ayudar a elegir el método más adecuado, evitando así la ocurrencia de problemas posteriores. La planeación deberá tener en consideración tres eventos que, en caso que sucedan durante el manejo y la colocación, podrían afectar seriamente la calidad del trabajo terminado:

1. **Retrasos.** Se logrará una productividad máxima si se planea el trabajo para aprovechar al máximo al personal y al equipo y si se elige el equipo de manera que se reduzca el tiempo de retraso durante la colocación del concreto.
2. **Endurecimiento temprano y secado.** El concreto comienza a endurecer en el momento en que se mezcla el cemento con el agua, pero el grado de endurecimiento que ocurre durante los primeros 30 min normalmente no presenta problemas; por lo general, el concreto que se haya mantenido en agitación se puede colocar y compactar durante la primera hora y media posterior al mezclado.
3. **Segregación.** La segregación es la tendencia que presenta el agregado grueso a separarse del mortero cemento-arena. Esto tiene como consecuencia que parte de la mezcla tenga una cantidad demasiado pequeña de agregado grueso y que el resto tenga agregado grueso en cantidades excesivas. Lo anterior puede traer como consecuencia, que la primera parte sufra de contracciones y agrietamiento mayores y por lo tanto ofrecerá una baja resistencia a la abrasión (*Ref. 11*).

2.4.3 Colocación

El concreto deberá depositarse sin interrupciones lo más cerca posible de su posición final. En la construcción de losas, el colado deberá comenzar a lo largo del perímetro en un extremo del trabajo descargando cada mezcla contra el concreto previamente colado. No se deberá voltear el concreto en pilas separadas para luego nivelarlo y trabajarlo simultáneamente; tampoco deberá colocarse en pilas corridas para moverlo horizontalmente a su posición final. Se debe tomar en cuenta lo anterior ya que dichos procesos constructivos producen la segregación del concreto, debido a que el mortero tiende a fluir antes que el material más grueso.

En general el concreto deberá colarse en capas horizontales de espesor uniforme, consolidando adecuadamente cada capa antes de colar la siguiente. La velocidad de colocación deberá ser lo suficientemente rápida para que la capa de concreto no haya fraguado cuando se le coloque encima la nueva capa. Esto evitará recorridos de filtración, fisuras y planos de debilidad (juntas frías) que se producen cuando el concreto fresco se cuela sobre el concreto endurecido.

A fin de evitar la segregación, el concreto no deberá moverse horizontalmente a través de una distancia demasiado larga mientras se esté colando en cimbras o en losas.

En muros, cadenas y trabes, las primeras entregas de concreto se deberán colocar en los extremos, con los colados subsecuentes avanzando hacia el centro; en todos los casos se deberá impedir que el agua se acumule en los extremos, en las esquinas, y a lo largo de las caras de las cimbras.

Cuando el concreto es colocado por medio de bombeo y las presiones del mismo son excesivas, una parte del agua de la mezcla puede ser pérdida debido a la absorción en los agregados. Esto puede conducir a la pérdida de compactación y a problemas asociados, tales como una pobre compactación y defectos en el acabado. Cierta cantidad de aire incluido también se puede perder durante el bombeo. Aunque, con agregados de tamaño máximo igual a 20 mm el ACI requiere un mínimo de 6% de aire incluido en exposiciones severas de congelamiento-deshielo, *Moksnes (Ref. 7)* encontró (En corazones simples de concreto endurecido), que la cantidad de aire de 3 a 5% con un factor de espaciado de 0.25 mm es adecuado para la durabilidad de mezclas de concreto fabricadas con una relación agua/cemento baja, con humo de sílice y aditivo superfluídificante.

El uso de canalones, evita la segregación y el salpicamiento de mortero sobre el refuerzo y las cimbras, y al respecto se considera que no es necesario fijar límites de altura de caída libre del concreto a no ser que ocurra una separación de partículas gruesas, produciendo apanalamientos, en cuyo caso probablemente será adecuado marcar un límite de 0.90 a 1.20m.

Cuando se vuelan concretos a través de aberturas denominadas ventanas, a los lados de cimbras altas y estrechas, se recomienda utilizar un embudo recolector afuera de la abertura para permitir el flujo más suave del concreto a través de la abertura, disminuyendo así la tendencia a la segregación. Es buen hábito sobrellenar la cimbra unos 2 o 3 cm y retirar el exceso de concreto luego que ha endurecido y que el sangrado ha cesado.

Para evitar agrietamientos se deberá permitir que el concreto en columnas y muros permanezca 2h como mínimo, y de preferencia toda la noche, antes de continuar con el colado de cualquier losa, cerramiento o trabe que los enmarque. Las ménsulas y los capiteles de las columnas se consideran parte del piso, o de la losa de techo y deberán colarse íntegramente con las losas.

2.4.4 Compactación

Es un proceso que le sigue a la colocación, es necesaria una adecuada compactación para lograr una distribución uniforme de los sólidos, agua y aire presente en la mezcla de concreto. La aplicación de un vibrador en la colocación de un concreto fresco causa un rompimiento en el apilamiento mecánico, reduce los huecos de aire atrapado, y produce un exceso de agua en la superficie donde se pierde por evaporación.

Cuando se comenzaron a utilizar los superfluidificantes, se cometió un gran error al decir que en su utilización la compactación se hacía innecesaria. Sin embargo, las mezclas de concreto con superfluidificante de alta compactación tienden a requerir de menor vibrado, estas mezclas no fluirán adecuadamente cuando sean colocados en áreas de gran congestionamiento de acero de refuerzo. Se ha encontrado que, sin compactación, el concreto reforzado muestra una tendencia a atrapar aire de 3 a 5%, una reducción en la fuerza de adherencia y una formación de grietas alrededor del acero de refuerzo. En otras palabras, aún los concretos superfluidificados deberán ser vibrados. Sin embargo, en concretos superfluidificados el radio de acción de un vibrador interno es de 20 a 30% más grande que para los concretos ordinarios de consistencia plástica y por lo tanto el tiempo de vibración puede ser reducido.

Puesto que son indeseables las imperfecciones en el concreto, es preferible el *sobrevibrado* que una baja compactación. La sobrecompactación en el punto de inicio de la segregación da como resultado una mejoría en las propiedades del concreto, tales como una mayor resistencia a la compresión y menor permeabilidad a los iones de cloruro.

Finalmente, para asegurar una baja permeabilidad en la mezcla de concreto la cual tiene un sangrado durante su compactación, se recomienda alguna *revibración*. Particularmente en mezclas de concreto con alta relación agua/cemento se ha observado que cuando el agua se separa de la mezcla de concreto durante el proceso de sangrado, deja atrás microcapilares, y es en esta etapa cuando la revibración ofrece la oportunidad de romper esos microcapilares.

En el reporte del Comité del ACI 309 se incluye la información respecto al uso de muchos aspectos de la compactación del concreto incluyendo las imperfecciones, poco vibrado, sobrevibrado y revibración.

2.4.5 Acabado de la superficie

Aún en estructuras masivas, es importante que se les proporcione al concreto un acabado liso sin defectos y libre de huecos en la superficie para así de esta manera evitar la permeabilidad de la capa superficial, la cual, funciona como una primera línea de defensa en contra el ingreso del agua y fluidos agresivos.

La resistencia del concreto a la abrasión está muy influenciada por la estructura de los poros de la matriz del cemento en la zona superficial. Además, la estructura de los poros está influenciada por las diferencias entre la relación agua/cemento y los procedimientos de acabado en la superficie, la cual finalmente afecta a la resistencia a la abrasión del concreto (Ref. 9).

Las mezclas de concreto con alto contenido de cemento y especialmente aquellos que contienen humo de sílice condensado, tienden a ser viscosos y difíciles para darles un acabado. En tales casos se recomienda utilizar un vibrador especial para obtener una superficie lisa e impermeable.

2.4.6 Curado

El curado del concreto consiste en mantener un contenido satisfactorio de humedad y temperatura en la mezcla durante un período definido inmediatamente después del colado, para que puedan así desarrollarse las propiedades deseadas. Aunque en la práctica la pasta de concreto no se hidrata al 100%, el curado tiene por objeto aumentar la hidratación al máximo dentro de los límites económicamente viables.

Para relaciones agua-cemento de 0.42 ó mayores, la mezcla teóricamente contiene suficiente agua para que la hidratación se lleve a cabo por completo sin la necesidad de agregar agua externamente. Sin embargo, en la práctica se pierde agua por evaporación o por absorción de agua por parte de los agregados, las cimbras o el terreno de apoyo. Una vez que la humedad relativa interior cae por debajo del 80% por cualquiera de los mecanismos anteriores, la hidratación se detiene y deja de existir un aumento en la resistencia del concreto.

Las normas indican que el concreto debe mantenerse húmedo por lo menos durante 7 días en el caso de cemento normal y tres días si se utiliza cemento de resistencia rápida. Estos lapsos se aumentarán adecuadamente si la temperatura desciende a menos de 5° C, para acelerar la adquisición de resistencia y reducir el tiempo de curado, se puede utilizar el curado con vapor a alta presión atmosférica, calor y humedad o algún otro proceso que sea aceptado. Cualquiera de los procesos de curado que se apliquen deben producir concretos

cuya durabilidad sea cuando menos el equivalente a la obtenida con curado en ambiente húmedo prescrito en el párrafo anterior.

Por ejemplo, para esta observación las recomendaciones de la FIP establecen que para climas fríos el concreto al momento de colocarse debe estar por lo menos a una temperatura de 5°C y deberá mantenerse sobre esa temperatura antes de que alcance una resistencia mínima de 50 kg/cm².

Por otra parte, la temperatura podrá aumentarse calentando el agua de la mezcla y/o los agregados, sin embargo, no se le debe permitir al cemento que llegue a estar en contacto con el agua a una temperatura mayor de 60°C. Además, para asegurar una durabilidad mayor, la superficie del concreto debe estar continuamente cubierta con agua fresca. El agua de mar no deberá ser usada para el curado inicial en el concreto reforzado o presforzado.

Cuando se tiene duda acerca de la capacidad para mantener la superficie del concreto constantemente húmeda para el periodo completo de curado, o donde existe peligro de agrietamiento térmico debido a bajas temperaturas, se deberá usar una membrana para el curado y de esta manera poder sellar la superficie del concreto.

De acuerdo con *Gerwick (Ref. 8)* la mayoría de las mezclas de concreto que se utilizan para estructuras costeras, deben ser esencialmente impermeables; por lo que, el énfasis de hoy en día está principalmente enfocado al sello de la superficie contra la pérdida de humedad y no tanto sobre el proporcionamiento de agua externa durante el curado. Este investigador advierte sin embargo, que usando membranas para el curado, el calor del sol o el propio calor de la hidratación del cemento, pueden degradar a la composición del curado y por lo tanto se haría necesaria la aplicación de una ó más aplicaciones adicionales de las membranas durante el primer día.

2.4.7 Recubrimiento de concreto para el acero de refuerzo

Para las estructuras de concreto en agua de mar, con 0.5 m o más de espesor en los muros, el recubrimiento nominal de concreto para la protección del acero de refuerzo y los cables del presforzado esta directamente relacionado con la zona a la que está expuesta la estructura. Al respecto, tanto el ACI 357R como la FIP hacen recomendaciones similares. En la zona del concreto que se encuentra sumergida, se recomiendan 50 mm de espesor en el recubrimiento sobre el acero de refuerzo principal y 75 mm sobre cables presforzados. En la zona de marea y en la zona atmosférica (la cual está sujeta al rocío del agua de mar), el espesor del recubrimiento que se requiere es de 65 mm para el acero de refuerzo y 90 mm para el acero presforzado. Los estribos pueden tener 13 mm menos de recubrimiento en cuanto a los valores anteriormente recomendados.

Se ha observado que el ancho de las grietas que se van formando en la superficie del recubrimiento es directamente proporcional a la profundidad del recubrimiento. Por lo tanto, se considera que para las mezclas de concreto impermeable, no es necesario tener más de

50 mm de espesor en el recubrimiento para proteger al acero de refuerzo y al acero de presfuerzo, ya que, el recubrimiento proporcionado es realmente denso. Debido al problema de la interacción agrietamiento-corrosión, el ACI 224R-80 recomienda un ancho máximo de 0.15 mm en las grietas en la cara de tensión de la estructura de concreto reforzada sujeta a humedecimiento y secado o al rocío del agua de mar. La FIP recomienda que el ancho de las grietas en los puntos más cercanos al acero de refuerzo principal no excedan de 0.2 mm para espesores de recubrimiento de 50 mm ó 0.3 mm para espesores de 75 mm.

Mangat y Guruswamy (Ref. 10) realizaron pruebas de campo sobre la durabilidad del concreto reforzado con fibras de acero expuesto al ambiente marino, y encontraron que las concentraciones de cloruro en la vecindad de las grietas se incrementaba proporcionalmente con el ancho de las grietas, siendo un efecto significativo cuando se tenían arriba de 0.5 mm en el ancho de las grietas e insignificante con anchos 0.2 mm o menos.

2.4.8 Juntas

En estructuras de concreto reforzado y presforzado, se originan muchos problemas en cuanto a la durabilidad, debido a la filtración del agua através de la construcción de juntas.

Las juntas más comunes en las estructuras de concreto son:

JUNTAS DE AISLAMIENTO

Las juntas de aislamiento también conocidas como juntas de expansión, permiten movimientos horizontales y verticales en las partes adyacentes a la estructura.

El espesor del material de las juntas de aislamiento generalmente es de 12 mm, pero también puede utilizarse de un espesor menor o igual a 6mm. Cuando se utiliza en losas, se debe tener cuidado en que todos los bordes de la misma estén aislados de las construcciones adyacentes en todo su espesor; de otra manera, podrían ocurrir agrietamientos como consecuencia de los movimientos diferenciales.

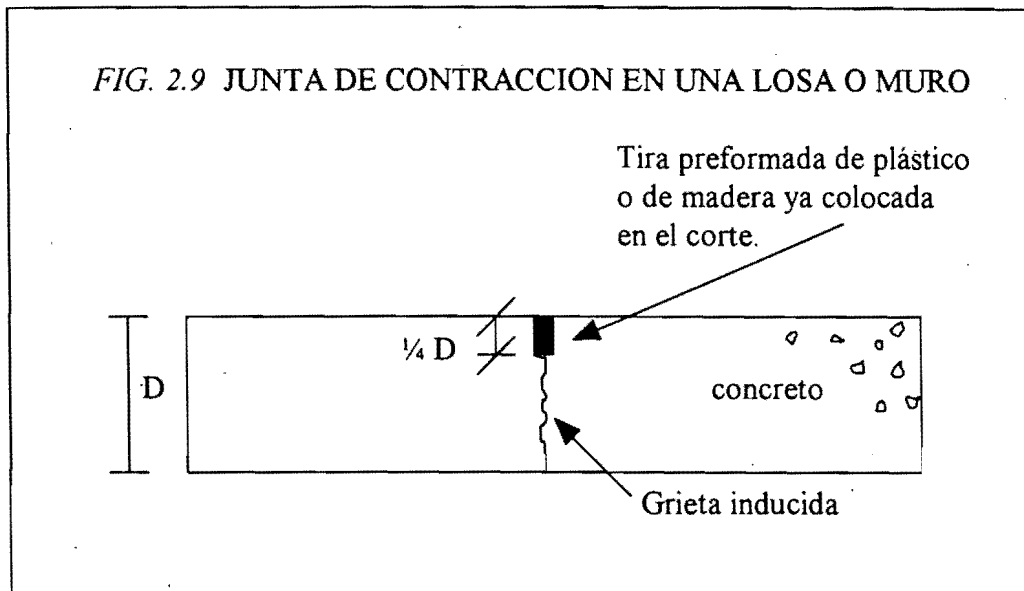
JUNTAS DE CONTRACCION

Este tipo de juntas (también conocidas como juntas de control) permiten el movimiento en el mismo plano de la losa o del muro e inducen el agrietamiento causado por la contracción por secado y térmica en los sitios preseleccionados. Las juntas de contracción permiten la transferencia de cargas perpendiculares al plano de la losa o del muro, ya que si no se dispone de éste tipo de juntas y el acero de refuerzo en la estructura es mínimo, ocurren agrietamientos aleatorios cuando la contracción por secado y la contracción por temperatura producen esfuerzos de tensión mayores a la resistencia del concreto.

Uno de los métodos más comunes para realizar juntas de contracción en las losas, consiste en aserrar una ranura recta continua en la parte superior de la losa; lo anterior forma un plano de debilidad en el cual se formará la grieta. Dicho aserradero debe sincronizarse con el tiempo de fraguado del concreto, es decir que los cortes deberán iniciar una vez que

el concreto haya endurecido lo suficiente para evitar que los agregados sean desalojados por la sierra y deberán terminarse antes de que los esfuerzos provocados por la contracción por secado sean tan grandes que lleguen a producir agrietamientos.

Las juntas de contracción en las losas pueden ser aserradas, ranuradas o preformadas y deberán realizarse hasta una profundidad igual a un cuarto del espesor (*ver fig. 2.9*).



Las juntas de contracción en los muros deberán ir colocadas en donde existan cambios abruptos de espesor o de altura, cerca de esquinas y de ser posible con espaciamientos máximos de 3 a 4m. El espaciamiento de las juntas de contracción para las losas dependerá principalmente de: a) el espesor de la losa, b) el potencial de contracción del concreto, c) la fricción con la subrasante, d) el medio ambiente y e) la ausencia o presencia de acero de refuerzo.

JUNTAS DE CONSTRUCCION

Son aquellos lugares en donde se da un paro durante el proceso de construcción y para que sean consideradas como verdaderas juntas de construcción deberán unir al concreto existente con el concreto nuevo de tal manera que no permitan algún movimiento. Como se requiere de cuidados adicionales para formar una verdadera junta de construcción, usualmente se les diseña y construye para que funcionen como juntas de contracción o de aislamiento y se les alinea con ellas, y por lo tanto pueden hacerse desligadas a propósito. Como materiales desligantes se pueden utilizar aceites, pinturas y agentes para separar cimbras.

Las juntas horizontales en los muros deberán hacerse rectas y colocarse en lugares adecuados; se pueden realizar clavando una tira de madera de 2.5 cm en la cara interior de la cimbra.

2.4.9 Control del agrietamiento termico

El agrietamiento térmico, probablemente es el principal factor que contribuye a la permeabilidad de un concreto de alta resistencia, cuando no se toman las medidas adecuadas en cuanto a la protección del concreto contra los esfuerzos por gradientes térmicos. De acuerdo con las recomendaciones de la FIP, cuando la dimensión mínima del elemento de concreto es mayor a los 60 cm y el contenido del cemento es mayor de 400 kg/m^3 , se deberá considerar el uso de un cemento con una liberación baja de calor de hidratación y otros métodos para reducir la elevación en la temperatura. Los métodos modernos para reducir el aumento de la temperatura y que de esta manera se controle el agrietamiento térmico, incluyen el uso de aditivos minerales para reemplazar una parte del cemento Portland en el concreto (por ejemplo con puzolanas), una reducción en la velocidad de colocación del concreto, preenfriamiento de los agregados usando hielo triturado para reemplazar una parte del total del agua de la mezcla o enfriando la mezcla de concreto fresco con nitrógeno líquido.

REFERENCIAS

1. **MIDGLEY, H. G.** and Illston, J. M.
The Penetration of Chlorides into Hydrated Cement Paste
Cement and Concrete Research
vol. 14
1984
p. 18 - 26

2. **MATHER, K.**
Concrete Weathering at Treat Island, Maine
ACI SP-65
1980
p. 101-112

3. **RASHEEDUZZAFAR, Dakhil F.**
Influence of Cement Composition and Content on the Corrosion Behavior of
Reinforcing Steel in Concrete.
ACI SP-100
1987
p. 1477-1502

4. **MALHOTRA, V.M.**
Mechanical Properties and Freeze-Thaw Resistance of Condensed Silica Fume
Concrete.
ACI SP-91 Vol. 2
1986
p. 1069-1094

5. **PIGEON M., GAGNE, R. and FAY C.**
Critical Air Void Spacing Factors for Low Water-Cement Ratio Concretes with
and without Condensed Silica Fume
Cement and Concrete Research, vol. 17
1987
p. 896-906

6. **GJORV, O. E.**
High Strength Concrete for Highway Pavimentes and Bridge Decks
Proc. Utilization of High Strength Concrete
Stavanger, Norway
1987
p. 111-122

7. **MOKSNES, J.**
Concrete Quality in Norwegian Offshore Structures
Proc. Conf. on High Strength Concrete
1987
p. 405-416
8. **GERWICK, B. C.**
Design of Offshore Concrete Structures
Ed. Wiley Interscience Publication
1986
9. **SADEGZADEH, M.**
Surface Microstructure and Abrasion Resistance of Concrete
Cement and Concrete Research, Vol. 17
1987
p. 581-590
10. **MANGAT, P. S. and Guruswamy, K.**
Chloride Diffusion in Steel Fiber Reinforced Marine Concrete
Cement and Concrete Research, vol. 17
1987
p. 385-406
11. **METHA, P. K.**
Concrete: Structure, Properties, and Materials
Ed. Prentice-Hall
1986
p. 159

CAPITULO 3

EVALUACION

3.1 OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA INSPECCION

Para llevar un estudio de patología o evaluación de una estructura, existen diferentes métodos y técnicas que coadyuvan a lograr un mejor esquema general de trabajo (*Ref. 1*).

La evaluación debe iniciarse a través de una inspección, con el propósito de proporcionar la información necesaria para conocer las condiciones (capacidad, seguridad, grado y velocidad del deterioro, etc.) de la estructura. Por lo tanto, la utilidad de las evaluaciones dependerá principalmente de que tan apropiadas sean, y de la manera en que sean registradas, para así poder utilizarlas en las evaluaciones de ingeniería. Cuando sea evidente el deterioro del concreto o se detecten riesgos en la estructura, los resultados de la evaluación serán utilizados para determinar las acciones pertinentes de reparación, para poder estimar la vida de servicio en el futuro o para saber si se requiere de rehabilitación o reemplazo (*Ref. 2*).

Una evaluación completa de las condiciones de una estructura deberá basarse en los siguientes factores:

1. DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA

- 1.1 Nombre, localización, tipo y tamaño
- 1.2 Cliente, proyectista, contratista (durante la etapa de construcción)
- 1.3 Consideraciones de diseño
- 1.4 Registros fotográficos
- 1.5 Planos de proyecto original y de modificaciones (en caso de existir)

2. CONDICIONES ACTUALES DE LA ESTRUCTURA

- 2.1 Asentamientos
- 2.2 Deflexiones
- 2.3 Expansiones
- 2.4 Contracciones
- 2.5 Elementos mostrando fallas
- 2.6 Condiciones superficiales del concreto
 - 2.6.1 Grietas
 - 2.6.2 Brotes
 - 2.6.3 Desprendimientos
 - 2.6.4 Delaminaciones
 - 2.6.5 Exposición del acero
- 2.7 Condiciones interiores del concreto
 - 2.7.1 Resistencia de corazones de concreto
 - 2.7.2 Densidad de los corazones de concreto
 - 2.7.3 Contenido de humedad
 - 2.7.8 Evidencias de reacciones álcali-agregado u otro tipo de reacciones
 - 2.7.9 Contenido de aire

3. NATURALEZA DEL TIPO DE CARGA Y ELEMENTOS PERJUDICIALES

3.1 Exposición

3.1.1 Medio ambiente

3.1.2 Clima

3.1.3 Ataque químico

3.1.4 Ataque mecánico (abrasión, cavitación o erosión)

3.2 Drenaje

3.3 Cargas

3.3.1 Muerta

3.3.2 Viva

3.3.3 Impacto

3.3.4 Vibración

3.3.5 Otras

3.4 Tipo de suelo

4. CONDICIONES ORIGINALES DE LA ESTRUCTURA

4.1 Condiciones de acabado de la superficie

4.2 Defectos estructurales tempranos en la estructura

5. MATERIALES UTILIZADOS PARA LA CONSTRUCCION

5.1 Cemento

5.2 Agregados

5.3 Agua

5.4 Aire

5.5 Aditivos

5.6 Concreto

5.6.1 Dosificación de las mezclas

5.6.2 Propiedades del concreto fresco

5.6.3 Acero de refuerzo

6. METODOS CONSTRUCTIVOS

6.1 Almacenamiento y procesamiento de los materiales

6.2 Cimbras

6.3 Manipulación del concreto

7. PROPIEDADES INICIALES DEL CONCRETO ENDURECIDO

7.1 Resistencia a la compresión, módulo de elasticidad

7.2 Densidad

7.3 Aire

7.4 Cambios de volumen

7.5 Propiedades térmicas

La evaluación de la condición de una estructura de concreto bajo el agua es mucho más compleja que la de una estructura sobre el nivel del agua. La razón de ello es que antes de que la estructura pueda ser evaluada y diagnosticada, se deberán obtener datos pertinentes y alguna otra información para poder realizar los trabajos de la manera más adecuada. Se requiere de que el personal que va a llevar a cabo la inspección de la estructura bajo el nivel del agua, tenga la experiencia y pericia necesaria para poder recolectar y registrar la información que se obtenga.

En este tipo de trabajos de inspección, existe el gran problema de que el personal que cuenta con los conocimientos técnicos suficientes para poder realizar una evaluación confiable, no siempre es quien realiza la inspección debido a que carece de un entrenamiento de buceo o no son ellos quienes controlan directamente los vehículos bajo el agua operados a control remoto. Por consiguiente, normalmente, las personas que realizan las inspecciones son buzos profesionales, sin criterio ingenieril, motivo por el cual, en la mayoría de los casos se obtiene información que no es 100% confiable.

Por lo anterior, se recomienda que en el caso de inspecciones de estructuras bajo el agua, el equipo técnico cuente con adiestramiento de buceo para poder realizar personalmente las inspecciones y el registro de datos bajo el agua.

Los objetivos generales de una inspección de las condiciones de una estructura de concreto, de acuerdo con la Sociedad Americana de Materiales y Pruebas (ASTM C 823) son:

- a)* Determinar la capacidad del concreto para trabajar satisfactoriamente ante las cargas para las cuales fue diseñado.
- b)* Identificar los materiales o procesos que causan peligro o fallas en la estructura.
- c)* Descubrir en el concreto las condiciones que causaron o contribuyeron a que trabajara eficientemente o que fallara.
- d)* Establecer los métodos para reparar o reemplazar el concreto deteriorado sin riesgo de que al hacerlo ocurran accidentes.
- e)* Lograr que se cumpla con los requisitos de las especificaciones de la construcción.
- f)* Conjuntar datos para ayudar a la conciliación de las responsabilidades legal y financiera, en caso de que los trabajos de reparación se realicen de forma insatisfactoria.
- g)* Para evaluar el funcionamiento de los componentes usados en el concreto.

En otras palabras, la inspección es realizada para determinar si la estructura bajo el agua satisface el criterio de diseño bajo las condiciones de servicio prevalecientes; y la capacidad de la estructura para funcionar satisfactoriamente en el futuro.

Una estructura de concreto bajo el agua podría ser completamente inspeccionada si se consiguiera deshumecerla. Pero este proceso no es siempre posible, y aún siendo técnicamente posible, resultaría demasiado caro.

La estructura bajo el agua debe ser evaluada tomando en cuenta su naturaleza específica, condiciones de servicio y con el completo conocimiento de las múltiples variables que se encuentran involucradas, algunas de las cuales no son precisamente conocidas (*ver fig. 3.1*).

Una inspección puede ser limitada únicamente a áreas aisladas que presenten deterioro, o también se puede llevar a cabo la investigación de todos aquellos riegos en general, tales como deflexiones excesivas o posibles colapsos de los miembros estructurales. Esto puede involucrar estudios de la dislocación de algunos de los elementos en la estructura o en la estructura completa. La investigación puede ser enfocada principalmente al estudio del concreto o también se pueden requerir de otro tipo de investigaciones, tales como condiciones de la cimentación, condiciones de servicio, trabajos de construcción y comparación con otras estructuras.

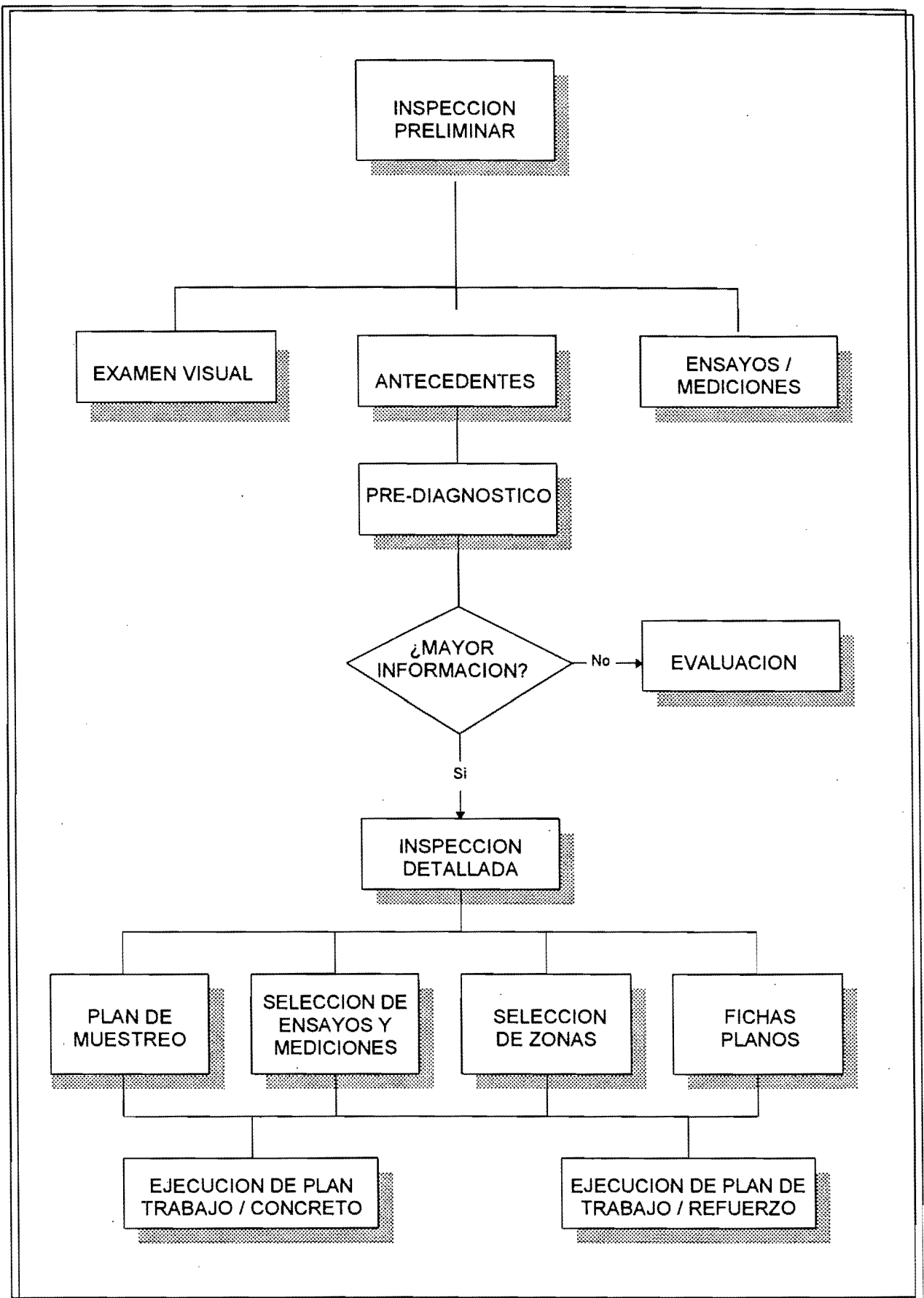


FIG. 3.1 Procedimiento general para la inspección de una obra.

3.2 NIVELES DE INSPECCION

Se reconocen tres niveles básicos de inspección, los cuales son distinguidos por los recursos y las necesidades de preparación para realizar los trabajos y el tipo de daño/defecto que es detectable:

3.2.1 Nivel I. Preinspeccion.

Este tipo de inspección no requiere de la limpieza de los elementos estructurales y puede, por lo tanto, ser efectuada mucho más rápidamente que los otros tipos de inspección. El propósito de la inspección en el nivel I, es confirmar la construcción en base a los planos estructurales, proporcionar los datos preliminares para la estrategia de la inspección y detectar los daños obvios.

3.2.2 Nivel II. Inspeccion bajo el agua.

Este tipo de inspección generalmente involucrará una limpieza preliminar o simultánea de la zona a estudiar en el elemento estructural. El propósito de la inspección del nivel II es detectar los daños superficiales que pueden estar ocultos por la flora marina (*ver. tabla 3.2*). Debido a que el proceso de limpieza hará de este tipo de inspección más tardado que el nivel I, este nivel generalmente estará restringido a las áreas críticas de la estructura.

3.2.3 Nivel III. Pruebas no destructivas y destructivas.

Este tipo de inspección será conducido para detectar el inicio de daños o fallas. Los requerimientos de preparación, limpieza y pruebas, variarán dependiendo del tipo de defecto/daño y del tipo de equipo utilizado para la inspección. En general, para este nivel de inspección, el equipo y los procedimientos de las pruebas serán más sofisticados y requerirán de mayor experiencia y capacitación que para los trabajos de inspección del nivel I y nivel II.

En la fase de la planeación se deberá decidir por el nivel de inspección a realizar para las diferentes tareas, aunque, en la mayoría de los casos quienes toman la decisión son las dependencias públicas u otro tipo de autoridades.

El tiempo y equipo requeridos para llevar a cabo los tres diferentes tipos de inspección son muy variables. Así tenemos que el tiempo requerido para un nivel en particular dependerá de varios factores entre los cuales podemos mencionar: la visibilidad, corrientes, la acción de las olas, profundidad del agua, cantidad de la flora marina, y de la habilidad y experiencia del personal. Por ejemplo, una estimación rápida de las condiciones en que se encuentra un elemento de concreto bajo el agua, requerirá de por lo menos 3 min para el nivel I, mientras que para el nivel II requerirá de un tiempo de 15 min aproximadamente.

Las siguientes figuras muestran la secuencia, el propósito de cada uno de los niveles de inspección y el tipo de daño que se puede localizar.

TABLA 3.2 DIFERENTES TIPOS DE DAÑOS QUE SON DETECTABLES PARA CADA NIVEL DE INSPECCION

NIVEL	PROPOSITO	DAÑO DETECTABLE
I	Confirma las condiciones de la construcción y detecta los daños severos	Daños severos (Congelamiento y deshielo, erosión, cavitación)
II	Detecta los defectos superficiales normalmente oscurecidos por la flora marina, sedimento u otros desechos.	Agrietamiento superficial. Degradación del concreto debido a la acción de los sulfatos. Severa corrosión del acero Desconchamiento de la superficie del concreto.
III	Detecta daños ocultos y daños que están apareciendo.	Localización de las varillas. Corrosión temprana de las varillas. Huecos internos. Cambios en la resistencia del material.

3.3 PREINSPECCION

3.3.1 Información antecedente de la estructura.

La planeación, funcionamiento adecuado y evaluación de los reportes de la inspección no pueden ser realizados sin el conocimiento de las consideraciones tomadas en el diseño, construcción, operación y mantenimiento de la estructura en cuestión. La recolección de toda esta información antecedente puede ser muy difícil de lograr porque alguna información puede estar dispersada, puede no estar disponible, o quizá puede no existir.

Las fuentes de la información antecedente pueden ser:

- Oficinas administrativas
- Compañías (Encargadas del diseño o construcción)
- Individuales (Clientes, operadores, inspectores, ingenieros residentes)
- Periódicos y revistas.

El tipo de información que se debe buscar es la siguiente:

- Información geológica y geotécnica
- Información sobre las consideraciones de diseño
- Información sobre el concreto. Calidad y cantidad de los materiales con los cuales el concreto fue fabricado. Datos sobre el tipo de mezclado y transporte del concreto, así como del control de la calidad.
- Datos de los análisis. Condiciones de carga asumidas, análisis de esfuerzos y estabilidad, estudios relacionados con la cimentación.
- Información acerca de la operación. Nivel del agua, presencia de hielo u otras temperaturas extremas, presencia de cargas de impacto, incremento en las cargas estructurales y algún otro cambio que haya ocurrido durante el proceso de operación.
- Información respecto al mantenimiento y reparación. Datos, localizaciones, tipo y grado de mantenimiento, materiales y técnicas de reparación.

Los reportes de rutinas y períodos de inspección, los reportes de las condiciones de servicio, y los registros de instrumentaciones, son fuentes adicionales de información antecedente que puede ser de gran utilidad en la inspección y evaluación del concreto bajo el agua (ver fig. 3.3).

FICHA DE ANTECEDENTES

ESTUDIO: Monitoreo de la corrosión en estructuras de concreto reforzado en el Puerto de Progreso, Yuc.

OBRA: Centro de Estudios Técnicos del Mar (CETMAR)

FECHA: jun-96

LUGAR: Progreso, Yucatán.

A) DATOS GENERALES DE LA ESTRUCTURA:

LOCALIZACIÓN: Carretera a P. De Abrigo s/n.
ORIENTACIÓN: Vigas en voladizo N-S, trabes E-O

TIPOS DE OBRA: Plataforma marina.

TIPO DE ESTRUCTURA: Concreto reforzado

B) DATOS ESPECÍFICOS DE LA ESTRUCTURA:

Características del concreto:		Características del acero de refuerzo:	
Dosificación Cemento:	No disponible	Grado:	42
Arena:	No disponible	Resistencia a la fluencia	4200 kg/cm ²
Agua:	No disponible	Tipo de recubrimiento:	no disponible
Grava:	No disponible		
Tipo de cemento:	Tipo I	Detalles constructivos	Plano No:
Resistencia a la compresión		cimentación	715-I
a los 28 días (f'c):	250 kg/cm ²	columnas	715-I
Relación a/c:	no disponible	trabes	715-2
		losas	715-2
Reglamento usado:	NTCC-77 RDF		
concreto fabricado en:	obra		

C) HISTORIAL DE SU VIDA DE SERVICIO:

Edad de la estructura: 8 años.

Mantenimiento dado: pintura

Reparaciones previas: reparación de concretos en las partes dañadas.

En algunas columnas se pintó el refuerzo con pintura antioxidante.

D) DATOS DEL MEDIO:

Tipo de atmósfera: marina
Temperatura ambiente: 26.1°C
Humedad relativa: 79%
Precipitación pluvial: 468 mm anual
Tipo de suelo: friccionante (arena de playa)
Tipo de agua: agua de mar con alta salinidad
Agentes agresivos en el ambiente: cloruros y sulfatos

FIG. 3.3 Modelo de ficha de antecedentes de la estructura para la inspección preliminar

3.3.2 Inspeccion visual general

La inspección visual es invariablemente la primera prueba que es aplicada en una evaluación bajo el agua (nivel I de inspección). El propósito de ello es confirmar las condiciones en que se encuentra la construcción y detectar los daños severos en los elementos estructurales (*ver tabla 3.4 "tipos de daños"*). En ciertos casos, esto puede ser realizado desde la superficie del agua utilizando algún periscopio con extensión que permita la observación a través del agua. Sin embargo, existen muchas limitaciones con esta técnica de inspección, ya que muchos defectos no se pueden percibir con la simple observación de la superficie de la estructura. Por otra parte, también pueden existir limitaciones a causa de:

- a) la suciedad espesa causada por los organismos marinos, los cuales pueden oscurecer los defectos superficiales que no se encuentran limpios;
- b) la poca visibilidad causada por las aguas turbias;
- c) la presencia de corrientes fuertes que puedan complicar los trabajos del buzo y
- d) las condiciones ambientales como la temperatura, ya que en caso de estar muy fría el agua, el buzo no podrá concentrarse en sus tareas.

Cuando el buzo se auxilia con luz artificial, se recomienda colocar las luces a 45° con respecto al eje de la cámara y así evitar la refracción de la luz. Las lámparas con yoduro de cuarzo y yoduro de talio ayudan a mejorar la visibilidad.

Se debe tener presente que la inspección visual es únicamente cualitativa y que no proporciona información acerca de la resistencia del concreto (*ver figs. 3.5.A y 3.5.B*).

Las herramientas que son indispensables para las tareas de inspección visual son: martillos, picos, barras de acero, lámparas y sistema de vídeo. También se recomienda contar con una pizarra especial para que el buzo pueda realizar anotaciones bajo el agua.

3.3.3 Planeacion de la inspeccion

Una vez que la información acerca de la estructura ha sido recabada y evaluada, se deberá iniciar con el desarrollo de un plan de inspección. La complejidad de la inspección y evaluación de las estructuras bajo el agua, requiere de una planeación cuidadosa de las actividades que intervienen en el proyecto. El éxito de una inspección depende en gran medida de la selección de las diferentes áreas a evaluar (*ver fig. 3.6*). Por lo tanto, también es importante el seleccionar un número suficiente de áreas para proporcionar una información representativa de la estructura en su totalidad. La realización de ésta selección requiere de un entendimiento de las condiciones que rodean a la estructura y del análisis estructural para así poder determinar cuales áreas están sujetas a esfuerzos máximos, fatiga, y fuerzas de impacto. También es deseable que se tengan conocimientos de la teoría del deterioro y daño de las estructuras de concreto. Consecuentemente, el plan de inspección deberá ser preparado en cooperación con ingenieros capacitados y que estén familiarizados con la estructura en estudio. El plan de inspección deberá incluir la identificación del equipo de inspección más apropiado para poder realizar el trabajo de la manera más adecuada en cada una de las tareas.

Clasificación de daños en las estructuras				
Código	Daño	Descripción	Causa	Detalles proporcionados en inspección
A1	Agrietamiento (general)	Separaciones irregulares del concreto sin formación de modelos o patrones	Sobrecarga, corrosión, contracciones	Dirección, ancho y profundidad de las grietas
A2	Patrón de agrietamiento	Como el anterior sólo que estos siguen un patrón (una dirección ya sea perpendicular o paralela al refuerzo)	Cambios diferenciales de volumen entre el concreto interno y externo	Área de la superficie dañada y ancho de las grietas
B1	Exudación	Material de tipo viscoso que va exudando a través de los poros del concreto	Reacción álcali en el agregado	Severidad
B2	Incrustación	Cubierta blanca en la superficie del concreto	Lixiviación de la cal del cemento	Severidad del daño y presencia de humedad
B3	Manchas de óxido	Manchas de color café	Corrosión del refuerzo o de alambres pegados a la superficie	Severidad
B4	Humedad	Agua acumulada en la superficie	Filtraciones, depósitos	Severidad
C1	Brotos (pop-out)	Depresiones superficiales y cónicas	Desarrollo de presiones internas, por ej. Por la corrosión del refuerzo o por fuerzas externas	Área y profundidad dañada
C2	Desprendimientos (spall)	Fragmentos separados de una masa considerable de concreto	Inducción de esfuerzos, por ej. Por la corrosión del refuerzo o por fuerzas externas	Área y profundidad
C3	Delaminaciones	Esquirlas delgadas	Formación de esfuerzos internos sobre un área grande	Área y profundidad
C4	Intemperismo	Pérdida de la superficie del concreto	Acción del medio ambiente, despoja el acabado y la pasta de la superficie	Ancho y profundidad de los defectos
D1	Alveolado (panal de abeja)	Vacios entre el agregado grueso	Falta de vibración	Ancho y profundidad de los vacíos
E1	Juntas de construcción	Línea en la superficie del concreto, puede ser biselado o de apariencia porosa	Juntas entre dos colados	Cualquier deterioro asociado a éstas
E2	Juntas de tablero	Ranuras en la superficie del concreto	Marcas formadas para evitar agrietamientos por contracciones en los tableros	Cualquier deterioro asociado a éstas

FIG. 3.4 CLASIFICACION DE DAÑOS EN LAS ESTRUCTURAS

INSPECCION VISUAL GENERAL DE LA ESTRUCTURA

FECHA DE INSPECCION: JULIO DE 1994

TIPO DE ESTRUCTURA: CONCRETO REFORZADO EDAD: 8 ANOS

UBICACION: FRENTE AL MAR PROGRESO, YUC. AMBIENTE: TROPICAL-
MARINO

ORIENTACION: EDIFICIOS CON MIRA AL NORTE

B) REGISTRO FOTOGRAFICO

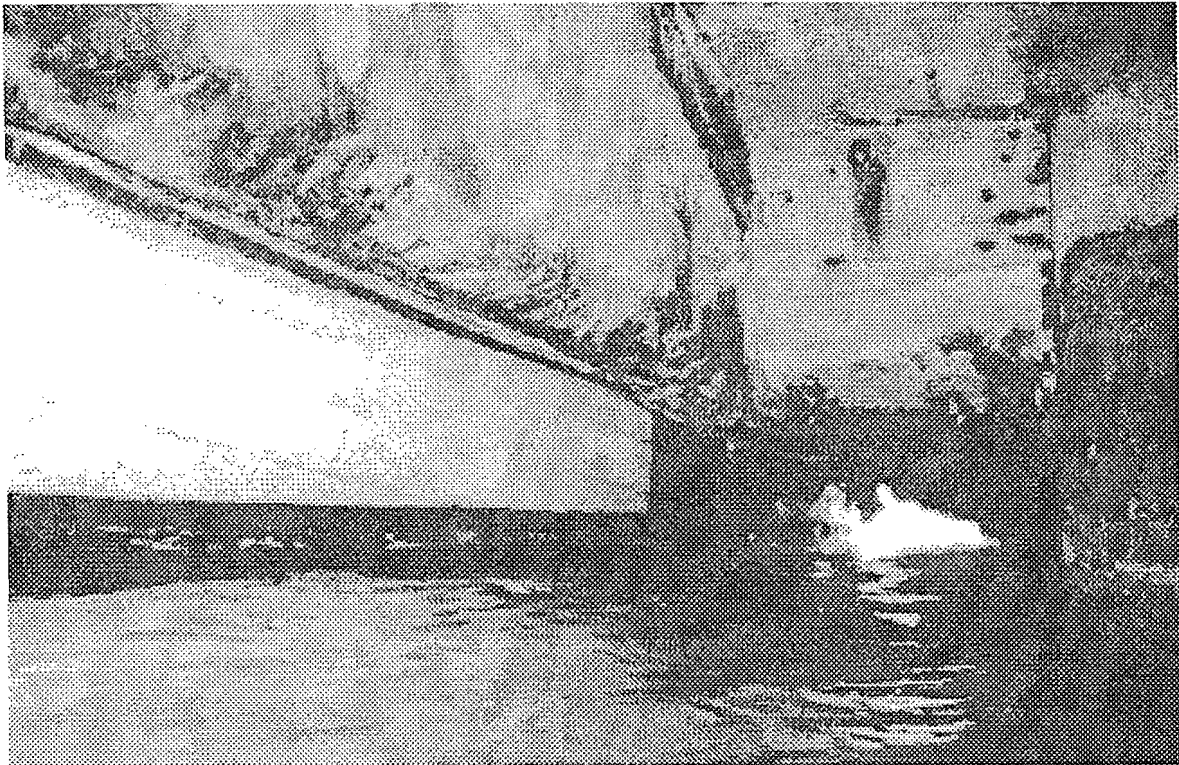


FIG. 3.5.A Formato de la inspección preliminar de la estructura.

B) EXTENSIÓN Y GRAVEDAD DE LOS DAÑOS.

- 1) Agrietamiento y desprendimiento de concreto acompañados de corrosión del acero de refuerzo en la parte inferior de las columnas y cimentación. Los agrietamientos siguen un patrón definido en sentido del refuerzo longitudinal (A2). Daños severos como consecuencia de desprendimientos puntuales (C2) y delaminaciones (C3).
- 2) Manchas de óxidos sin agrietamiento en zonas muy húmedas como cimentación y pisos. Daños estructurales probables.
- 3) Intemperismo (C4) y vacíos entre agregados (D1) por falta de vibración en concretos de pisos y columnas. Facilita la entrada de agentes agresivos.

C) ENSAYOS MÍNIMOS A REALIZAR

ENSAYO	LUGAR	RESULTADO
Determinación de cloruros/sulfatos:	Base de columnas a nivel superficial y del acero de refuerzo	Cs=4 kg/m ³ de concreto Cb=4 kg/m ³ de concreto Cs = concentración superficial Cb = concentración en la barra
Profundidad de carbonatación:	ceja perimetral	concretos superficiales carbonatados hasta aprox. 1 cm de profundidad.
Espesor de recubrimiento:	en columnas en vigas	3 a 4 cm 3 cm

D) PREDIAGNÓSTICO:

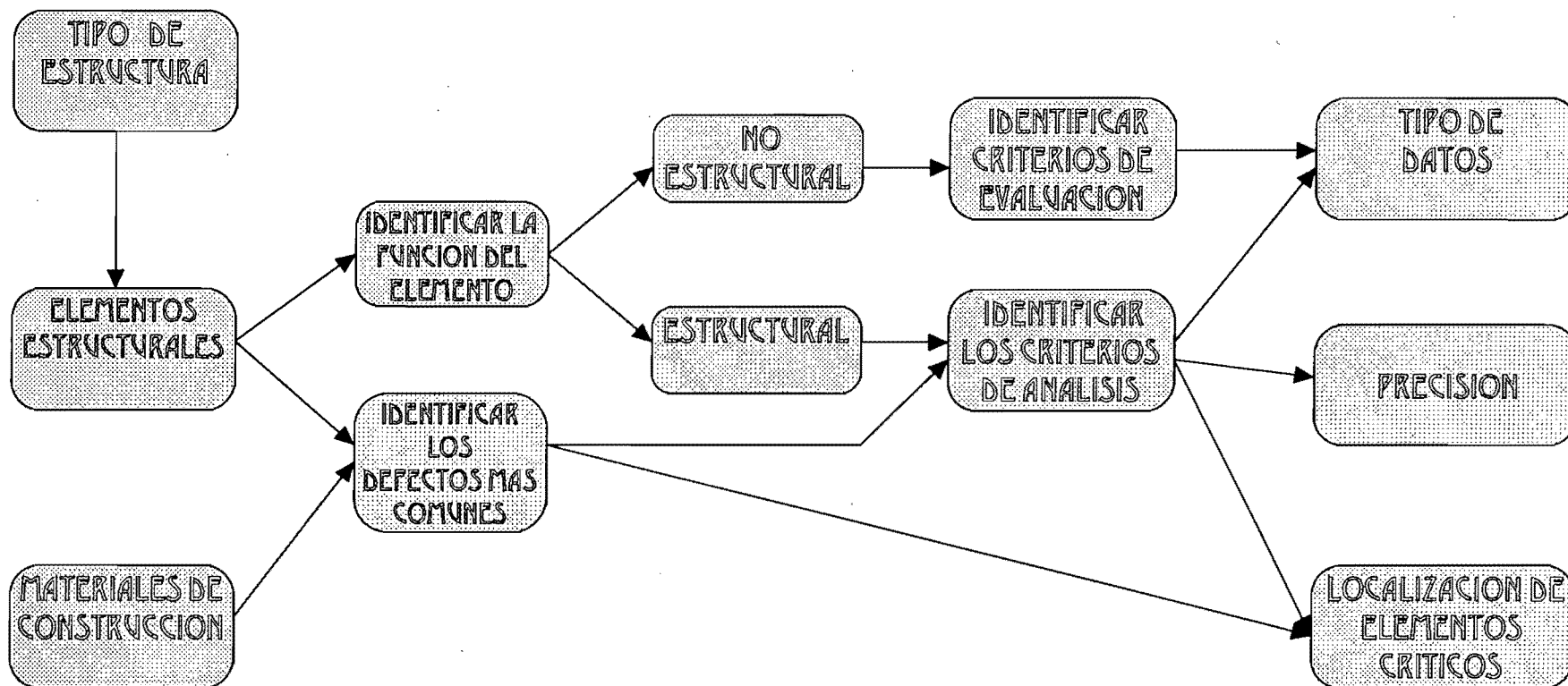
De acuerdo con la inspección visual de los daños, a la tipificación de los mismos y al resultado de algunos ensayos, se estima que la estructura está deteriorándose por la acción de cloruros que están accediendo al acero de refuerzo en tres formas:

- a) a través del suelo desde la cimentación.
- b) a través del techo por el aerosol marino que se cuele por las grietas.
- c) a través de la superficie de las columnas y trabes.

Los mecanismos que intervienen en la degradación de la estructura aún no se aprecian en esta etapa.

FIG. 3.5.B Formato de la inspección preliminar de la estructura.

FIG. 3.6 PROCEDIMIENTO PARA DEFINIR LA OBTENCION DE DATOS EN LA INSPECCION



Muchos problemas están asociados con el mantenimiento inadecuado que se le proporciona a la subestructura que se encuentra localizada bajo el agua, ya que en la mayoría de los casos es muy difícil el acceso a estas zonas. Por tal motivo, tan pronto como se detecte un deterioro en una subestructura, se deberán determinar las causas que originan el problema. La deficiencia en la determinación de las causas o en los procesos de deterioro pueden conducir a un proceso de reparación inadecuado y costoso. Además, si no se reparan a tiempo las grietas, desconchamientos, huecos, o el recubrimiento inadecuado del refuerzo en el concreto, pueden transformarse en problemas mayores con el paso del tiempo. Para poder implementar y asegurar un adecuado programa de mantenimiento para las estructuras bajo el agua, es esencial que se realicen inspecciones periódicas bajo el agua.

Las inspecciones bajo el agua deben ser realizadas durante la fase de construcción y al final de la misma, para que de esta manera se detecten las posibles fallas y puedan ser corregidas en el momento, ya que si se deja pasar el tiempo, dichas fallas pueden ir aumentando de magnitud y convertirse en un riesgo para la estructura. Para tal efecto, se recomienda contratar a una agencia confiable y con la capacidad de poder realizar las inspecciones bajo el agua, y así de esta manera llevar a cabo la construcción con alta calidad. El objeto de realizar inspecciones cuando se ha terminado la construcción, es el contar con datos que permitan determinar el grado de cumplimiento con las especificaciones y detalles marcados en el proyecto, y además contar con una guía de inspección para inspecciones futuras. Las inspecciones bajo el agua deberán ser programadas en períodos del año durante los cuales las condiciones de tiempo sean las más favorables, tales como períodos de bajo nivel de agua, bajos niveles de contaminación, mínima cantidad de hielo o buena visibilidad bajo el agua. La frecuencia de las inspecciones bajo el agua varían desde 1 hasta 5 años.

La siguiente lista contiene varios pasos que deben ser tomados en cuenta durante la etapa de planeación:

- a) Entrevistarse con el cliente para definir claramente el problema.
- b) Determinar los objetivos y alcances.
- c) Seleccionar el tipo y nivel de inspección.
- d) Seleccionar el equipo para la evaluación técnica.
- e) Establecer las técnicas y procedimientos de investigación.
- f) Establecer procedimientos y técnicas para la recolección de datos bajo el agua.
- g) Seleccionar el equipo que realizará los trabajos bajo el agua.
- h) Recolectar y revisar los datos geológicos, geotécnicos y de ingeniería y alguna otra información antecedente.
- i) Preparar una guía para los recabadores de información.
- j) Especificar la investigación de campo.
- k) Seleccionar el sistema de comunicación a ser usado (Libretas, fotos, cintas para video, etc.).
- l) Especificar la investigación de laboratorio.
- m) Analizar los datos registrados.
- n) Realizar una evaluación de ingeniería.
- o) Tomar decisiones administrativas.
- p) Reportar los datos encontrados.

Todo lo anterior ayuda en la etapa de la planeación si una o más hipótesis de trabajo son desarrolladas desde la información preliminar, la cual ayuda a conocer las razones por las cuales el concreto en cuestión se encuentra en condiciones desfavorables.

Una inspección preliminar nos ayuda también en la toma de decisiones acerca de que, si se requiere o no extraer muestras de concreto de los elementos estructurales. No obstante, es recomendable que en el plan se incluya el procedimiento de muestreo. La localización, tamaño y número de especímenes se determina una vez que se conocen las condiciones de la estructura.

3.4 INSPECCION BAJO EL AGUA

3.4.1 Limpieza

La limpieza bajo el agua se requiere para poder remover la suciedad marina, corrosión y todo tipo de desechos que se encuentren depositados en los elementos de la estructura bajo el agua, y así posteriormente poder llevar a cabo eficientemente los trabajos de inspección, mantenimiento y las operaciones de reparación. Las superficies donde se van a realizar los trabajos deben estar completamente limpias de toda suciedad y desechos para permitir realizar un examen visual minucioso y poder apreciar en que condiciones se encuentra la estructura.

La siguiente lista enumera los factores que pueden determinar el éxito del procedimiento de la limpieza para cualquier tipo de tarea:

- a) Características físicas y operacionales del dispositivo de limpieza.
- b) Cantidad y tipo de suciedad.
- c) Material de construcción.
- d) Experiencia del operador.
- e) Condiciones de trabajo bajo el agua.
- f) Forma de acceso desde la superficie.

Los trabajos de limpieza también deberán ser evaluados, ya que ésta tarea también tiene su grado de dificultad y además podría requerir de un tiempo considerable. Otra razón para llevar a cabo la evaluación de si es o no necesaria la limpieza, es que en algunos de los casos la suciedad que se encuentra en los elementos, proporciona una cierta protección contra algunos agentes que degradan a la estructura.

Para realizar los trabajos de limpieza bajo el agua, existen en el mercado una gran variedad de herramientas. Así por ejemplo, cuando se trata de una limpieza ligera, generalmente se realiza con un cuchillo de buzo u otras herramientas de mano como lo son los raspadores. Por otra parte, para una limpieza a mayor detalle en áreas grandes, se realiza

mejor con herramientas de mayor poder tales como dispositivos neumáticos o hidráulicos, esmeriles y cepillos. Los chorros de agua o arena también se pueden utilizar bajo el agua.

Para trabajos de limpieza difíciles, los chorros de agua a elevadas presiones son efectivos para superficies de acero y de concreto, pero, se deberá tener mucho cuidado ya que este tipo de sistemas de chorro pueden llegar a cortar alrededor del concreto y dañar a la estructura.

El cepillo con sistema hidráulico que se utiliza para limpiar los cascos de los barcos también puede ser utilizado para limpiar grandes superficies de concreto bajo el agua. Este sistema no es tan rápido como el sistema de chorro de agua, pero se obtienen resultados satisfactorios con algunas tareas de limpieza (Ref. 3).

3.4.2 Inspeccion bajo el agua con y sin buzos

La inspección bajo el agua puede incluir el uso de uno o más buzos o de un vehículo operado a control remoto. Los vehículos operados a control remoto usualmente cuentan con cámaras de vídeo y un sistema de luces, estos vehículos son controlados desde la superficie con poca participación del buzo. Ellos pueden existir desde el vehículo con un sistema relativamente económico, hasta los que cuentan con un sistema muy sofisticado.

Las ventaja de utilizar el sistema con vehículo son las siguientes:

- Se pueden utilizar a profundidades mayores a las que los buzos podrían trabajar.
- Se pueden mantener trabajando bajo el agua por mayor tiempo.
- Pueden realizar varias veces la misma tarea sin perjudicar a la estructura.
- Además pueden ser operados en lugares donde las corrientes de agua y condiciones de las mareas impiden el trabajo de los buzos.

Las desventajas de utilizar el sistema con vehículo son:

- Las inspecciones son usualmente caras debido a que requieren de un gran soporte para poder ser operados. Tal soporte consiste de generadores de energía, cables, controlador del vehículo, monitores y piezas de repuesto.
- Los vehículos generalmente son menos flexibles y menos confiables.
- El sistema tiende a requerir de frecuente mantenimiento, el cual es proporcionado por el sistema de buzos.
- Las cámaras de vídeo instaladas en el vehículo, pueden distorsionar ángulos, dimensiones y magnitud del deterioro o daño cuando éstos no son referenciados.

La inspección con un vehículo dependerá no solamente de las condiciones naturales de la zona sino que también del tipo de vehículo que se utilice. Por lo tanto se deberá de realizar un plan de trabajo detallado conjuntamente con el propio fabricante o en su defecto con el operador del vehículo en cuestión.

Los diferentes tipos de vehículos que se encuentran en el mercado, difieren entre ellos en la forma en que obtienen la energía para poder operar.

Las ventajas de utilizar un sistema de buzos en la inspección de estructuras bajo el agua son:

- Es un sistema versátil y flexible.
- Es simple y requiere de un mínimo de soporte.
- En la mayoría de los casos es relativamente económico.

Las desventajas de utilizar un sistema de buzos en la inspección bajo el agua son:

- Existen grandes limitaciones en cuanto a la profundidad en la que se puede realizar la inspección. Por lo que, a medida en que se va incrementando la profundidad se va requiriendo de mayor soporte, como lo es el apoyo médico, embarcaciones, etc.
- El tiempo que el buzo puede permanecer bajo el agua se reduce a medida que aumenta la profundidad.
- El buzo tiene una limitación en cuánto al número de veces que puede realizar las inspecciones.
- La visión, tacto, audición y las percepciones especiales del buzo son más desfavorables bajo el agua que en el aire. por lo tanto es susceptible de cometer errores en las observaciones y registro de datos.
- En temperaturas frías, se disminuye la capacidad de concentración del buzo (Ref 3).

3.4.3 Naturaleza de la inspeccion bajo el agua

La naturaleza y técnica de las observaciones está completamente relacionada con el tipo de trabajo a realizar, así como también con las características estructurales que influyen directamente en su seguridad. Los factores que deben considerarse en las observaciones de las estructuras de concreto, así como también el equipo que puede ser utilizado para poder cuantificar esas observaciones, se presentan a continuación:

A) GRIETAS

Se recomienda que las zonas que muestran grietas, sean continuamente checadas. Siempre que se detecte una grieta, la zona en donde se localiza deberá ser limpiada y dicha grieta se marcará con una línea a lo largo de la misma a una distancia de 0.25 a 5 cm. Los puntos extremos, donde inicia y termina la grieta, deberán ser marcados con una marca ortogonal, y además se deberán anotar a un lado las fechas en las cuales se hicieron las observaciones.

En las zonas donde las grietas son más anchas, se deberá medir el ancho de las mismas y marcar los puntos en donde se hacen dichas lecturas para tener puntos de referencia. Dichas lecturas se llevaran a cabo utilizando una lente de aumento adecuada y una escala para medir el ancho de las grietas.

Si las observaciones posteriores muestran que el ancho de las grietas ha aumentado, se medirán nuevamente las grietas en los puntos de referencia, así como también las grietas nuevas. Es importante que las zonas en donde se encuentran los puntos de referencia, se marquen también en un plano de la estructura, para que de esta manera

se puedan localizar fácilmente los puntos críticos en la estructura. Las zonas que presenten mayores daños deberán ser fotografiadas para contar con referencias visuales al momento de llevar a cabo una evaluación.

B) PROBLEMAS EN LA CIMENTACION

En general, la cimentación de una estructura sufre de asentamientos sin causar peligro en sus funciones. Pero, si dichos asentamientos son de naturaleza diferencial, entonces el comportamiento de la estructura puede ser afectado severamente. Siempre que ocurra un asentamiento diferencial en la cimentación de una estructura, se deberá realizar una nivelación geométrica con el equipo topográfico más adecuado.

Otro tipo de problemas que deben ser checados son la disminución o eliminación de rellenos, taludes u otros materiales de soporte contra el movimiento del agua.

C) JUNTAS

Las juntas son cuerpos delicados en una estructura, por ser ellos quienes soportan las discontinuidades en los elementos. Se debe poner mucha atención en sus alrededores para checar si sus desplazamientos no están sobrepasando a los de diseño.

Siempre que exista sospechas en cualquier clase de anomalías en la operación, se deben checar los movimientos relativos de los dos extremos en las juntas. Para las mediciones, se pueden utilizar eficientemente un vernier u algún otro tipo de dispositivo que proporcione lecturas con errores de hasta 0.25 cm.

D) DEFORMACIONES PERMANENTES

Los elementos estructurales que presentan deformaciones permanentes que se pueden notar a simple vista, deben ser marcados y medidos con el medio que se encuentre disponible en el sitio, y posteriormente registrar los valores de la deformación.

E) ESTABILIDAD ESTRUCTURAL

El comportamiento funcional de las anclas utilizadas para dar estabilidad a los muros, es de vital importancia para la seguridad de las estructuras. Por lo tanto, se deberán observar cuidadosamente para detectar algún posible defecto de fisura en los materiales que la cubren en la base o en la parte final de los cables, los cuales son los responsables de que las cargas sean transmitidas.

F) ALINEAMIENTO Y VERTICALIDAD

Los desplazamientos en el eje vertical u horizontal de elementos como lo son: muros, columnas, y algún otro elemento recto en una estructura, pueden ser checados con métodos simples.

El chequeo del alineamiento bajo el agua, puede ser realizado en forma similar a como se realiza sobre el agua, y en donde el instrumento principal es el ojo humano.

El procedimiento a seguir es el siguiente: utilizando un cable de acero de diámetro pequeño, se coloca entre los puntos de referencia y se tensa para posteriormente observar las desviaciones que pudiera presentar la estructura.

Para medir desviaciones en la verticalidad, se deberán marcar puntos de referencia fijos sobre la estructura e improvisar plomos sujetos con cables de acero o con cables de otro tipo de material resistente. Los cables deberán suspenderse desde algún punto de referencia que deberá permanecer siempre en la misma posición y finalmente, las mediciones entre los puntos extremos del cable y entre los puntos de referencia, se llevan a cabo con alguna escala.

G) EROSION

La erosión es un daño que frecuentemente ocurre en las estructuras que se localizan bajo el agua. Los daños usualmente se presentan en la superficie de la estructura por lo que los elementos que la constituyen pueden sufrir desgaste, cavitación o ambas a la vez; por lo tanto, en lugares donde el agua es clara, este tipo de daños son muy notables a simple vista, en caso de que el agua en donde se encuentra la estructura esté turbia, se utilizarán métodos palpables. La inspección visual bajo el agua puede ser realizada desde la superficie bajo ciertas circunstancias que puedan favorecer la observación.

El grado de erosión que presenta la estructura deberá ser medido con los medios que se encuentren disponibles en el sitio. Además, se recomienda utilizar fotografías o cintas de vídeo para conocer la naturaleza de la erosión, así como también el tipo de arena, rocas, piezas de concreto, y algún otro deshecho presente en el lugar; también se debe observar la velocidad y otras características del flujo de agua.

H) CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO

Aunque en la mayoría de los casos, la corrosión del acero es fácilmente notable por las manchas de óxido en la superficie de la estructura, se deberá checar a los elementos, esto con golpes en superficie del concreto en observación, por medio de un martillo. En caso de existir corrosión, el sonido del martillo disminuirá de intensidad y se escuchara hueco al momento de golpear la superficie (Ref 4).

3.4.4 procedimiento típico de inspección bajo el agua

Normalmente la inspección bajo el agua debe apegarse al siguiente procedimiento típico:

- A)** Iniciar la inspección de la estructura en la zona de olas, ya que en esta zona es donde más daños se presentan a causa de los agentes físicos, químicos y mecánicos.
- B)** Limpiar la zona y sus alrededores para que posteriormente se puedan apreciar los daños. Realizar una inspección visual para observar el grado que presentan las grietas, piezas rotas, y la exposición del acero de refuerzo.
- C)** Sondear el área limpia con un martillo para detectar la posible pérdida de capas de concreto o lugares huecos en los elementos de la estructura.
- D)** Descender, inspeccionando visualmente y golpeando con un martillo las pilas o estructuras en donde la contaminación marina es mínima.
- E)** Registrar la profundidad del agua.
- F)** De regreso a la superficie, registrar inmediatamente toda la información obtenida durante la inspección.
- G)** El personal de apoyo técnico que se encuentre en la superficie, deberá checar la información y registrar los daños que presente la estructura.
- H)** Realizar una inspección con mayor detalle en la base de las masas de concreto de la estructura, principalmente en los muros de retención y cimentaciones. Esto se realizará por que este tipo de estructuras están más propensas a la socavación causada por las olas y corrientes de agua, y en caso de no corregirse, pueden ocasionar el debilitamiento de la estructura.

Es recomendable que para la inspección del concreto, se utilicen buzos experimentados en este tipo de trabajos, para que de esta forma puedan detectar rápidamente las áreas con defectos, realizar las mediciones y registrar los resultados o transmitirlos a la superficie por medio de un sistema de comunicación eficiente. En todos los casos el buzo deberá tener conocimientos acerca de las condiciones "normales" de la estructura y tipos de defecto/daño que pudieran presentarse en la estructura.

La experiencia de los buzos para los trabajos de inspección, puede ser de poca relevancia en caso de que se tenga la posibilidad de contar con un sistema de vídeo bajo el agua. Este tipo de sistemas permiten la observación al mismo tiempo en la superficie, por lo que, el ingeniero especialista en el tema, puede interpretar con mejores resultados las condiciones en las que se encuentra la estructura; además, este

tipo de observaciones se pueden documentar y así tener la posibilidad de contar con ellas como referencias para el momento de la toma de decisiones (Ref. 5).

3.4.4.1 INSPECCION PALPABLE

Debido a que muchas de las subestructuras se encuentran localizadas en aguas altamente turbias, la visibilidad es nula y por lo tanto, el buzo deberá tocar y sentir a las piezas de la estructura para poder detectar posibles fallas, daños o deterioro. Este tipo de tareas se van dificultando cada vez más si el agua se encuentra fría, existen fuertes corrientes de agua o los elementos de la estructura se encuentran cubiertos por depósitos marinos.

Las inspecciones por medio del tacto requieren de mayor preparación cuando no se trabaja en agua limpia.

Para este tipo de inspecciones se deberá tomar en cuenta lo siguiente:

- Desarrollar un plan de inspección.
- Buena comunicación entre el buzo y el personal técnico que se encuentra en la superficie.
- Contar con buzos conscientes del tipo de tareas a realizar y con la habilidad necesaria.
- Tratar de no utilizar pruebas destructivas.
- Registrar en la superficie la información que se obtenga bajo el agua

3.4.4.2 MEDICION DE LAS DIMENSIONES FISICAS

La medición de las dimensiones físicas proporciona información directa acerca de la pérdida de secciones de concreto. Este método es rápido y sencillo, los resultados son cuantitativos y además es económico aun bajo el agua debido a la mínima cantidad de tiempo y equipo que se requiere.

3.4.4.3 RESONANCIA ACUSTICA

El sonido se realiza golpeando la superficie del concreto con un martillo para localizar las áreas en donde existen huecos internas en la estructura, desconchamiento del recubrimiento de concreto y/o corrosión del acero de refuerzo. Este método, aunque resulta económico, no es muy efectivo y solamente proporciona información cualitativa.

3.5 PRUEBAS DESTRUCTIVAS Y NO DESTRUCTIVAS

3.5.1 Pruebas destructivas.

El propósito principal de medir la resistencia de especímenes de prueba de concreto es estimar la resistencia del mismo en la estructura real. Se hace hincapié en la palabra “estimar”, ya que no es posible más que obtener un indicio de la resistencia del concreto en la estructura, pues depende entre otras cosas de la suficiencia de la compactación y la del curado. Es importante señalar que la resistencia de un espécimen de prueba depende de su forma, proporciones y tamaño, por lo que el resultado de la prueba no proporciona el valor de la resistencia intrínseca del concreto.

Se llaman pruebas destructivas ya que para poder determinar las propiedades del elemento estructural, se requiere de un espécimen que se obtiene directamente de la estructura y por lo tanto ocasiona deterioros a la misma.

La principal prueba destructiva que se aplica es la siguiente:

3.5.1.1 CORAZONES DE CONCRETO

Los corazones de concreto, son especímenes que se toman directamente de algún elemento de la estructura para después realizarles pruebas como el análisis petrográfico, resistencia a la compresión, permeabilidad, resistividad eléctrica, densidad, difracción por Rayos X, humedad y contenido de aire.

Esta técnica requiere de una herramienta cortante rotatoria con broca de diamante, para extraer corazones de concreto bajo el agua y equipo de laboratorio para realizar las pruebas. El método es destructivo ya que el elemento de la estructura queda con el agujero de la broca y además de que se producen microgrietas en la periferia del lugar donde se extrae la muestra.

3.5.2 Pruebas no destructivas

Las pruebas no destructivas se utilizan cuando se requiere obtener resultados rápidos y que no dañen a la estructura. Con estas pruebas se evitan las dificultades que presenta el corte de corazones, así como todo el procedimiento para obtener, curar y probar especímenes estándar de prueba. Se han hecho muchos intentos de crear pruebas no destructivas, pero pocas de ellas han sido realmente exitosas. De los principales métodos que se les ha encontrado una aplicación práctica están los siguientes:

3.5.2.1 VELOCIDAD DEL PULSO

La velocidad del pulso se determina al medir bajo el agua el tiempo de transmisión de un pulso de energía, generalmente ultrasónica, a través de una distancia de concreto conocida. La velocidad del pulso es proporcional al módulo dinámico de elasticidad con el cual, a su vez, se infiere la resistencia del concreto. Los resultados pueden ser afectados por varios factores incluyendo el contenido del agregado y la localización del acero de refuerzo. Los resultados que se obtienen son cuantitativos. La velocidad del pulso requiere ser correlacionada con otro tipo de pruebas tales como las realizadas en los corazones de concreto para así poder obtener valores absolutos.

Este tipo de prueba no es suficientemente confiable en cuanto a la determinación de la resistencia, pero sí ayuda eficientemente a evaluar la homogeneidad del concreto y a la localización de grietas.

3.5.2.2 LECTURAS DEL POTENCIAL DE VOLTAJE

Estas lecturas son tomadas para conocer el grado de corrosión del acero de refuerzo realizando una conexión eléctrica en dicho acero. Una vez que la conexión se ha realizado, la prueba es fácil de realizar y no es destructiva. Se coloca una punta porosa del electrodo directamente sobre la superficie del concreto que recubre al acero de refuerzo y posteriormente se realiza una comparación del potencial entre el acero y un electrodo de referencia estándar, generalmente se utiliza nitrato de plata-plata bajo el agua y sulfato de cobre-cobre en la zona de marea.

Este tipo de métodos proporciona información más interesante y precisa cuando se complementa con los análisis de penetración de cloruros en los corazones de concreto. Los resultados indican si la corrosión está activa o no, y la extensión de la superficie de concreto afectada. Sin embargo, estas pruebas no indican velocidad ni cantidad de la corrosión. Tampoco indican la resistencia del concreto.

3.5.2.3 TOMOGRAFO ASISTIDO POR COMPUTADORA

Este tipo de explorador utiliza una fuente nuclear para desarrollar una panorámica de la sección de los elementos de una estructura. Esto proporciona información acerca del tamaño y localización de los agregados, grietas, huecos, densidad, así como el diámetro y localización del acero de refuerzo y su grado de corrosión. Este método no es destructivo y puede explorar miembros de hasta 1 m de espesor.

Un inconveniente de este método es que resulta muy caro y no proporciona información acerca de la resistencia del elemento de concreto.

3.5.2.4 MEDICIONES DE LA RESISTENCIA-POLARIZACION

Este método tiene la facultad de proporcionar información respecto al grado de corrosión que presenta el acero de refuerzo. La técnica que comúnmente se utiliza en este método es la de "tres electrodos", en donde un electrodo es la varilla que presenta corrosión, el segundo electrodo es una fuente de corriente que actúa durante la polarización y el tercer electrodo es una referencia estandarizada sobre la

cual se realizan las mediciones del voltaje y corriente aplicados, que proporcionan un índice en el grado de corrosión. La prueba es del tipo no destructivo, excepto en la conexión eléctrica del acero de refuerzo.

3.5.2.5 SISTEMA DE MAPEO CON LASER

Este sistema se utiliza para cuando se requiere de resultados muy precisos, ya que el equipo que se emplea cuenta con rayos láser que permiten bombardear al elemento estructural y obtener como respuesta una radiografía de las condiciones en que se encuentra dicho elemento.

Las ventajas de utilizar este tipo de sistema son las siguientes:

- Genera resultados en cuestión de segundos
- Proporciona datos acerca de la densidad en orden de mayor magnitud que los sistemas anteriores.
- Se puede obtener datos en las áreas que son inaccesibles para el equipo de inspección convencional.
- Los datos se pueden obtener de forma digital, lo cual ayuda a que sea fácil y rápido el procesamiento de la información.

Quizás la más seria restricción de este sistema sea el posicionador que se debe adaptar al equipo láser. Cuando se utilizan adecuadamente estos sistemas, se puede lograr una compensación en el costo de los mismos.

En la actualidad, en la mayoría de los casos se utilizan las pruebas de corazones, sondeos, dimensiones físicas, parámetros visuales y el juicio con bases en la ingeniería para llegar a valores confiables para la resistencia. Por lo tanto, los mejores resultados serán aquellos que se obtengan de una combinación de varias pruebas diferentes y que cada una de ellas involucre un número adecuado de muestras. Cabe mencionar que, debido a la naturaleza heterogénea del concreto, se puede tener una amplia variación en los resultados.

Como regla, las pruebas destructivas deberán ser evaluadas para checar su conveniencia, ya que este tipo de pruebas inducen agrietamiento y una disminución en la sección del elemento de concreto, provocando con ello el deterioro de la estructura. Los efectos nocivos de las pruebas pueden minimizarse si al término de las mismas, se rellenan los huecos y se sellan las grietas.



DEPFI

3.6 DETERMINACION DE LA CAUSA O FUENTE DEL PROBLEMA

Esta es la etapa más importante y también la más difícil. Ya que no es posible evaluar la importancia de las reparaciones a efectuar, ni escoger los mejores métodos de reparación, si las causas que provocan los daños no están perfectamente conocidas. Esto no significa que la causa específica deba ser descubierta. En efecto, sobre todo para el concreto, es frecuente que no sea posible la identificación específica de la causa de un daño, ya sea porque los datos para encontrar el origen de un problema son insuficientes o por que los agentes destructores actúan a un mismo tiempo. Sin embargo, se deben eliminar posibles agentes dañinos hasta obtener un pequeño número de ellos y así estar en posibilidades de escoger un método de reparación que mejore el estado presente e impida la expansión de los daños debidos a los agentes destructores.

En algunas situaciones en donde el defecto a reparar en una obra es causado por más de un agente, es posible seleccionar algún método de reparación que impida cualquier deterioro posterior causado por alguno de los agentes dañinos.

Es importante acentuar la importancia que representa el descubrir el origen o causa del defecto, aunque para algunas estructuras esto repercute en el aspecto económico, pues al identificar con precisión las causas de los defectos, se permitirá minimizar el trabajo de reparación así como el costo total del proyecto, obteniendo con esto una estructura sana y segura.

Existen muchos proyectos de reparación realizados, que por ignorar lo anterior resultan más perjudiciales que benéficos, lo que se manifestó al poco tiempo, cuando los problemas resurgieron y los daños se presentaron con mayor intensidad.

No existen reglas ni métodos para determinar la o las causas de deterioro, ya que cada caso representa un problema muy particular y como tal debe ser estudiado. Sin embargo, la experiencia del ingeniero especialista le permite despejar un cierto número de esquemas de comportamiento. Por ejemplo, las fisuras de un muro se forman generalmente en diagonal debido a un asentamiento diferencial; la matriz de un concreto expuesto al ataque de sulfatos tiene un aspecto opaco y sucio característico, las fisuras producto de la corrosión del acero de refuerzo forman líneas rectas paralelas y equidistantes que permiten en algunos casos, la exteriorización del óxido; de igual forma existen patrones de referencia en las estructuras tanto de acero como de madera, que permiten deducir de manera rápida las posibles causas de su deterioro.

Es del conocimiento de todo técnico que el diagnóstico es una actividad difícil de realizar, por lo que en esta etapa se debe poner toda la atención en descubrir el fenómeno y su posible tratamiento (*Ref 1*).

3.6.1 Documentación de la inspección

Toda la información obtenida durante la inspección y que a criterio del especialista sea útil, deberá ser documentada de manera clara y concisa, de preferencia en forma permanente, utilizando una terminología técnica y accesible, de tal forma que cualquier persona pueda también interpretar los resultados.

La figura 3.6 muestra algunos de los símbolos que comúnmente se utilizan en los reportes.

Las formas para realizar los reportes de las inspecciones, deberán ser llenadas durante los trabajos o tan pronto como éstos sean terminados. El utilizar formatos estandarizados (*ver FIGS. 3.3, 3.5.A y 3.5.B*) facilitan mucho el procedimiento de documentación y son esenciales en la comparación de los resultados de inspecciones presentes con inspecciones ya realizadas o futuras (*Ref. 3*).

FIG. 3.6 SIMBOLOGIA MAS COMUN EN LOS REPORTES DE LA INFORMACION

SIMBOLO	EXPLICACION
NI	No inspeccionado, inaccesible u omitido.
ND	Sin defectos: <ul style="list-style-type: none"> - No existe agrietamiento - Superficie original en buenas condiciones
MN	Defectos menores: <ul style="list-style-type: none"> - Sección original en buenas condiciones - Existencia de micro poros y micro grietas - Desconchamiento superficial - Pequeñas manchas de óxido en la superficie - Varillas no expuestas a la intemperie
MD	Defectos moderados: <ul style="list-style-type: none"> - Desconchamiento del concreto - Corrosión menor del acero de refuerzo - Manchas de óxido visibles a lo largo del acero de refuerzo, con o sin agrietamiento visible - Debilitamiento del concreto debido al ataque químico - Desintegración de la superficie hasta 2.5 cm de profundidad debido al clima o a la abrasión
MJ	Defectos mayores: <ul style="list-style-type: none"> - Pérdida de concreto (10-15%) - Una o dos varillas gravemente corroídas - Grietas muy anchas a lo largo del acero de refuerzo
SV	Defectos severos: <ul style="list-style-type: none"> - 2 o 3 varillas completamente corroídas - Disminución de la resistencia estructural - Deformaciones significativas

3.6.2 Evaluación de la resistencia de la estructura

Debido a que la estructura examinada está en servicio, es importante determinar en forma rápida si es posible seguirla utilizando sin peligro o si es conveniente reducir su utilización; si la resistencia se afectó considerablemente se debe evaluar el riesgo de seguirla utilizando o si es necesario, habilitar alguna estructura provisional para garantizar su estabilidad mientras se toma alguna decisión. En caso de que la obra esté fuera de uso, es necesario conocer su resistencia y el margen de seguridad que ofrece.

La evaluación de la resistencia de una estructura seriamente dañada puede representar un problema importante, sin embargo, es claro que en cualquier obra, que haya dejado de funcionar o no haya sufrido colapso, su resistencia es aún suficiente como para permitirnos realizar una serie de ensayos y cálculos para determinar su posible reparación o, en caso contrario, planear adecuadamente el proyecto de demolición.

En los casos en donde las estructuras sufrieron deformaciones excesivas o colapso, que manifiesten claramente su insuficiente resistencia, no representa ninguna dificultad para la determinación del técnico o ingeniero .

Cuando la sintomatología del daño estructural no es clara y se requiere determinar si la resistencia de la estructura es o no suficiente, esto se puede estudiar por varios métodos diferentes, de entre los cuales podemos citar:

3.6.2.1 METODOS DE PORCENTAJES PREESTABLECIDOS

Este método consiste en aceptar que todos los elementos que perdieron menos de un cierto porcentaje (determinado con anterioridad) de su resistencia (y no de su sección) pueden ser aún útiles y que todos los elementos que han perdido más de ésta porción de resistencia son inútiles. Este es un criterio muy frecuentemente utilizado.

Las pérdidas de resistencia admisible pueden ser establecidas a cualquier nivel no mayor del 15% según la obra que se considere, de acuerdo con los criterios de uso. La cifra del 15% se ha utilizado para algunos elementos principales de puentes y de edificios que son conocidos en función de los esfuerzos calculados para elementos menos importantes, el porcentaje podrá establecerse de acuerdo al criterio del ingeniero director del proyecto. No existe regla general, el porcentaje a utilizar depende de la apreciación del ingeniero y de la memoria de cálculo de la obra; es conveniente saber si el estudio inicial de la estructura se basa en la teoría de la elasticidad, sobre el cálculo de la ruptura, o tomando en consideración una redistribución plástica de los esfuerzos, si las cargas de diseño aumentaron o disminuyeron, etc.

Este método parte de la hipótesis de que la obra es perfectamente conocida desde su origen o proyecto, que no es siempre el caso.

3.6.2.2 ANALISIS DEL ESTADO DE ESFUERZOS

Este método consiste en efectuar un análisis detallado de los esfuerzos de la estructura, tomando en cuenta las disminuciones de la sección donde se producen. Es una técnica muy costosa y delicada; sin embargo, es indispensable cuando las reparaciones a la estructura se esperan de importancia. Habitualmente se evalúa en principio la degradación o daño basándose en la idea de un porcentaje máximo de pérdida de resistencia, si aparecen reparaciones de mayor importancia de las previstas al inicio del estudio será necesario evaluar nuevamente la resistencia basándose en un análisis más detallado de los esfuerzos, tomando en consideración todos los parámetros que intervienen en la resistencia de la estructura.

Para un proyecto de obra nueva, efectuar un análisis muy detallado no justificará la economía de algunos kilogramos de acero o algunos metros cúbicos de concreto, debido al elevado costo de los estudios; pero cuando el problema es de restitución de resistencia o aumentarle el grado de seguridad a una estructura es importante, un análisis a profundidad, ya que una pequeña reserva de resistencia puede decidir si son oportunos los trabajos de reparación o de conservación y uso de la estructura, o si es posible abandonarla y demolerla.

3.6.2.3 PRUEBAS DE CARGA

Este método es útil para verificar la resistencia de elementos sospechosos en cuanto al estado que conserva la estructura. Es importante considerar que éste método sólo se debe practicar cuando el cálculo nos indique que el coeficiente de seguridad con respecto a la ruptura es suficiente, para evitar que el ensaye provoque el colapso de la obra o de alguna parte de ésta. Los ensayos de carga, generalmente manifiestan resistencias más grandes en las estructuras, que aquellas que se usaron en el cálculo de éstas.

Las pruebas se practican sobre las estructuras reales en donde intervienen situaciones que no se pueden incluir en un ensaye de laboratorio, tales como: interacción de las estructuras adyacentes, los efectos de las cargas permanentes y las cargas transitorias, etc.; por tales efectos se aprecia una resistencia mayor en los elementos al practicar este tipo de pruebas, que nos auxilien a evaluar la resistencia de la estructura.

Los ensayos de carga son de gran utilidad si el ingeniero que las utiliza comprende perfectamente sus límites y rangos de aplicación (*Ref. 1*).

REFERENCIAS

1. **COTTIER** Caviedes Juan Luis
Patología en las obras
Construcción y Tecnología
Vol. IV No. 40
IMCYC
Méx. D.F. 1991
p. 14-21
2. Comité del ACI 207 1979b
3. **POPOVICS**, Sandor
Inspection of the engineering condition of underwater concrete structures
Technical Report REMR - CS 9
E.U. 1989
81p.p.
4. RILEM - AIPCN 1965 (Recomendaciones TBS - 1)
5. HAN - Padron and NCEL 1984

CAPITULO 4

REPARACION

4.1 ELECCION DE UN METODO DE REPARACION

Con respecto a las etapas anteriormente mencionadas, se elegirá un método adecuado de reparación de la estructura, lo cual es hasta cierto punto una actividad muy sencilla, ya que se trata en forma general de decidir únicamente sobre el método que nos lleve a conseguir más eficazmente nuestro objetivo y que sea el menos costoso, para lo cual es práctica común tener en consideración los siguientes puntos:

1. El costo de reparación deberá considerar no sólo la inversión de los trabajos relacionados con ésta, sino también los gastos que generará el mantenimiento de la obra y los trabajos arquitectónicos que demande la obra para lograr recuperar no sólo su seguridad estructural, sino que también, su arquitectura original.
2. El trabajo deberá ejecutarse con tiempo, sin dejar de considerar que se trata de una urgencia. Una reparación para estar bien realizada demanda reflexión y cuidado, lo cual lleva tiempo. Sabiendo que el costo de la reparación aumenta conforme aumenta el daño en la estructura, no debe perderse mucho tiempo en la reflexión.
3. Si los daños son relativamente poco numerosos y aislados, las reparaciones permanentes y las cargas transitorias serán consideradas; sin embargo, si los daños son extensos se considerará la reparación global de la estructura.
4. Se debe asegurar que la reparación impida que los daños o degradaciones se extiendan, si esto no es posible, se deberá de establecer un margen de seguridad mayor al momento de reparar, para así tomar en cuenta la persistencia del fenómeno de degradación y prevenir la aparición de otro daño.
5. Si la estructura presenta graves daños, la reparación o reforzamiento deberá reintegrar la resistencia original a la estructura e impedir que el daño continúe.
6. Los diferentes tipos de reparación se realizan en forma limitada; por tal motivo, al tomar la decisión por alguno de ellos no se debe pasar por alto el aspecto de estética de la estructura e integrar al proyecto de reparación el proyecto arquitectónico.
7. Se debe prever en lo posible que durante la ejecución de los trabajos de reparación, no se generen problemas serios en la utilización de la obra, si es que ésta se encuentra en servicio, de ser posible se deberá planear la ejecución de los trabajos de tal manera que la interrupción de actividades dentro del inmueble sea lo menos posible.
8. Una reparación implica en muchos casos el robustecimiento de la sección de los elementos. Esto aumenta la rigidez, modifica la distribución de esfuerzos y de momentos resultantes de sobrecarga, haciendo trabajar en desventaja a ciertas partes de la estructura y auxiliando a otras. Estos cambios pueden resultar

importantes y traer serias consecuencias en el comportamiento de la estructura. Se debe tener precaución de no afectar el comportamiento de otras estructuras o partes de la obra misma. Por lo tanto, se hace necesario un análisis de la nueva distribución de esfuerzos.

En general no se debe permitir ningún cambio al proyecto o ejecución de éste sin la previa autorización del ingeniero encargado de los trabajos o algún técnico competente.

En resumen, Se puede decir que la manera en que un ingeniero aborda el problema de la degradación de una obra y de su mantenimiento, debe ser semejante al de un médico abordando el caso de un paciente, lo que implica la constatación de un mal, el diagnóstico y el remedio; lo cual nos lleva a reflexionar sobre la imperante necesidad de prevenir el mal.

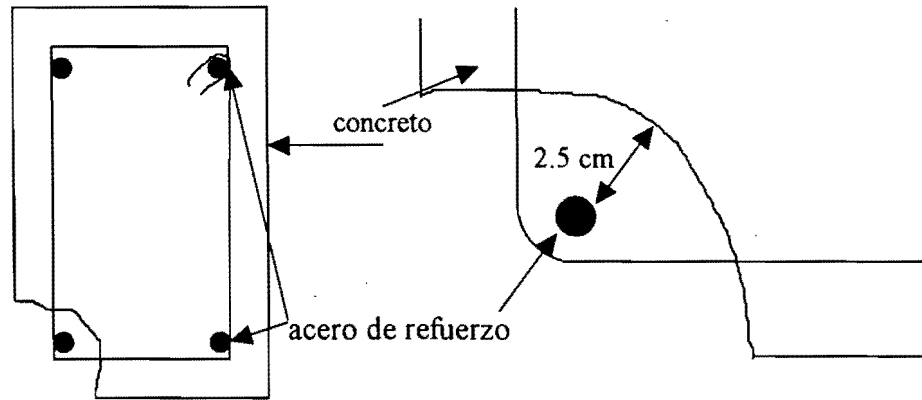
Dentro de su trabajo, el ingeniero debe conocer las diferentes formas de degradación y su forma de manifestarse, es decir, los síntomas o las causas de diferentes tipos de daños y la forma de corregir la situación.

Es necesario que todas aquellas estructuras nuevas, ya existentes o aquellas que estén sanas, correctamente diseñadas y construidas, no les falte mantenimiento, para prevenir su degradación.

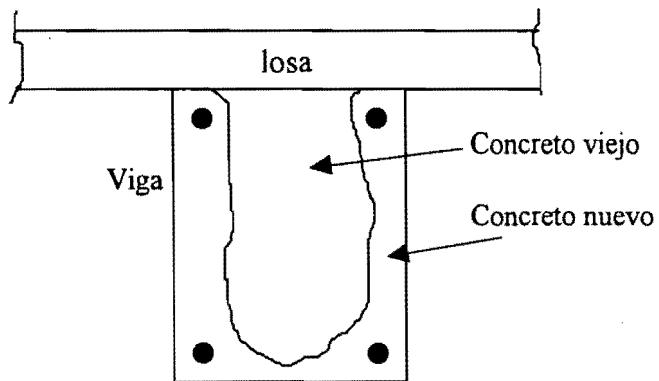
4.2 REMOCION DEL CONCRETO DETERIORADO

Esta etapa se puede realizar utilizando mecanismos adecuados que pueden ser manuales o neumáticos, por ejemplo espátulas, martillos, cinceles, etc. Es esencial que el acero de refuerzo sea completamente descubierto y que se remueva una capa de concreto de 2.5 cm de espesor entre el acero y el interior del elemento (*ver fig. 4.1*). De esta manera se conseguirá realizar una limpieza completa al acero y además permitirá el anclaje del concreto nuevo con el concreto viejo. La limpieza de la superficie a reparar se proporciona después de haber eliminado las capas de concreto deteriorado. Es muy común que las vigas de sección reducida, en lugar de ser reparadas se reemplacen completamente por otras nuevas. Lo anterior se debe a que cuando se remueve el concreto deteriorado, la sección se reduce considerablemente.

FIG. 4.1 Remoción del concreto deteriorado en una sección de concreto reforzado.



Ejemplo de sección tipo, de una viga ya reforzada.



4.3 SELLO DE GRIETAS.

Si el elemento de concreto presenta como daño únicamente grietas, estas deberán ser selladas por medio de la inyección de una sustancia de baja viscosidad.

El procedimiento para realizar correctamente el sello de las grietas es el siguiente:

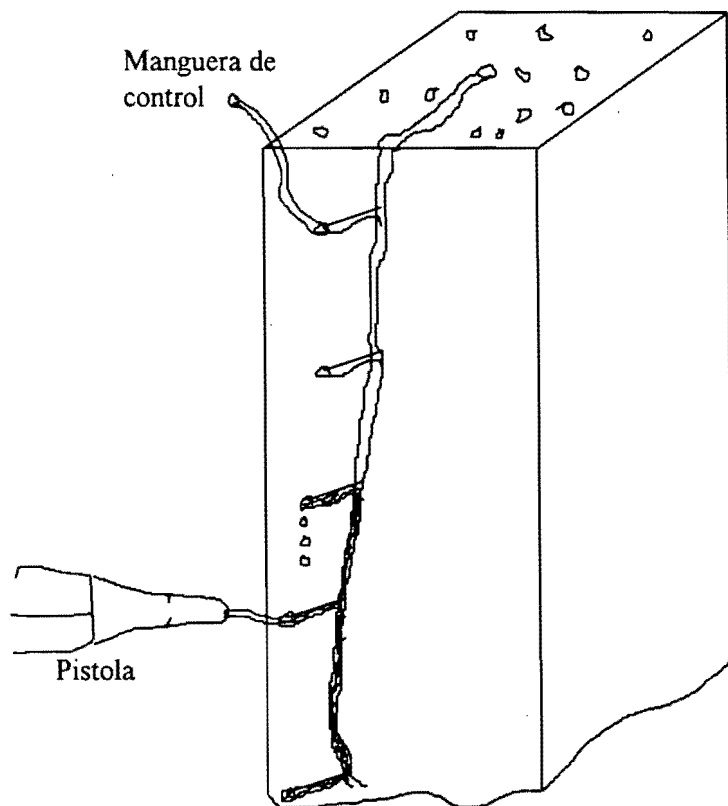
- 1) Se procede a limpiar las grietas (con chorro de aire) y posteriormente a sellar superficialmente las mismas, lo cual puede realizarse con yeso o con cinta adhesiva..
- 2) Se realizan perforaciones de 3/8" por medio de un taladro, ésto se lleva a cabo a lo largo de la grieta con distancias de 20 a 30 cm y se ajustan niples o alguna otra vía de polietileno.
- 3) Una vez que la grieta ha sido sellada exteriormente, se introduce aire hacia la grieta para eliminar el polvo y humedad que aún permanezcan dentro de la grieta y además para asegurarse de que no existen fugas de aire (lo cual significaría que la grieta esta completamente sellada en la parte exterior).
- 4) Posteriormente, se asegura el niple, después se hace fluir la sustancia hacia la grieta y se detiene la operación en el momento en que comienza a fluir la sustancia (hacia el exterior) por el niple superior inmediato.
- 5) Se procede a llenar el niple que se localiza en la parte superior de la grieta. Para este trabajo se debe contar con una manguera de control de plástico transparente. Para la inyección de la sustancia de baja viscosidad, se utiliza normalmente una pistola que se opera manualmente (*ver fig. 4.2*).

Con éste método y con el uso de resinas, se pueden sellar perfectamente grietas con un ancho igual a 0.5 mm como máximo.

Para grietas de 0.5 a 5 mm de ancho, es necesario mezclar las resinas con algún agregado y para grietas con un ancho mayor a 5 mm se recomienda utilizar morteros de cemento-arena en combinación con aditivos expansores y plastificantes. En caso de que el número de grietas a sellar fuese grande, se puede recurrir a sofisticadas bombas que realizan el proporcionamiento automático de la sustancia y que por lo tanto, reducen considerablemente el tiempo requerido para el sello de las grietas.

En los lugares donde existen grietas y que se sabe pueden existir movimientos de expansión y contracción por cambios de temperatura, se deben utilizar sellos epóxicos especiales o sellos de poliuretano.

FIG. 4.2 Técnica básica para inyectar resina epóxica en grietas.



4.4 REPARACION DEL ACERO DE REFUERZO

Una de las formas de reparar el acero de refuerzo es:

A) Primero, descubrir el acero en todo su perímetro y en la longitud afectada por la corrosión.

B) Enseguida se procede a cortar el acero dañado.

C) Se sueldan nuevas varillas. Se recomienda que los aceros de alta resistencia no sean soldados debido a que las altas temperaturas disminuyen su resistencia. Antes de realizar una reparación de éste tipo, se debe hacer una minuciosa evaluación de la conveniencia de realizarla, debido a que en la mayoría de los casos se tiene poco espacio y mucha incomodidad para realizar los trabajos y además, se debe contar con personal que tenga bastante experiencia y habilidad. Cuando las varillas cuentan con corrugaciones, las nuevas varillas también pueden ser unidas a las varillas viejas por medio de simples traslapes y amarres con alambre, para lo cual se recomiendan traslapes no menores de 40 veces el diámetro de las varillas.

Algunas veces puede ser necesario anclar las varillas nuevas en el concreto viejo, para lo cual se requiere realizar perforaciones en el concreto y fijar las varillas con resinas epóxicas; normalmente dichos anclajes deben realizarse en dirección horizontal o vertical,

siempre y cuando el flujo de la resina sea de arriba hacia abajo para poder llenar los vacíos entre la varilla y la perforación. En éste tipo de trabajos es importante que la longitud de anclaje de las varillas sea de 10 a 15 veces su diámetro. Los agujeros de las perforaciones deben tener 12 mm más que el diámetro de las varillas. Con respecto a los estribos el tratamiento que se les debe dar es similar al de las varillas longitudinales. Es importante que antes de realizar el anclaje, el acero sea lavado con chorro de arena. Igualmente, una vez que el acero de refuerzo ha sido reparado, deberá ser limpiado en todo su perímetro con chorro de arena. Este tratamiento permitirá no solamente remover el óxido del acero, sino que además permitirá la eliminación de las partículas en degradación o ajenas que se localizan en la superficie del concreto. No debe olvidarse que inmediatamente después de limpiar el acero, éste deberá ser protegido contra la corrosión, ya que el ambiente en donde se localiza es muy agresivo y en cuestión de pocos minutos la corrosión puede comenzar a surgir.

4.5 REEMPLAZO DEL CONCRETO

El concreto nuevo que se desee colocar, ya sea concreto lanzado o concreto colado convencionalmente, deberá contar con una dosificación de los materiales, similar a la del concreto original. Todo ello para obtener un comportamiento térmico que no difiera mucho del concreto base. El uso de agentes conectores entre el concreto viejo y el concreto nuevo es altamente recomendado, ya que éste tipo de materiales además de ser excelentes adhesivos, eliminan la aparición de nueva corrosión en el acero de refuerzo.

4.6 APLICACION DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

4.6.1 Remocion de la eflorescencia

Los depósitos de sal que se forman sobre la superficie del concreto, se pueden eliminar mediante la aplicación de un tratamiento de ácido. Este tratamiento se puede usar también para eliminar los escurrimientos de lechada que ocurren en el concreto arquitectónico y restaurar la aspereza de la superficie de los pisos. El ácido que se usa es el ácido clorhídrico, reducido de su forma concentrada a una relación de 1:5 ó 1:10. Normalmente, el espesor de la capa de ácido (aplicada con esponja) es de 0.5 mm, la cantidad de solución ácida al 1:10 utilizada, de 200 g/m² y la profundidad de concreto retirado, del orden de 0.01 mm. No hay peligro de que el ácido siga actuando, ya que acaba por consumirse gracias a la reacción con la cal, pero se debe lavar el concreto para eliminar las sales que se hayan formado.

Puesto que el ácido remueve la cal, la superficie del concreto se torna más oscura. Por esta razón, y también para evitar los "excesos" locales (zonas de mayor filtración del ácido en el concreto), el ácido se debe aplicar de manera uniforme en cuanto a su concentración, cantidad y duración de la acción. El tratamiento por medio de ácido es una operación muy delicada y es esencial hacer pruebas con muestras de concreto para poder conocer los efectos que origina.

4.6.2 Concreto colado con metodos convencionales

Los métodos convencionales, consisten de las principales fases siguientes:

- 1) Retiro de la capa de concreto deteriorado.
- 2) Limpieza de la superficie del concreto y del acero de refuerzo.
- 3) Reparación del acero de refuerzo.
- 4) Colocación de la cimbra (De preferencia metálica).
- 5) Colocación del concreto dentro de la cimbra.

La ventajas de estos trabajos residen en lo siguiente:

- A) La composición del concreto colado en el lugar es más uniforme que las mezclas aplicadas con pistola y bomba.
- B) Si se utilizan modernos superfluidificantes para el concreto, la relación agua/cemento será baja, del orden de 0.38 y con excelente trabajabilidad.
- C) Permiten obtener acabados superficiales uniformes, lo cual es conveniente para los tratamientos superficiales posteriores.
- D) Las dimensiones originales del elemento pueden ser fácilmente reconstruidas.

El principal inconveniente de estos métodos es que, cuando se tienen losas descansando sobre las vigas a reparar, el colado del concreto no se puede realizar por simple gravedad. Por lo tanto, los huecos que resulten después del colado deberán ser llenados por medio de la inyección de sustancias epóxicas (*ver fig. 4.3*).

Fase 1. Concreto colado con métodos convencionales y uso de cimbra tradicional.

Fase 2. Inyección de sustancias epóxicas para llenar la parte superior.

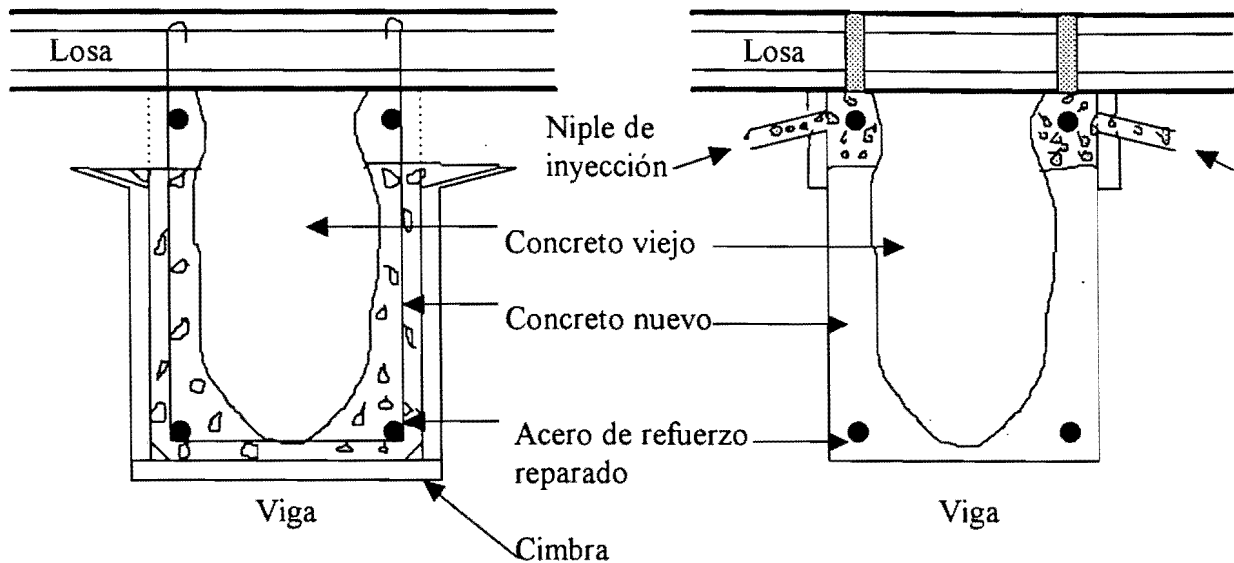


FIG. 4.3. PROCEDIMIENTO DE REPARACION UTILIZANDO LA INYECCION DE RESINAS EPOXICAS.

4.6.3 Reparación a base de concreto con fibras (encamisado)

El concreto reforzado con fibras es un concreto convencional al que se adicionan fibras separadas y discontinuas durante el mezclado. Las fibras fabricadas de acero, plástico, vidrio y naturales (celulosa), así como de otros materiales, se pueden conseguir en una gran variedad de formas (cilíndricas, planas, rizadas y estriadas) y de tamaños, con longitudes típicas de 6 a 76mm y espesores que varían desde 0.005mm hasta 0.8mm.

Se ha demostrado que las fibras de acero mejoran de manera importante la resistencia a la flexión, la resistencia a los impactos, la tenacidad, la resistencia a la fatiga y la resistencia contra los agrietamientos en el concreto (Ref. 1, 2 Y 3).

Los elementos estructurales que se pueden reparar con este tipo de concretos, son principalmente las pilas y las vigas, aunque también es muy recomendable su uso en concreto lanzado para la reparación de muros y losas.

Se ha observado que el éxito de estos trabajos depende en gran medida del adecuado proporcionamiento y fabricación de las mezclas, y del proceso de bombeo del concreto, por lo que se debe procurar contar con personal técnico con la suficiente habilidad y experiencia para poder realizar adecuadamente dichas funciones.

Además de lo anterior, el siguiente factor a considerar es el contenido de aire, ya que de ello depende en gran medida la resistencia y durabilidad del concreto ante las condiciones desfavorables del agua. Dichas condiciones suelen ser frecuentemente el congelamiento, deshielo y los efectos de la cavitación.

Para reparaciones en la zona de marea o debajo del nivel del agua, se requiere de una adecuada cimbra para evitar que se pierda lechada de concreto, por lo que se recomienda que las pilas sean encamisadas con poliéster o plástico, inyectando posteriormente la mezcla para llenar el espacio entre el encamisado y el concreto viejo.

PREPARACION DE LA SUPERFICIE DE CONCRETO. En un primer paso, debe proceder a retirar las capas de concreto que se encuentran falsas o que muestran grave deterioro, para que al momento de colocar el “concreto nuevo” (concreto reforzado con fibras de acero), se tenga la suficiente adherencia con el “concreto viejo” y de esta forma puedan trabajar como un elemento monolítico.

LIMPIEZA. El siguiente paso es realizar una limpieza del elemento a reparar, para lo cual se recomienda utilizar un chorro de agua dulce a alta presión. Este procedimiento es muy recomendable debido a que por la gran presión del agua, se logra desprender del concreto a todas aquellas partículas ajenas al mismo, y además se remueven las capas de concreto falsas.

Estos trabajos se deben realizar uno o dos días antes de colocar la cimbra, ya que si se realizan mucho antes, la contaminación marina puede adherirse nuevamente al concreto.

CIMBRA. Se recomienda utilizar cimbra metálica para poder contar con un adecuado sello en las juntas y así evitar la pérdida de lechada al momento de colar.

DOSIFICACION DEL CONCRETO.

Es importante considerar las cantidades de los diferentes materiales que intervienen en la mezcla del concreto con fibras, ya que con ello se logra que el concreto pueda ser fácilmente manipulado durante su colocación y que su durabilidad y propiedades mecánicas sean las óptimas (*ver tabla 4.4*).

TABLA 4.4 REQUISITOS PARA LA MEZCLA DE CONCRETO (CANTIDADES POR METRO CUBICO):	
<ul style="list-style-type: none"> - Fcr = Depende del elemento a reparar. - Revenimiento = 15 - 17.5 cm - Contenido de aire = 7 - 9% 	
CEMENTO TIPO V	415 - 440 kg
CENIZA VOLANTE	105 kg
GRAVA (10 mm)	655 - 660 kg
ARENA	880 - 915 kg
FIBRAS DE ACERO (50/0.5)	74 kg
ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE	El necesario para cumplir con las especificaciones
ADITIVO INCLUSOR DE AIRE	El necesario para cumplir con las especificaciones

TUBERIA PARA EL BOMBEO. La tubería de acero debe ser de un diámetro interior de 125mm.

Las reducciones en los diámetros de la tubería, deben ser preferiblemente sobre longitudes de 4 a 5m.

Cuando se requiera el uso de codos, se recomienda sean de 90°.

Todas las uniones deben ser perfectamente selladas.

4.6.4 Reparacion a base de concreto lanzado

Este método es recomendable cuando la superficie a reparar es muy grande, como son los muros.

El concreto lanzado es un mortero o un concreto que se arroja neumáticamente y a gran velocidad sobre una superficie. Desarrollado en 1911, no ha variado el concepto hasta nuestros días. La mezcla relativamente seca se consolida con la fuerza del impacto y se puede colocar sobre superficies verticales u horizontales, sin desprenderse (*Ver tabla 4.5 "proporciones de los materiales"*). El concreto lanzado se utiliza tanto para construcciones nuevas como para obras de reparación. Su empleo se adapta especialmente para estructuras de concreto delgadas o de forma curva y para reparaciones superficiales. Las propiedades del concreto lanzado endurecido dependen mucho de la experiencia y habilidad del operador. El concreto lanzado tiene un peso volumétrico y una resistencia a compresión

similares a los de los concretos de resistencia normal y de alta resistencia, se pueden usar tamaños de agregados de hasta 19mm (3/4").

El concreto lanzado se puede producir mediante dos procesos: seco o húmedo. En el proceso seco una premezcla de cemento y agregado húmedo es propulsada a través de una manguera por medio de aire comprimido hasta una boquilla. En ella se agrega agua a la mezcla de cemento y agregado y los ingredientes íntimamente mezclados se proyectan sobre la superficie. En el proceso húmedo todos los ingredientes se encuentran premezclados. El aire comprimido transporta la mezcla a través de la manguera hasta la boquilla. En la boquilla se aplica una cantidad adicional de aire comprimido para aumentar la velocidad, momento en el cual la mezcla se proyecta sobre la superficie (Ref. 4 y 5).

EL CONCRETO LANZADO PRESENTA LAS SIGUIENTES VENTAJAS:

- 1.- No se requiere de cimbras en este tipo de trabajos.
- 2.- El tiempo requerido para la colocación del concreto es mínimo.
- 3.- Para la colocación del concreto solamente se requiere de una cuadrilla pequeña de trabajadores.
- 4.- El costo que los trabajos implican es relativamente bajo.
- 5.- Con los recientes desarrollos en la tecnología del concreto lanzado y con adecuados programas de control de calidad, se puede lograr una buena reparación.
- 6.- El concreto lanzado se puede aplicar en zonas de marea, en donde inmediatamente después de su aplicación, el concreto fresco es sujeto a fuertes corrientes de agua sin sufrir deslave o desprendimiento de los materiales.
- 7.- El concreto lanzado tiene la capacidad de poder ser colocado en capas de 120 mm de espesor en una sola pasada y sobre una superficie vertical, sin sangrado de lechada ni desprendimiento de los materiales.

Es importante señalar que con éste método, es difícil obtener las dimensiones originales del elemento reparado, y el factor que frecuentemente limita su uso es el inadecuado acceso al lugar. Además, la mayoría de los diferentes tipos de concreto lanzado, (ya sean de concreto simple, de concreto reforzado con fibras de acero o con malla) cuando se unen a grandes áreas de concreto viejo o roca, presentan contracciones por secado y por lo tanto agrietamientos.

PROCEDIMIENTO DE REPARACION PARA MUROS CON CONCRETO LANZADO:

A) El primer paso y quizás el más importante, es la preparación de la superficie existente, por lo que se deberá realizar una limpieza a detalle y además, se deberán desprender y retirar las capas de concreto en mal estado, así como toda aquella materia orgánica que se encuentre adherida a la superficie del concreto.

Para muros de grandes áreas y expuestos en medios agresivos, se recomienda remover el concreto deteriorado a una profundidad mínima de 4 cm y en las zonas en las que el concreto descubierto muestre aún deterioro, se deberá remover a una profundidad mayor. Además, se deberá proporcionar una superficie rugosa en el

concreto viejo para que exista una adecuada adherencia entre el concreto nuevo y el concreto viejo.

B) Instalación de un sistema de anclaje, el cual ayudará a que el concreto viejo trabaje monolíticamente con el concreto nuevo. El anclaje se lleva a cabo realizando perforaciones en el concreto viejo y ahogando posteriormente varillas en dichos agujeros.

Las perforaciones deben ser de un diámetro de 50 mm y deben realizarse con una inclinación de 15° con respecto de la horizontal. Esto último para permitir que la lechada pueda fluir hacia el agujero y por lo tanto llenar completamente los huecos entre la varilla y el concreto, además, esta inclinación en el sistema de anclaje permite una mayor resistencia a la tensión, ya que se forma una cuña en el concreto viejo.

El diámetro y longitud de las varillas a utilizar, dependerá de las necesidades estructurales de la obra.

Para el relleno de las perforaciones se recomienda utilizar un mortero tixotrópico para reparación, el cual está realizado a base de cemento y fibras sintéticas. Este tipo de mortero ofrece un rápido desarrollo de resistencia, alta resistencia mecánica, gran adherencia, es impermeable y no es corrosivo.

C) Posteriormente se procede a colocar una malla de acero sobre la superficie del concreto y se sujeta dicha malla con las anclas ya instaladas. Para una mejor trabajabilidad de la malla se deben colocar placas de acero en cada una de las anclas y de esta manera impedir que exista deslizamiento entre la malla y la varilla del ancla (*ver fig 4.6*).

D) Finalmente se procede a lanzar el concreto contra la superficie a reparar. Se deberá tener cuidado en que el espesor del mismo sea uniforme, excepto en los lugares en donde se localizan las anclas, ya que allí se deberá proporcionar un espesor mayor para proteger de la corrosión a las varillas que forman las anclas (*ver "detalle A" en la fig. 4.6*).

TABLA 4.5

PROPORCIONES DE LOS MATERIALES QUE INTERVIENEN
EN LA MEZCLA PARA CONCRETO LANZADO:

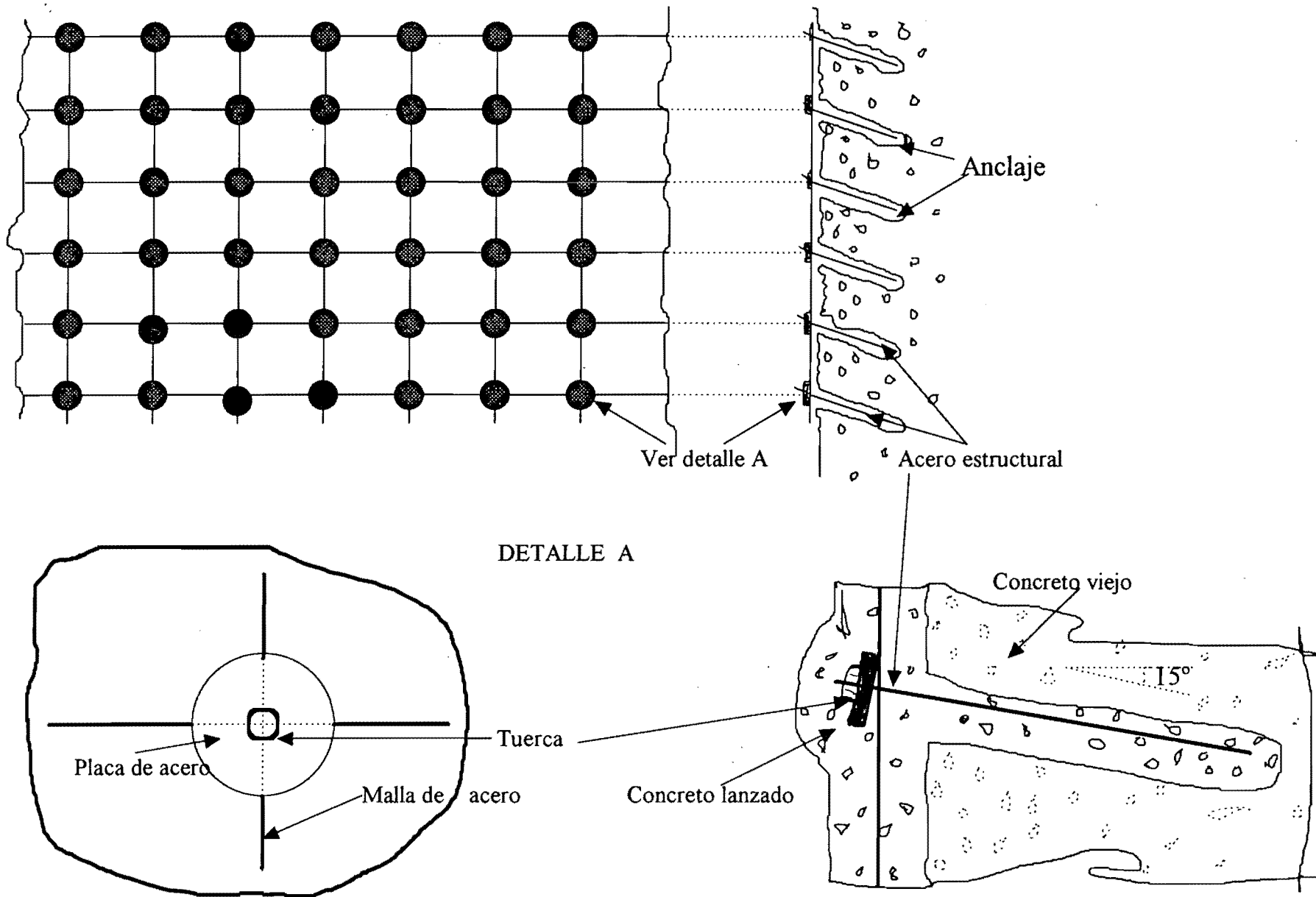
Contenido de aire al momento de la colocación: $7 \pm 1\%$

Revenimiento: 8 ± 2 cm

f_{cr} = Resistencia media requerida

MATERIAL	PROPORCION APROXIMADA (kg/m ³)
Cemento portland normal	400
Humo de sílice	56
Grava	460
Arena	1100
Agua	180
Aditivo reductor de agua	2 lt
Aditivo superfluidificante	7 lt
Aditivo inclusor de aire	El que se requiera
Fibras de acero (en caso de requerirse)	60

FIG. 4.6 Vista general de la disposición de la malla y el anclaje.



PRUEBA PARA COMPROBAR LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

LANZADO:

En caso de requerirse especímenes para comprobar la resistencia se deberá proceder de la manera siguiente:

A) La mezcla es lanzada hacia una caja de madera (aproximadamente de 1 x 1m de base y 40cm de espesor) por el mismo procedimiento con el cual se reparó la superficie.

B) Se extraen corazones de concreto de la muestra anterior y se ensayan a compresión a los 28 días.

REFERENCIAS

1. **H. KOSMATKA, Steven y C. Panerese William**
Diseño y control de mezclas de concreto
IMCYC
México, D.F. 192
p. 213
2. ACI544.1R
State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete
3. ASTM C 995 y ASTM C 1018
4. **H. KOSMATKA, Steven y C. Panerese William**
Diseño y control de mezclas de concreto
IMCYC
México, D.F. 192
p. 211
5. ACI 506R-85. ACI Committee 506 Report
Guide to Shotcrete
1985

CONCLUSIONES

Es una realidad, que la mayoría de las estructuras de concreto localizadas en ambiente marino, presentan deterioros considerables a simple vista, es decir en la zona atmosférica, por lo que, es indispensable analizar a fondo dichas estructuras para así poder dictaminar si se requiere o no de su reparación.

Por lo anterior, el ingeniero o constructor profesional, deberá conocer a fondo los procedimientos a seguir en cada una de las etapas que involucran la reparación de una estructura de concreto, sin confundir un proyecto de obra nueva con un proyecto de reparación. Cabe mencionar que los trabajos a realizar son en gran parte bajo del agua, por lo que los técnicos involucrados en el proyecto trabajarán en condiciones más desfavorables que cuando trabajan sobre la superficie del terreno.

Es deseable en este tipo de trabajos, que el ingeniero a cargo de los trabajos además de tener los conocimientos técnicos, también tenga una capacitación y habilidad para poder ser él quien realice los trabajos. Esto es, porque el personal que realice la inspección debe saber interpretar correctamente lo que se observa en los elementos de concreto dañado y así, posteriormente, poder tomar las decisiones más adecuadas en el proceso de elección del tipo de reparación.

Tomando en cuenta que el transporte marítimo es un medio indispensable en la economía de nuestro país y que, como cualquiera de los transportes, también requiere de buena infraestructura, el ingeniero deberá planear y proporcionar un adecuado y frecuente mantenimiento a las estructuras de concreto. Al respecto, se debe siempre tener presente que, los costos que representan las inspecciones y mantenimientos son mucho menores que cuando no se proporcionan y en cambio se tienen que realizar reparaciones costosas que en determinado momento pudieron haberse evitado. Otra ventaja que se puede obtener cuando se proporciona a las estructuras de concreto una adecuada inspección y mantenimiento, es que las estructuras pueden seguir ofreciendo su servicio sin interrupciones y sin poner en riesgo la vida de las personas.

Aún cuando la acción de prevención (inspección y mantenimiento) es sin lugar a dudas mucho más importante que la reparación, existen siempre ciertos factores que de manera directa o indirecta causan la degradación del concreto. Dichos factores pueden ser principalmente la propia edad de la estructura, la agresividad del medio, el tipo de cargas a las que está sujeta la estructura, etc. En estos casos, el ingeniero debe tener la capacidad técnica para poder prevenir los posibles daños que a futuro se puedan presentar en la estructura, y por otro lado, las autoridades correspondientes deben apoyar las decisiones correctivas o de prevención que el ingeniero considere pertinentes, para así de esta manera controlar y evitar que el daño continúe sobre la estructura.

Finalmente, el éxito de la reparación de estructuras de concreto, radica principalmente en la adecuada integración de las etapas del proyecto y de la acertada selección del personal y equipo técnico.

BIBLIOGRAFIA

MARSHALL, A. L.

Marine Concrete

Ed. Van Nostrand Reinhold

New York, E. U.

1990

401 p.p.

MALHOTRA, V.M

International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment

ACI

1980

MALHOTRA, V.M

International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment

ACI

1988

NEVILLE, A. M.

Tecnología del concreto

Tomo 1 IMCYC

Ed. Limusa

México D. F.

1988

401 p.p.

NEVILLE, A. M.

Tecnología del concreto

Tomo 2 IMCYC

Ed. Limusa

México D. F.

1988

NEVILLE, A. M.

Tecnología del concreto.

Tomo 3 IMCYC

Ed. Limusa

México D. F.

1988

PORTLAND CEMENT ASOCIATION

Proyecto y control de mezclas

Ed. Limusa

México D. F.

1978

163 p.p.

GEYMAR, G. W.

Repair of concrete in tropical marine environment

ACI - SP - 65

1980

IRWING, R. W.

Repair of concrete structures in marine environment

Concrete construction

vol. 27

New Zealand

Abril 1983

PINDTER Vega, J.

La importancia del concreto en las obras marítimas y portuarias de México

3er Congreso Nacional del Concreto

Acapulco Gro.

México 1994

H. KOSMATKA, Steven y C. Panerese William

Diseño y control de mezclas de concreto

IMCYC

México, D.F. 192

230 p.p.

COTTIER Caviedes, Juan Luis

Patología en las obras

Construcción y Tecnología vol. IV No. 40

IMCYC

Méx. D.F. 1991

41 p.p.

POPOVICS, Sandor

Inspection of the engineering condition of underwater concrete structures

Technical Report REMR - CS 9

E.U. 1989

81p.p.

METHA, P. K.
Concrete: Structure, Properties and Materials
Ed. Prentice-Hall
1986
p. 159

GERWICK, B. C.
Design of Offshore Concrete Structures
Ed. Wiley Interscience Publication
1986

MALHOTRA, V.M.
Mechanical Properties and Freeze-Thaw Resistance of Condensed Silica Fume
Concrete.
ACI SP-91 Vol. 2
1986
p. 1069-1094

CASTRO, P.
Corrosión en estructuras de concreto reforzado
Rev. Construcción y Tecnología
Abril 1996
IMCYC
38 p.p.