



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

MANUAL PARA EL DISEÑO Y CONTROL DE LA CALIDAD DEL
CONCRETO HIDRÁULICO, UTILIZADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE
ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN OBRAS PORTUARIAS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
VERALUCÍA MEDINA ARANA

TUTOR PRINCIPAL
ING. HÉCTOR JUVENCIO LÓPEZ GUTIERREZ

Ciudad Universitaria, CD. MX. enero 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Mendoza Escobedo Carlos Javier

Secretario: Ing. Mendoza Sánchez Ernesto René

1^{er} Vocal: Ing. López Gutiérrez Héctor Juvencio

2^{do} Vocal: M.I. Narcia Morales Carlos

3^{er} Vocal: Ing. Vírelas Martínez Carlos Enrique

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

ING. LÓPEZ GUTIÉRREZ HÉCTOR JUVENCIO

FIRMA

DEDICATORIA

A Dios

Por permitirme llegar hasta aquí y brindarme todo aquello que sin saber he necesitado para cumplir cada una de mis metas.

A mi esposo

Alberto Renán Ancona Lazcano, por apoyarme de manera incondicional en todo lo que hago, motivarme a seguir creciendo de manera profesional y brindarme todo su amor a lo largo de estos años.

A mi hijo

Alberto Renán Ancona Medina, por ser mi motor para seguir adelante, ya que me da la fuerza necesaria para seguir superándome cada día.

A mi madre

Esperanza Arana Vásquez, por darme la vida y estar presente en cada paso que he dado a lo largo de toda mi formación personal y profesional.

A mi sensei

Rogelio Saldívar Reséndiz, por enseñarme las bases de lo que ahora soy y haber hecho con todos sus conocimientos que despertara en mi esta pasión por el concreto.

AGRADECIMIENTOS

Al *Ingeniero Héctor Juvencio López Gutiérrez*, por brindarme su apoyo a lo largo del desarrollo de esta tesis y compartir conmigo sus conocimientos para poder enriquecer su contenido, además de apoyarme en mi formación profesional.

A mis sinodales, *Ing. Carlos Enrique Virelas Martínez*, *M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo*, *Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez* y *M.I. Carlos Narcia Morales*, por los consejos y conocimientos brindados para mejorar este trabajo, por su participación y apoyo a lo largo de este proceso de formación profesional.

Al *M.I. Marco Tulio Mendoza Rosas*, por haberme guiado a lo largo de todo este proceso y brindarme su ayuda y apoyo siempre que lo necesité.

A *Elena Ramírez García* y a la *Sra. Irma García Varela*, por todo el cariño brindado a mí y mi familia durante estos años, por abrirnos las puertas de su hogar y darnos su apoyo de manera incondicional.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)*, por haberme brindado apoyo económico durante mis estudios de maestría.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México*, por haberme abierto sus puertas y darme una oportunidad para poder continuar con mi formación profesional.

CONTENIDO

1. Resumen	1
2. Aspectos preliminares de la investigación	2
2.1. Planteamiento del problema	2
2.2. Objetivos de investigación	3
2.2.1. Objetivo general	3
2.2.2. Objetivos específicos	3
2.3. Justificación	4
2.4. Alcance.....	5
3. Estado del arte.....	7
3.1. Generalidades	7
3.2. Elementos estructurales en obras portuarias	8
3.2.1. Componentes de un puerto	8
3.2.2. Los muelles	9
3.2.2.1. Clasificación de muelles por su estructura.....	9
3.3. Componentes del medio marino	11
3.3.1. Clima	11
3.3.1.1. Efectos del clima en el concreto	12
3.3.2. El Agua de mar y la salinidad	13
3.3.2.1. Efectos del agua de mar y la sal en el concreto.....	14
3.3.3. Organismos marinos	16
3.3.3.1. Efecto de los organismos marinos en el concreto.....	16
3.3.4. Presión hidrostática.....	17
3.3.5. Acción de las mareas	18
3.3.6. Oleaje.....	18
3.4. Zonas de exposición del ambiente marino	18
3.4.1. Zonas de atmósfera marina	19
3.4.2. Zonas de salpicaduras	19
3.4.3. Zonas de mareas	20

3.4.4.	Zona sumergida	21
3.4.5.	Zona enterrada.....	22
3.5.	Patologías del concreto armado en obras portuarias	22
3.5.1.	Corrosión del acero de refuerzo.....	23
3.5.1.1.	Efectos de la corrosión en el concreto reforzado	25
3.6.	Propiedades del concreto	25
3.6.1.	Propiedades físicas del concreto.....	26
3.6.1.1.	Propiedades físicas del concreto en estado fresco.....	26
3.6.1.1.1.	Trabajabilidad	26
3.6.1.1.2.	Fluidez y consistencia.....	27
3.6.1.1.3.	Segregación.....	27
3.6.1.1.4.	Exudación	28
3.6.1.1.5.	Cohesión.....	28
3.6.1.2.	Propiedades físicas del concreto en estado endurecido	28
3.6.1.2.1.	Porosidad.....	29
3.6.1.2.2.	Contracción.....	30
3.6.2.	Propiedades mecánicas del concreto.....	32
3.6.2.1.	Resistencia a la compresión	32
3.6.2.2.	Durabilidad	33
3.6.2.3.	Permeabilidad	33
3.7.	Normativa nacional.....	34
3.8.	Normativa internacional.....	41
3.9.	Especificaciones del proyecto	46
4.	Estudio de caso	49
4.1.	Características del proyecto	49
4.2.	Análisis de la información:.....	57
5.	Manual de control de la calidad	62
5.1.	Ubicación del elemento y zonas de exposición	62
5.2.	Parámetro para el diseño del elemento.....	66
5.3.	Proceso constructivo del elemento.....	67

5.4. Parámetro para el diseño del concreto.....	68
5.5. Diseño de la mezcla	70
5.6. Proceso de producción del concreto	78
6. Conclusiones	82
7. Bibliografía.....	85
8. Anexos.....	89

1. RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realiza una revisión del estado del arte relacionada con el concreto utilizado para la construcción de elementos estructurales en obras portuarias, con la finalidad de identificar los factores que influyen en su calidad, desde el diseño de la mezcla hasta su disposición final.

Como resultado de esta revisión, se identifican las diferentes zonas de exposición a las que puede estar sometido un elemento estructural dentro de este tipo de obras, así como las características de cada una de ellas y cómo afectan estas condiciones en la calidad final y la durabilidad del concreto.

Al realizar la revisión de las normas nacionales e internacionales relacionadas con el tema, es posible identificar una falta de información en el marco normativo mexicano, ya que se cuenta con poca normatividad o manuales de referencia en los que se indique de manera específica las características y los parámetros de aceptación o rechazo que deben cumplir los concretos utilizados en este tipo de obras.

También se realiza la revisión del contexto actual del concreto utilizado para la construcción de obras portuarias, mediante el análisis de caso del proyecto: “Construcción de muelle pesquero en Chuburná, Yucatán”, a cargo de la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. En esta revisión, se identifican las oportunidades de mejora que se pueden tener relacionadas con las características del concreto utilizado, para aumentar la calidad final del elemento, y por consiguiente su durabilidad.

Como resultado de la investigación y con la finalidad de subsanar esta falta de información, se propone una metodología para el diseño y control de la calidad del concreto utilizado en la construcción de elementos estructurales de obras portuarias, en la que se incluyen, las características y recomendaciones para el diseño de la mezcla de concreto, los procedimientos y cuidados adecuados que se deben tener, durante el diseño, la fabricación, el manejo, la colocación y el curado, así como las pruebas de control de la calidad que deben realizarse para verificar su cumplimiento.

2. ASPECTOS PRELIMINARES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concreto hidráulico es una piedra artificial constituida por varios materiales en su mayoría áridos y un conglomerante que, en contacto con el agua, desarrolla propiedades de resistencia mecánica. Por ser un material de fácil manejo, juega un papel importante en la realización de proyectos de infraestructura a nivel mundial.

Con el paso de los años y la evolución de los procesos constructivos, se han desarrollado diferentes técnicas para la obtención de concretos especiales. Actualmente en México, existen concretos con características específicas como, alta resistencia, revenimiento elevado, tiempos de fraguado cortos, concretos amigables con el medio ambiente, algunos fabricados a base de materiales reciclados, etc. No obstante, cuando se habla de concreto diseñado y/o fabricado para la construcción de obras portuarias, la información disponible es muy limitada.

Además de la resistencia a la compresión, el factor que suele considerarse con mayor frecuencia al momento de especificar las características de los concretos para obras portuarias, es la resistencia a los sulfatos, debido al tipo de ambiente al que se sabe van a estar sometidos, sin embargo, el ataque causado por sulfatos es solo uno de los parámetros que deben tomarse en cuenta. En México, en el momento de diseñar y solicitar un concreto para este uso se hace omisión de características importantes, debido a la falta de información acerca de estas propiedades, pero sobre todo de una normatividad o documento técnico que las especifique.

Otro aspecto significativo para el adecuado desempeño de este material es su cadena de producción y los responsables de cada una de sus partes, ya que la calidad del concreto depende no solo materiales utilizado y de los fabricantes, sino también de todo el personal encargado de los procesos subsiguientes como: el transporte, la colocación y el curado. Es común que, en el momento de la colocación del concreto, solo se revise el revenimiento y se tomen muestras para la verificación de la resistencia a la compresión, dejando de lado características importantes para su aceptación y los procesos que deben de seguirse posterior a la entrega de este.

Por lo anterior, se comprende la importancia de establecer una metodología para el diseño y la revisión del concreto que va a ser utilizado en la construcción de obras portuarias, haciendo énfasis en el control de la calidad. Esta metodología se fundamenta en las normas nacionales e internacionales aplicables a concreto, así como en la información, estudios y pruebas de laboratorio reciente que existan sobre el tema.

Un documento con estas cualidades logrará una integración entre las partes involucradas en las etapas de producción del concreto, fomentando la adecuada transmisión del conocimiento e impulsando el abandono de hábitos de construcción deficientes.

2.2. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

2.2.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de esta investigación es realizar una revisión documental detallada de la normativa y estado actual de la información técnica, con la finalidad de elaborar un manual de control de la calidad del concreto utilizado en la construcción de elementos estructurales en obras portuarias. El contenido de dicho manual se centrará en los siguientes aspectos:

- Definir los requisitos y especificaciones técnicas para el diseño de mezclas de concreto que estarán expuestas a ambientes marinos, dependiendo del grado de exposición en el que se encuentren.
- Determinar los procedimientos y cuidados adecuados, así como las pruebas de control de la calidad que se deben realizar durante el diseño, la fabricación, el manejo, la colocación y el curado del concreto utilizado en obras portuarias.

2.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo principal mencionado, se deberán cumplir los siguientes objetivos particulares:

- Revisión del estado del arte.
- Estudio de las características de las zonas de exposición en las que se puede encontrar el concreto en obras portuarias.
- Determinar los efectos del ambiente marino en este tipo de concretos.
- Revisión de las normas nacionales e internacionales aplicables al concreto utilizado en obras portuarias.
- Evaluación del contexto actual de las características de los concretos utilizados en obras portuarias y los procesos de control de calidad utilizados.
- Determinar las características y recomendaciones para el diseño de mezclas de concreto utilizado en obras portuarias de acuerdo con la zona de exposición en la que se encuentren.
- Determinación de la metodología a seguir para el diseño del concreto en obras portuarias, incluyendo, la revisión de la calidad, haciendo referencia a la normativa de la SCT durante:
 - El diseño.
 - La fabricación, el transporte.
 - La colocación y el curado.

2.3. JUSTIFICACIÓN

Para el caso de concretos cuyo uso se limita a las obras portuarias, se encuentra disponible tres tipos de información:

- a) Aquella que se refiera a la calidad del concreto, independientemente de su uso,
- b) Estudios acerca de la durabilidad del concreto expuesto a ambientes agresivos y
- c) Patologías presentes en el concreto expuesto a ambientes agresivos.

En el caso de la calidad del concreto, la información disponible detalla los requisitos necesarios y las pruebas que deben realizarse para verificar la calidad de manera general. Por otro lado, los estudios sobre la durabilidad del concreto expuesto a ambientes agresivos al igual que la información existente sobre patologías del concreto incluyen recomendaciones para el mantenimiento y la medición del grado de daño que presentan este tipo de estructuras. Si bien estos estudios han sido de gran utilidad, se han limitado simplemente a indicar que: “el concreto utilizado para la fabricación de elementos estructurales en obras portuarias, debe cumplir con la calidad necesaria” pero, no se indica cuáles son los parámetros para determinar que un concreto cumple con la calidad para ser utilizado en este tipo de obras, aunado al hecho de que la documentación con la que se cuenta es limitada, dispersa y no contiene datos estandarizados, lo cual genera un vacío de información que perjudica el proceso de fabricación del concreto.

El presente documento sirve entonces como un medio unificador de la información disponible relacionada con el uso del concreto en obras portuarias, así como de las normativas aplicables y demás especificaciones adicionales, donde las personas involucradas en alguno de los procesos, como los diseñadores, operadores, ingenieros y supervisores (laboratorios) puedan encontrar de manera inmediata, ordenada y precisa, todos los aspectos referentes al control de calidad del concreto destinado a este tipo de obras.

Por otro lado, este documento servirá como apoyo para la capacitación del personal involucrado en todo el proceso del concreto, los encargados de la cadena de producción, los diseñadores, dosificadores y transportistas principalmente en temas como:

- Características de los materiales.
- Parámetros de diseño.
- Recomendaciones para el manejo y transporte.

Desde la visión del constructor, encargado del buen uso, manejo y colocación del concreto, servirá el presente para la capacitación en temas como:

- Características del material.
- Revisión para la aceptación o rechazo.
- Recomendaciones para la colocación y curado.
- Especificaciones de laboratorio y control de calidad.
- Normativas aplicables.

El manual también servirá, a pesar de la información disponible al respecto, para la capacitación del personal encargado del control de la calidad en ambas cadenas, tanto la productiva como en la de uso y colocación, pues se tratan entre otros temas:

- Características del concreto y de sus materiales.
- Pruebas calidad de laboratorio.
- Pruebas de aceptación o rechazo.
- Solicitudes de información a los proveedores.
- Uso y manejo de normativas aplicables.

2.4. ALCANCE

El manual de control de calidad de concreto hidráulico para elementos estructurales utilizado en obras portuarias se realiza bajo las siguientes limitantes:

- Aunque el manual está enfocado en el concreto utilizado para la fabricación de elementos estructurales, las características y propiedades que debe tener el acero utilizado como refuerzo quedan fuera del alcance de este documento.
- No se toma en cuenta la elaboración de concreto de forma manual o dosificado por volumen. Solo se evalúa el fabricado con medios mecanizados. Se hace hincapié en este aspecto, debido a que es frecuente encontrar en la normativa vigente recomendaciones sobre la elaboración de concreto en forma manual.
- El concreto utilizado en la construcción de obras portuarias, presenta cierta similitud con el concreto que se emplea en las obras costa afuera. A pesar de ello, el uso del concreto en este tipo de obras no se especifica en este documento.
- El ambiente marino que se estudia, considera las afectaciones que causa al concreto la atmosfera marina, sin embargo, no son objeto de investigación: aquellos concretos que se utilizan en la construcción de edificaciones localizadas costa adentro.
- Aunque los daños causados a las estructuras de concreto de obras portuarias sometidas a diferentes agentes agresivos, está basado y fundamentado en reacciones químicas, esta información se analiza de manera generalizada, y desde el punto de vista de la ingeniería civil, sin considerar a fondo el punto de vista de profesionales de la química.
- Solo es objeto de estudio el clima cálido - húmedo y cálido - seco, debido a que es el clima predominante en los puertos en la República Mexicana.
- El manual está basado solo en información documental, por lo que no se realizan pruebas experimentales en laboratorio ni muestreos in situ.

- Están sujetas a revisión las siguientes etapas:
 - Características del elemento.
 - Selección de materiales (para la fabricación del concreto).
 - Diseño de mezclas de concreto.
 - Proceso de fabricación (dosificación).
 - Transporte.
 - Colocación.
 - Curado.
 - Supervisión del proceso.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. GENERALIDADES

El concreto es un material de construcción resistente, resultado de la mezcla de un conglomerante (generalmente cemento), arena, grava, agua y en algunos casos puede contener aditivos o materiales adicionantes con la finalidad de mejorar alguna de sus propiedades. Se trabaja en su estado semilíquido, por lo que puede adoptar casi cualquier forma. Después de su fraguado, adquiere propiedades de resistencia similares a las de una roca, por esta razón, ha sido utilizado desde épocas muy remotas en diversas construcciones, sin embargo, su uso en obras portuarias comenzó tan solo un poco antes del año 1900 y fue utilizado para la construcción de obras de defensa.

Se define al concreto hidráulico como: “una mezcla de agregados pétreos naturales, procesados o artificiales, cemento y agua, a la que además se le puede agregar algunos aditivos” (García L., 2008).

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, tiene como finalidad la unión de los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada, piedra machacada, pedrejón) creando una masa similar a una roca, (Steven H. et al,2004).

Dentro de la industria de la construcción, existe una gran variedad de concretos diseñados para fines muy específicos, ya sea por el tipo de obra que se va a realizar o por alguna propiedad que se requiera de este material.

Se cuenta con literatura relacionada con diversos tipos de concreto, a pesar de ello, cuando se habla de concreto para construcción de obras portuarias en México, este tipo de información es muy limitada. No obstante, en algunos países como Estados Unidos y España, por mencionar algunos, se cuenta con libros, normas, especificaciones técnicas, artículos e investigaciones relacionados con el tema.

El Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones – IECA en su guía técnica titulada “*Hormigón en Ambiente Marino*” publicada en el año 2013, menciona la importancia del concreto en la construcción de estructuras portuarias, haciendo hincapié en que éste representa la mejor solución para fines de economía y de durabilidad. La información que contiene esta guía técnica está fundamentada en la clasificación de estructuras que realizó Valery M. Buslov (1983), quien identifica a las estructuras portuarias, de acuerdo con las funciones que desempeñan, ya que cada una de ellas está sometida a diferentes acciones medioambientales durante su vida de servicio, esta clasificación la realizó en función de las características de diseño más prominentes.

3.2. ELEMENTOS ESTRUCTURALES EN OBRAS PORTUARIAS

El termino de estructura portuaria se aplica a, instalaciones costeras de amarre y atraque, rompeolas y barreras de marea, diques secos, embarcaderos, así como a terminales de contenedores, y en alta mar a muelles flotantes y plataformas de perforación (Kumar P., 2003).

El Manual de dimensionamiento portuario de la SCT (2016), define a un puerto como, el lugar de la costa o ribera habilitado para la recepción, abrigo y atención de embarcaciones, compuesto por el recinto portuario y, en su caso, por la zona de desarrollo, así como por accesos y áreas de uso común para la navegación interna y afectas a su funcionamiento; con servicios, terminales e instalaciones, públicos y particulares, para la transferencia de bienes y/o transbordo de personas.

Otros autores, definen a un puerto como un conjunto de elementos físicos sobre los cuales se desarrolla una serie de actividades que permiten realizar trasvases y transferencias de cargas entre el mar y la tierra (Chapapría V., 2015). Los cuales, pueden ser clasificados de diferentes maneras, ya sea por su navegación, instalaciones y servicios, uso, ubicación geográfica, administración, con base a su estructura y geometría etc.

3.2.1. COMPONENTES DE UN PUERTO

Los puertos están compuestos por diferentes elementos físicos, los cuales, de acuerdo con El Manual de dimensionamiento portuario de la SCT (2016), se clasifican de la siguiente manera:

- *Obras exteriores*, también conocidas como obras en área de agua, se caracterizan por ser construidas en el mar, como son, rompeolas, escolleras, espigones, etc.
- *Obras interiores*, son las que se realizan en la zona terrestre de los puertos, como por ejemplo los canales y dársenas, las obras de atraque, las áreas de maniobras, zonas de almacenamiento, accesos y controles de las obras portuarias, también en esta clasificación se encuentran, los edificios administrativos y todas aquellas que sean necesarias para el funcionamiento del puerto.

Si bien la construcción de obras exteriores presenta un proceso de construcción complejo por ser directamente en el mar, este tipo de estructuras se realizan generalmente de rocas, naturales o artificiales de diferentes pesos y tamaños, algunas de ellas fabricadas a base de concreto, sin embargo, al no estar reforzadas con acero, las características, propiedades y tratamiento que debe de darse al concreto poseen ciertas variaciones respecto a las descritas en este trabajo de investigación.

3.2.2. LOS MUELLES

Dentro de las partes que componen un puerto, se encuentran las obras de atraque, las cuales, tienen como objetivo, establecer una zona de contacto entre el buque y la tierra, creando una superficie de paso de la mercancía entre la tierra y el mar, así como crear una zona terminal de los sistemas de transporte tanto terrestres como marítimos y una zona de almacenamiento de las mercancías. Dentro de las obras de atraque de un puerto, se encuentran los muelles, los cuales son estructuras conformadas principalmente por dos planos, uno vertical al que se adosan los buques, y uno horizontal a través del cual se realiza la manipulación de mercancía (Chaparría V., 2015).

Los muelles pueden clasificarse por el tipo de cargamentos que reciben, sin embargo, para fines de esta investigación se considerará la clasificación de los muelles de acuerdo a su tipología estructural, ya que, de esta dependen los elementos estructurales que lo componen, así como los procesos constructivos que intervienen.

Independientemente de la clasificación, todos los muelles están constituidos principalmente de tres partes.

- *Cimentación*: Elementos estructurales que, en conjunto tienen como fin la transmisión de las cargas de la estructura al suelo de manera uniforme.
- *Estructura*: Es la parte de un muelle destinada a conservar la forma del mismo, frente a las fuerzas actuantes, dichas fuerzas, son transmitidas a través de esta a la cimentación.
- *Superestructura*: Esta parte ofrece una línea de atraque continua y permite la transmisión y distribución de las cargas de uso y explotación sobre la estructura resistente.

3.2.2.1. CLASIFICACIÓN DE MUELLES POR SU ESTRUCTURA

a) Muelles con muros de contención.

Este tipo de estructuras soportan los esfuerzos producidos por el terreno, utilizando el peso propio de la estructura, por esta razón también son conocidos como muelles de gravedad. Básicamente, son estructuras de contención, que pueden ser construidos utilizando bloques de concreto simple prefabricado colocados uno sobre otro, o bien con cajones prefabricados. Este sistema es utilizado cuando se cuenta con un terreno estable a poca profundidad, (*ver figura 1 Muelle con muro de contención de bloques*).

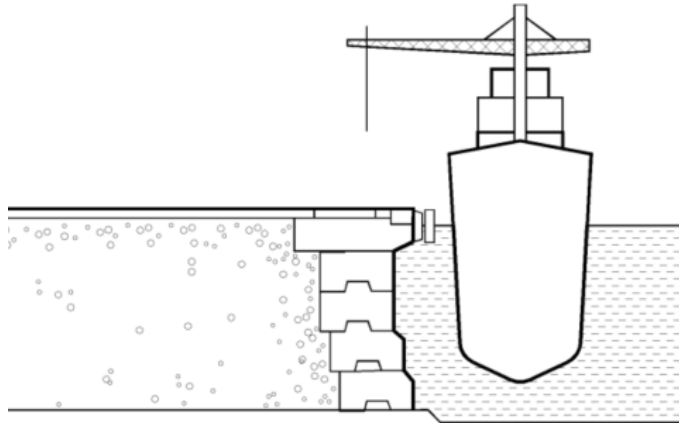


Figura 1 Muelle con muro de contención de bloques. Tomado del manual de predimensionamiento portuario, Dirección general de puertos -CGP y MM - SCT.

b) Muelles pantalla.

Reciben su nombre por estar formado por una estructura vertical que forma una pantalla, con el fin de contener el relleno de la parte trasera. Este tipo de muelles, puede estar construido por un sistema de tablestacado hincado o bien construir la pantalla a base de concreto. Para transmitir las cargas, se utiliza un sistema de empotramiento, el cual puede ser directamente al terreno, a otra pantalla trasera más corta que la frontal, o bien, a una viga colocada para este fin, (ver figura 2 Muelle con tablestacado anclado).

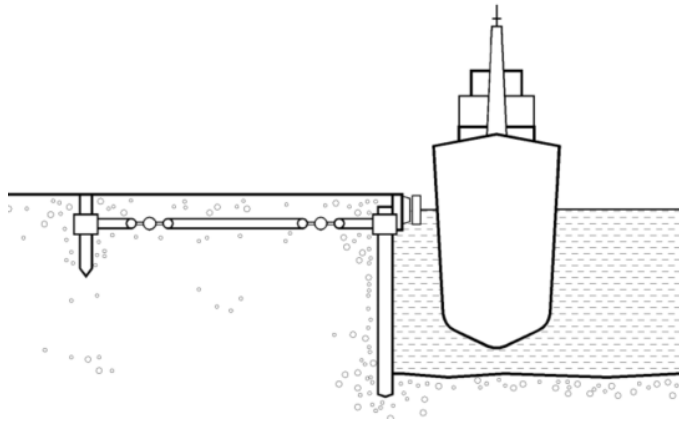


Figura 2 Muelle con tablestacado anclado. Tomado del manual de predimensionamiento portuario, Dirección general de puertos -CGP y MM - SCT.

c) Muelles con pilotes o pilas descubiertos.

Los muelles construidos a base de pilas o pilotes, son utilizados cuando los estratos de terreno resistente se encuentran a gran profundidad y se requiere un sistema de cimentación profunda. Este sistema puede ser fabricado in situ (pilas) o prefabricados (pilotes), (ver figura 3 Muelle con pilotes o pilas descubiertos).

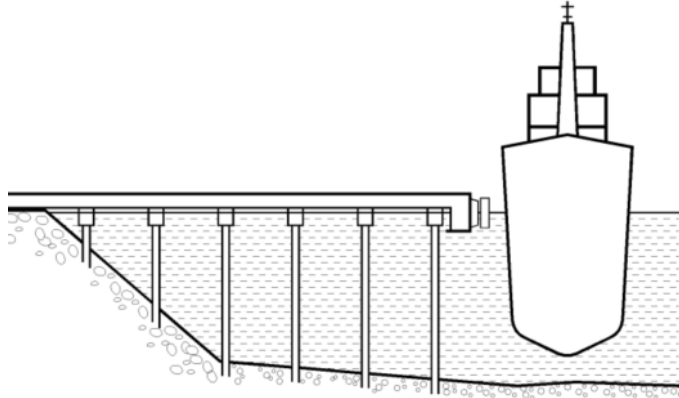


Figura 3 Muelle con pilotes o pilas descubiertos. Tomado del manual de predimensionamiento portuario, Dirección general de puertos -CGP y MM - SCT.

3.3. COMPONENTES DEL MEDIO MARINO

La vida útil de una estructura, puede estar determinada por diversos factores como, los parámetros para el diseño, las dimensiones propias de cada elemento, las características del proceso constructivo, los materiales que se utilizan para su construcción, etc. Sin embargo, existen otros factores importantes, los cuales hacen referencia a las condiciones de servicio, es decir a las características del medio ambiente a las que van a estar expuestas. Estas características, suelen ser muy variables y por consiguiente difícil de controlar.

Las condiciones medioambientales, estarán determinadas principalmente por la ubicación geográfica del elemento, ya que, se pueden encontrar en ambientes poco agresivos, es decir con características que no pongan en riesgo su durabilidad, sin embargo, también pueden estar expuestos a ambientes muy agresivos, lo cual afecta directamente su vida útil, debido a los efectos que este tiene sobre el elemento. Para estos casos, es necesario considerar características específicas de diseño, con la finalidad de postergar el mayor tiempo posible los efectos de daño que puedan presentarse.

Para poder identificar los agentes a los que las estructuras portuarias están expuestas, es importante mencionar la composición del ambiente marino, así como las afectaciones que se pueden tener ocasionadas por el grado de exposición en el que se encuentren.

3.3.1. CLIMA

Se define como clima al conjunto de condiciones atmosféricas y meteorológicas propias de un lugar, constituido por, la cantidad y frecuencia de lluvias, la humedad, la temperatura y los vientos (RAE, 2019). Las características del clima suelen ser muy variadas de una ubicación geográfica a otra, ya que este depende de diversos factores tales como, la altitud, la latitud, la influencia del mar y el relieve.

El clima, juega un papel importante en la vida útil de las estructuras, ya que las condiciones de este, pueden modificar las propiedades de los elementos, principalmente durante el

proceso constructivo y posteriormente, aunque de diferente manera durante el tiempo de servicio de las estructuras.

Los climas extremos o también llamados climas severos, suelen ser los que tienen mayores efectos negativos sobre el concreto, por lo que se deben de tomar diversas medidas precautorias cuando se construye en este tipo de climas.

3.3.1.1. EFECTOS DEL CLIMA EN EL CONCRETO

Se consideran como condiciones de clima extremo para el concreto, aquellas en las que por su presencia se ven afectadas las propiedades físicas y/o mecánicas de este, teniendo como principal factor de afectación a la temperatura, sin embargo, también se pueden presentar condiciones desfavorables con la presencia de, la humedad relativa y la velocidad del viento.

La temperatura puede modificar las propiedades del concreto en cualquiera de las etapas de la cadena de producción, ya sea, durante el proceso de fabricación, transporte, colocación y curado. Se considera como un factor de clima severo a la temperatura cuando esta, supera los 28 °C, o en caso contrario cuando es inferior a los 5°C. La temperatura ambiente y la temperatura del concreto, ideal para su manejo en estado fresco, debe oscilar entre los 15 - 20°C, ya que, bajo esta condición, este puede desarrollar sus propiedades dentro de los parámetros normales, (*ver figura 4 Condiciones de trabajo del concreto fresco de acuerdo con la temperatura ambiente*).

El fraguado del concreto es el resultado de una serie de reacciones químicas entre el cemento y el agua, dichas reacciones, son de tipo exotérmico, es decir que liberan calor durante su desarrollo, esta energía liberada se conoce como calor de hidratación. Cuando se llevan a cabo estas reacciones, se forman cristales microscópicos entrelazados en la superficie de la estructura, que tendrá como resultado un sistema similar a engranes unidos entre sí, estas reacciones dan origen al desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto. Cuando la temperatura se eleva durante el proceso de endurecimiento, la formación de cristales es más rápida, lo que favorece el desarrollo de la resistencia, sin embargo, por ser un proceso tan acelerado, se genera una estructura poco ordenada, ocasionando que la pasta de cemento se vuelva más porosa.

El concreto en estado fresco, cuando se trabaja en climas cálidos, presenta una mayor demanda de agua, debido a que esta se evapora de una manera más rápida, modificando las propiedades físicas del concreto, principalmente la pérdida de la trabajabilidad, lo que a su vez genera que se acelere el proceso de fraguado inicial y final. Cuando la temperatura ambiente pasa de los 20 a los 40°C el tiempo de colocación disminuye hasta un 50%. (Hermann K., 2001). El aumento del calor de hidratación acelera la pérdida de humedad, generando la presencia de grietas térmicas, también conocidas como grietas de contracción por secado, las cuales, son el resultado del cambio de volumen del concreto provocado por la pérdida del agua.

Si la temperatura ambiente y la temperatura del concreto en estado fresco sobrepasan de 20 a 30 °C, la resistencia a la compresión a 28 días se verá afectada de manera considerable, ya que se debilita en más del 10% debido a la cantidad de poros presentes en la estructura. Por esta razón, no es recomendable realizar trabajos con concreto en estado fresco cuando la temperatura sobrepasa los 35°C (Hermann K., 2001), (ver figura 4 Condiciones de trabajo del concreto fresco de acuerdo con la temperatura ambiente).

La temperatura de la superficie del mar en zonas tropicales puede llegar a los 30 °C, lo cual propicia que el proceso de inicio y progresión de deterioro del concreto se acelere, ya que esta es un factor importante para el crecimiento de organismos marinos. Los climas caluroso- seco, y caluroso-húmedo son considerados como los ambientes más agresivos para el concreto.

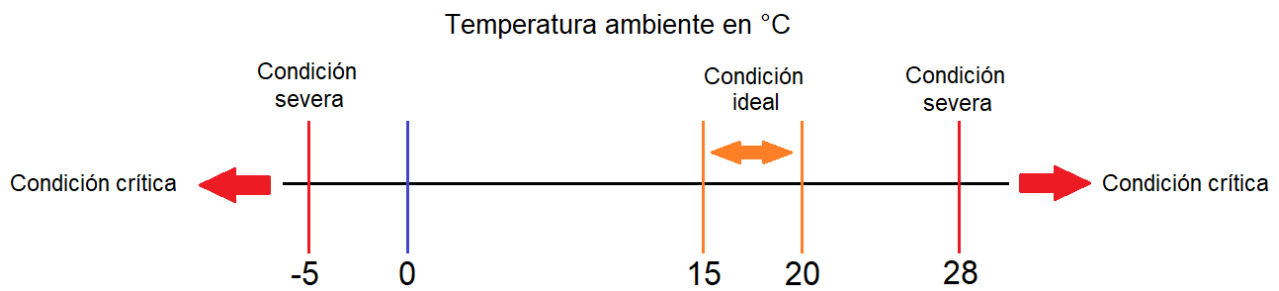


Figura 4 Condiciones de trabajo del concreto fresco de acuerdo con la temperatura ambiente

3.3.2. EL AGUA DE MAR Y LA SALINIDAD

Una constante de los elementos estructurales en las obras portuarias es, el contacto que estos van a tener con el agua salada, ya sea de manera total o parcial, dependiendo de la ubicación que estos tengan con respecto al mar.

Durante muchos años la madera, el acero y el concreto han sido considerados como los tres principales materiales en la construcción de elementos estructurales debido a sus características resistentes, sin embargo, el concreto armado ha sido desde hace ya algunos años la mejor opción para la construcción de obras portuarias, por su fácil manejo, su bajo costo y la resistencia que presenta ante los efectos del agua de mar y las condiciones de salinidad a las que van a estar sometidos.

El agua de mar está compuesta por diversos elementos, principalmente cloruros, sodio y sulfatos, las sales disueltas en ella, son electrolitos que forman una solución acuosa ionizada. Aunque las proporciones de estas sales varían de un mar a otro, en promedio el agua de mar contiene 3.5% en peso de sal, es decir 35 gramos por cada litro de agua. Por su elevada concentración de cloruros (más de 20,000 ppm), el agua de mar, destaca como medio ofensivo en su estado normal debido a que se favorece la corrosión del acero de refuerzo (Girón H., 1988).

Si bien, el concreto simple puede presentar daños al estar en un ambiente agresivo, el concreto armado expuesto a este tipo de condiciones presenta un deterioro mayor, el cual se ocasiona cuando los iones cloruro entran a la estructura por medio de los poros, favorecido por la presencia de grietas en la estructura y por el proceso de capilaridad, llegando hasta el acero que se encuentra en el interior, lo cual puede ocasionar procesos de degradación de la estructura. El acero embebido en los elementos de concreto armado pueden permanecer pasivo y sin daños durante largos períodos de servicio, dependiendo de la calidad que tenga el concreto con el que se construyó.

Los cloruros en el ambiente marino, no solo están presentes en el agua, también, la atmósfera cercana a la zona de costas, contiene diversas sales, ya que esta se forma a partir de la evaporación del agua de mar, recibiendo el nombre de niebla salina (Bermúdez M., 2007). A pesar de que la concentración de sales en ella es más baja, la niebla puede viajar varios kilómetros costa adentro afectando las construcciones que encuentre a su paso. Generalmente, los procesos de ataque físico-químico del agua de mar se manifiestan como fisuras del concreto o como pérdida de masa (Kumar P., 2003).

El uso del agua de mar como materia prima durante el proceso de fabricación del concreto armado, está restringido, así como su uso para el curado del mismo, ya que esta provoca la disminución hasta en un 15% la resistencia a compresión del concreto, debido a la alteración directa que genera en las reacciones químicas con el cemento.

El deterioro de las estructuras de concreto, causado por el contacto con el agua de mar, dependerá del grado de exposición en el que estas se encuentren, (*ver apartados 4.3.2.1 y 4.4 de este trabajo de investigación*), además de que este tipo de reacciones se ven favorecidas por el aumento de la temperatura y la cantidad de humedad en el ambiente.

3.3.2.1. EFECTOS DEL AGUA DE MAR Y LA SAL EN EL CONCRETO

El agua de mar es considerada como un medio agresivo para los concretos, debido a que, las sales presentes en ella afectan directamente la durabilidad del concreto ya que, por encontrarse disueltas, el acceso a la estructura se facilita incluso a grandes profundidades. Entre los principales deterioros que produce el agua de mar al estar en contacto con el concreto se encuentran los siguientes:

a) Disolución-lixiviación.

Se presenta cuando el agua disuelve los componentes del concreto principalmente el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 el cual en presencia del agua se vuelve soluble, degradando el revestimiento de la estructura, lo que produce una apariencia arenosa de la superficie expuesta. En presencia de grietas, la lixiviación puede llegar al interior del elemento y erosionarlo, incluso, si esta se presenta en concretos con gran cantidad de poros, puede llegar a disminuir la resistencia a la compresión.

En algunos casos cuando se produce el proceso de lixiviación en periodos de humedad y secado, los componentes de la cal disuelta forman depósitos blancos de sal sobre la

superficie del concreto llamadas eflorescencias, la probabilidad de que esta aparezca aumenta cuando la superficie del concreto presenta mayor cantidad de poros.

b) Reacciones de cambio de base.

Generalmente el pH del concreto tiene un valor promedio de 12.5 (Girón H., 1988), sin embargo, cuando se encuentra en contacto con el agua de mar, su valor se reduce, debido a la presencia de diversas sustancias, principalmente dióxido de carbono (CO_2). El CO_2 penetra en el concreto a través de los poros capilares, provocando que se genere una capa carbonatada que aumentara de manera gradual con el tiempo, a este proceso se le conoce como frente de carbonatación, lo cual propicia la degradación del concreto y la pérdida de resistencia. Cuando el pH del concreto que se encuentra rodeando al acero alcanza un valor de 9, la capa de óxido protector pierde su estabilidad termodinámica, lo cual desencadena el proceso de corrosión del acero, debido a que la alcalinidad del concreto protege al acero de la corrosión. El CO_2 , no solo se encuentra presente en el agua de mar, este compuesto, también se encuentra de manera natural en el aire.

c) Cristalización de sales insolubles y sales expansivas.

La exposición a la intemperie con presencia de sales ocurre no solo como consecuencia del rociado directo por agua de mar, ya que también puede ocurrir con la sal que es llevada por medio del aire, la cual, se deposita sobre la superficie del concreto. Con el aumento de la temperatura ambiente, el agua pura se evapora de la superficie de las estructuras, dejando cristales de sal, los cuales, cuando se vuelven a mojar causan deterioro. En este tipo de reacción se encuentran presentes los sulfatos, los cuales, atacan y destruyen el concreto. Se favorece la propagación de las sales en la estructura del concreto, cuando este no es diseñado de una manera adecuada, (Irassar E. et al, 2010), (*ver figura 5 Condiciones para que exista el daño por cristalización de sales*). La cristalización de sales, es considerado como uno de los mecanismos de alteración más importante y agresivos que puede sufrir el concreto, ya que este tipo de reacciones crean presiones lo suficientemente fuertes para romper la pasta de cemento, dando como resultado la desintegración del concreto, así como la pérdida de cohesión y de la resistencia.



Figura 5 Condiciones para que exista el daño por cristalización de sales, en donde HR es la humedad relativa. Modificado de Irassar E. et al, 2010.

3.3.3. ORGANISMOS MARINOS

Cuando se habla del deterioro de las estructuras de concreto expuestas al medio marino, es importante tener en cuenta los factores ambientales y atmosféricos, sin embargo, también deben de considerarse los factores biológicos, debido a que estos juegan un papel importante en la degradación del concreto, por la interacción que tienen de manera directa con la estructura del concreto, lo cual provoca que se modifiquen sus propiedades físicas y químicas.

Dentro de este tipo de entornos, se encuentra una gran variedad de organismos vivos que causan deterioro en el concreto principalmente la pérdida de alcalinidad en la superficie de la estructura, debido a la cantidad de ácidos que estos generan, teniendo como principal consecuencia la aparición de corrosión en el acero. Cuando la superficie de la estructura es porosa, estos daños se intensifican de manera considerable.

Debido a que el crecimiento marino está motivado por la temperatura, el oxígeno, el pH y las condiciones de luz, este crecimiento se limita aproximadamente 20 m desde la superficie del agua de mar, (Kumar P., 2003).

3.3.3.1. EFECTO DE LOS ORGANISMOS MARINOS EN EL CONCRETO

Los organismos presentes en el ambiente marino son un factor natural que favorece el deterioro de las estructuras de concreto, debido a la presencia de bacterias, plantas y hongos. Los factores ambientales como la temperatura y la humedad favorecen la presencia de este tipo de organismos.

Un ejemplo de los, efectos de deterioro en el concreto causado por organismos marinos es, la biodegradación, la cual se lleva a cabo por medio de un proceso químico que puede realizarse de manera aeróbica o anaerobia, provocando la disolución del concreto, influenciada principalmente por la presencia la luz, oxígeno y agua. Este proceso se presenta mayormente en zonas que se caracterizan por la ausencia de corrientes de agua. Los metabolismos biológicos como la degradación del plancton, consume el oxígeno presente. Debido a la falta de circulación del agua, el oxígeno no puede realimentarse y va siendo reemplazado por ácido sulfúrico producto de la descomposición de la materia orgánica, ocasionando que este ácido comience a acumularse. El ácido sulfúrico, se transforma en sulfatos por el proceso de oxidación de algunas bacterias. La putrefacción de la biomasa provoca que el dióxido de calcio comience a acumularse en el concreto endurecido, lo que favorece la formación de bicarbonato de calcio, el cual, por ser soluble en agua, produce pérdida de sección de la estructura del concreto.

Algunas bacterias presentes en las zonas costeras, industriales y en áreas de desagües, producen ácidos dañinos para el concreto. Para que estas sobrevivan es necesario contar con un pH menor de 7, lo cual generalmente ocurre con la presencia de gas metano e hidróxido sulfuroso productos de la fermentación de las aguas negras. Cuando estos gases reaccionan con el dióxido de carbono se forman carbonatos y sulfatos de calcio. El

ácido sulfúrico reacciona con la cal del cemento lo que provoca la disminución hasta de 2.5 partes del cemento. Debido a la presencia de clima cálido, este proceso puede llegar a incrementarse al doble degradando de una manera muy agresiva el concreto.

En las zonas costeras con climas calurosos es común la presencia de ciertas especies de moluscos y animales vivos, los cuales causan problemas de deterioro y degradación del concreto, debido a los ácidos que producen, el cual, ataca directamente el calcio presente en las estructuras, produciendo perforaciones sobre los elementos, en algunos casos se ha tenido un desgaste por erosión hasta de 1 cm por año. Generalmente, estos orificios no son de gran tamaño, sin embargo, en algunas ocasiones, pueden llegar hasta el acero embebido en las estructuras, permitiendo el acceso directo del agua de mar, dando origen a la corrosión. Algunas otras especies se adhieren a la estructura, en las que además de afectar su durabilidad, contribuyen al aumento de la superficie de contacto, así como del peso de la estructura.

El manual de inspección de plataformas marinas de PEMEX (2001), clasifica a los crecimientos marinos en duros y blandos. Los crecimientos marinos duros, son aquellos organismos densos y firmemente unidos a la subestructura, como por ejemplo el coral. Los crecimientos marinos blandos, están conformados por las esponjas, algas marinas, anemonas y otros organismos, que se caracterizan principalmente por tener una densidad similar a la del agua. El daño que causan se produce principalmente por el crecimiento de la masa de las estructuras, debido a su acumulación en ellas, aunque algunas algas pueden aumentar la velocidad de degradación del concreto debido a la acción de los ácidos orgánicos y sulfatos producidos en la descomposición de la vegetación.

3.3.4. PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Se define a la presión hidrostática, como la fuerza que un fluido ejerce por su peso cuando se encuentra en reposo. Un cuerpo, puede estar sometido a presión hidrostática de dos maneras diferentes, la primera, es causada por contener un líquido, debido a que las fuerzas producidas por este actuarán directamente sobre las paredes que lo contienen. La segunda manera, se produce cuando un cuerpo es sumergido en el fluido y las presiones del agua actuarán sobre su estructura. Si el empuje es mayor al peso del cuerpo, este flotará, en caso contrario se hundirá. Los empujes producidos por el fluido, actuarán sobre la superficie de la estructura que esté en contacto directo con él. El valor de los esfuerzos ejercido va a ser directamente proporcional a la profundidad de inmersión, es decir a mayor profundidad, el valor de la presión hidrostática aumentará.

Independientemente del valor de los empujes que el agua ejerce sobre la estructura y la resistencia que esta debe poseer para ser capaz de soportarlos, en las obras portuarias la presión hidrostática actúa como una fuerza adicional que provoca que el agua de mar intente entrar a la estructura del concreto. Debido al efecto de capilaridad del concreto y por ser un material absorbente, cuando se encuentra en contacto con el agua, esta comenzará a entrar a su estructura a cierta profundidad, la cual, estará determinada por

las propiedades del concreto, sin embargo, cuando se tiene la presencia de presión hidrostática el agua puede penetrar a una profundidad mayor, incluso llegar hasta el acero embebido causando deterioro, principalmente de corrosión. Estos daños se incrementan cuando el concreto tiene una estructura porosa, ya que el ingreso de los agentes nocivos se acelera.

3.3.5. ACCIÓN DE LAS MAREAS

Otra causa de deterioro en las estructuras portuarias es el fenómeno conocido como marea. La cual consiste en movimientos periódicos de ascenso y descenso del agua de mar, producida por las fuerzas de atracción gravitatoria ejercida por el sol y la luna en la superficie de la tierra. Las mareas no sólo implican un movimiento ascendente y descendente del agua, sino que al subir o bajar este nivel, se producirán también movimientos horizontales que se conocen como corrientes de marea (Mederos L., 2009).

Los efectos de las mareas en las estructuras portuarias, radican principalmente en la exposición de esta a ciclos de humedecimiento y secado, cuando esto sucede, al agua del mar se evapora en la superficie de la estructura, dejando depósitos de sal. Como ya se mencionó anteriormente, las sales en la superficie generan daños en el concreto, ejemplo de ello son las fisuras que permiten la entrada de los componentes del agua de mar al interior de la estructura, llegando al acero de refuerzo dando lugar a la generación de la corrosión, la cual, afecta directamente la durabilidad del concreto.

3.3.6. OLEAJE

Otro aspecto que se debe considerar en el diseño de las obras portuarias es la presencia del oleaje. El cual consiste en movimientos ondulatorios generados por los efectos del viento de manera horizontal en la superficie del mar. Existen diferentes tipos de olas y sus características varían de una costa a otra.

El principal deterioro generado por la acción del oleaje es la erosión de la estructura, lo cual es debido a los sólidos en suspensión (arena, gravillas) que estas transportan. El grado de daño dependerá de la cantidad de material sólido que transportan, tamaño de las olas y la frecuencia con que se presentan.

3.4. ZONAS DE EXPOSICIÓN DEL AMBIENTE MARINO

Como toda construcción, los puertos están compuestos de cimentación, estructura y superestructura como se menciona en el *apartado 4.2 de este proyecto de investigación*. Lo que da lugar a que los elementos estructurales que conforman un puerto, se encuentren sometidos a diferentes condiciones de exposición del ambiente marino, y, por consiguiente, cada uno de ellos posea características especiales de diseño. Es importante mencionar que un solo elemento puede estar sometido a una o varias de estas zonas de manera simultánea. Aunque no se cuenta con una delimitación específica para cada una de ellas, algunos autores hacen referencia a las siguientes zonas:

3.4.1. ZONAS DE ATMÓSFERA MARINA

El termino atmosfera marina, hace referencia al conjunto de gases presentes en el ambiente de las costas, mares y océanos, la cual se caracteriza por la constante presencia de humedad y agentes químicos como los cloruros de sodio y de magnesio, además de contener grades cantidades de sulfatos. La mayoría de los compuestos que la atmosfera marina contiene son dañinos para la estructura del concreto, principalmente SO₂ y el NaCl. El NaCl proviene de la evaporación del agua de mar y el SO₂ del empleo de combustibles sólidos y líquidos que contienen azufre, estos elementos, son arrastrados por el viento hasta las estructuras que forman parte de los puertos.

En esta zona el concreto no se encuentra en contacto directo con el agua de mar, por lo que no está sometido al proceso de humedecimiento ni saturación de agua, sin embargo, reciben las sales y agentes nocivos provenientes de la brisa y de la niebla marina. La sal puede ser llevada varios kilómetros tierra adentro, dependiendo en gran medida de la configuración de la costa y los vientos dominantes, sin embargo, la cantidad de ion cloruro y los contaminantes presentes en el aire, depende directamente de la distancia que la estructura tenga con respecto al mar, tanto de manera horizontal como de manera vertical, ya que conforme las sales viajan en el viento su concentración disminuye de manera gradual, por lo que después de unos cientos de metros de la orilla del mar, la salinidad suele ser menor.

Este tipo de exposición, genera daños en el concreto, debido a que las sales, cloruros y agentes dañinos presentes en la atmosfera marina penetran por medio de los poros en su estructura hasta llegar al acero embebido en él, lo que provoca que se pierda su pasividad de este y se desarrolle el proceso de corrosión. Un factor que favorece el ingreso de estos compuestos es la presencia de fisuras en la superficie de las estructuras, las cuales a su vez son generadas por la expansión de las sales cristalizadas en la superficie, rompiendo la estructura del concreto. La presencia de sales en la superficie, también es un detonante de la abrasión del concreto.

A pesar de los compuestos de la atmosfera marina y los daños que esta causa a las estructuras, es importante mencionar que el deterioro de los elementos de concreto se realizará de una manera más lenta en comparación con otras zonas de exposición, (*ver figura 6 Zonas de exposición en el ambiente marino*).

3.4.2. ZONAS DE SALPICADURAS

Se denomina así, al lugar localizado entre la altura máxima que alcanzan las olas y la línea superior de las mareas. Las estructuras que se ubican en esta zona, estarán sujetas a periodos de humedecimiento y secado debido al efecto que las olas tienen sobre ellas, sin embargo, la impregnación del agua, estará sujeta a diferentes factores, como, la altura que presenta el mar, ya que cuando este se encuentra en un nivel alto el humedecimiento aumenta de una manera considerable. Otro factor, es la presencia de viento el cual,

dependerá de las condiciones climatológicas presentes en el lugar, considerándose como un elemento crítico cuando este presenta velocidades altas.

Las salpicaduras sobre las estructuras provocadas por las olas, generan efectos nocivos en el concreto, debido a que, por la temperatura ambiente, el agua potable presente en el agua de mar, es evaporada, dejando impregnadas todas las sales en la estructura, es decir, durante los periodos de humedecimiento, se realiza la concentración, cristalización y deshidratación de sales, y posteriormente durante los periodos de secado, las sales en el interior del concreto se recristalizan. Debido a estos ciclos repetidos sobre las estructuras, la zona de salpicaduras es considerada como el área en donde el concreto sufre la mayor cantidad de daños por cloruros, la cantidad de humedad presente en el concreto mismo favorece su propagación, y permite que esta se realice de una manera más profusa.

La exposición constante de las sales en el concreto provoca que la porosidad aumente de manera considerable y por consiguiente la permeabilidad. La carbonatación del concreto, así como las grandes cantidades de oxígeno que están disponibles y la elevada humedad, incrementan el riesgo de corrosión del acero de refuerzo.

Es importante mencionar que, en esta zona, no solo se puede tener deterioro en las estructuras causado por la corrosión del acero activado por los cloruros, también se presenta el fenómeno de abrasión, causada por el oleaje, aunque las fuerzas con las que las olas golpean la estructura no son muy significativas, los sedimentos que estas transportan como arena y gravillas, con el paso del tiempo, pueden causar daños en la estructura, (*ver figura 6 Zonas de exposición en el ambiente marino*).

3.4.3. ZONAS DE MAREAS

Es aquí en donde se presentan las fluctuaciones del nivel mínimo y máximo del mar, causado por la variación de las mareas. Esta área, también recibe el nombre de zona de carrera debido al aumento y disminución de niveles del mar.

En este lugar, los efectos causados por la inmersión y emersión de las estructuras como resultado de las mareas, se manifiestan principalmente con una combinación de procesos físicos y químicos. Los procesos físicos tienen como consecuencia, la cristalización de sales en la superficie y la erosión de la estructura, mientras que los procesos químicos, generan reacciones entre las sales de agua de mar y el concreto. Durante la emersión de las estructuras, se incrementa la cantidad de oxígeno en la atmósfera, mientras que, en la etapa de inmersión, se facilita la penetración de cloruros en las estructuras. Por otra parte, en el concreto sumergido solo se produce un ataque químico causando su descomposición.

En esta zona, aunque el concreto está sumergido de manera cíclica cada día, el secado de la estructura se realiza solo de manera parcial, por lo que siempre está saturado, causando menos afecciones debido a la humedad presente, lo que provoca que los

cloruros viajen de una manera más lenta. Cuando se produce el secado del elemento de manera total, el mojado subsiguiente lleva los cloruros muy adentro del concreto acelerando el ingreso de iones cloruro. Por esta razón, el concreto de la zona de mareas en donde el período de secado es corto, es menos vulnerable a corrosión del acero que en el concreto en la zona de salpicadura.

Además de la corrosión del acero de refuerzo, que a su vez provoca la pérdida de masa y de sección de las estructuras, se puede generar abrasión en el concreto causada por el oleaje, así mismo se tiene la posibilidad de contar con crecimiento de organismos biológicos en las zonas que permanecen en constante humedad, (*ver figura 6 Zonas de exposición en el ambiente marino*).

3.4.4. ZONA SUMERGIDA

Como su nombre lo dice, es la zona que se encuentra inmersa de una manera total en el agua de mar, a diferencia de la zona de salpicaduras y de la zona de mareas, este lugar, se encuentra en estado de saturación de una manera permanente.

Debido a la humedad presente, el agua se propaga por la estructura con ayuda de la capilaridad, sin embargo, por el hecho de estar completamente sumergida, se presenta un factor adicional que favorece la entrada del agua a la estructura, el cual es, la presión hidrostática. A medida que la profundidad aumenta, la presión hidrostática también lo hace de una forma gradual, en el área sumergida que se encuentra próxima a la zona de mareas, esta ingresa al concreto por medio de la capilaridad, conforme la profundidad avanza, el agua se introduce en ella por medio de la presión.

La concentración de cloruros en esta zona es muy elevada, debido a la cantidad de humedad que está presente. Los cloruros, avanzan de una manera rápida y llegan a alcanzar grandes profundidades de la estructura, sin embargo, la cantidad de oxígeno presente es muy baja en comparación con la zona de mareas y la zona de salpicaduras, algunos estudios indican que debido a los niveles bajos de oxígeno, los valores de cloruros tolerables son 10 veces mayores para las fisuras sumergidas que para las situadas por encima de la superficie, por lo tanto, lo único que se puede producir es una corrosión negra o verde con productos poco expansivos y sin consecuencias, por lo que las estructuras sumergidas continuamente bajo el agua de mar no están sometidas a corrosión significativa. Es importante mencionar que, se considera ambiente pobre en oxígeno al situado a más de 1 metro por debajo del nivel del mar.

Cuando el concreto se encuentra completamente sumergido es común que se propicie el ataque de agentes químicos y el crecimiento de organismos biológicos, a pesar de que estos suelen ser dañinos para la estructura, en algunos casos, las algas en esta zona pueden mejorar la durabilidad debido a que su presencia se comporta como un sellador de la superficie del concreto, haciéndola menos permeable, y por consiguiente disminuyendo la entrada de agentes agresivos a su estructura, (*ver figura 6 Zonas de exposición en el ambiente marino*).

3.4.5. ZONA ENTERRADA

La zona enterrada, se localiza por debajo del lecho marino, en ella se encuentra la cimentación de la estructura. La profundidad, dependerá del tipo de elemento, debido a que su desplante se debe realizar en el estrato más resistente para garantizar la estabilidad de la construcción.

La presencia de humedad en esta zona es mayor, y por consiguiente la cantidad de sales, a pesar de ello, la poca presencia de oxígeno favorece a que el deterioro sea menor, por lo que esta zona es considerada como el lugar que puede presentar menos daños por ataque a la estructura del concreto, (ver figura 6 Zonas de exposición en el ambiente marino).

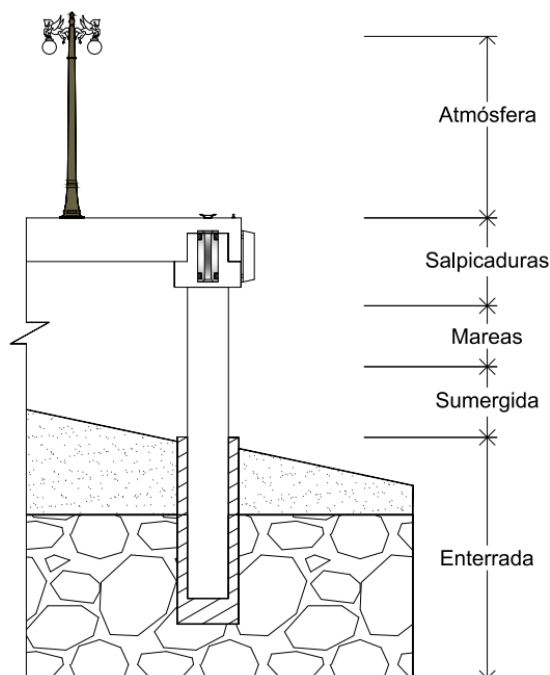


Figura 6 Zonas de exposición en el ambiente marino

3.5. PATOLOGÍAS DEL CONCRETO ARMADO EN OBRAS PORTUARIAS

Se entiende por patología del concreto, al estudio de los efectos causados por factores dañinos que modifican su comportamiento normal, así como el análisis de sus causas, consecuencias y sus posibles soluciones. Las patologías pueden tener un origen congénito, es decir, cuando los agentes agresivos están presentes en algunos de los materiales desde el momento de su fabricación, ya sea en el agua, los agregados, o bien, en los aditivos. Estos agentes dañinos, también, pueden ser adquiridos una vez que la estructura es puesta en servicio y/o durante el transcurso de su vida útil.

Como ya se mencionó anteriormente, las causas de estos efectos varían dependiendo de la zona de exposición en la que se encuentren los elementos y de las características propias del mismo. Un factor puede dar como resultado diversas patologías, así como una patología puede ser originada por diversos factores.

3.5.1. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

Se define a la corrosión como, la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce el deterioro del material y de sus propiedades (ASTM G15, 2007).

La corrosión es considerada como el deterioro más común en una estructura de concreto armado sometido a un ambiente marino, sin embargo, el ataque químico que se presenta, no es solo al concreto mismo, ya que también se ve afectado el acero de refuerzo, lo que causa daños en la estructura del elemento (Martínez R., 2010). Dentro de una estructura de concreto reforzado, el acero tiene la función de aportar las propiedades de resistencia a la tracción necesarias para el buen funcionamiento del elemento, sin embargo, cuando el acero se corroe, puede llegar a perder estas propiedades. Dependiendo del grado de deterioro que este alcance, la calidad de la estructura puede verse comprometida.

El acero embebido en el concreto se encuentra protegido de la corrosión debido a que el concreto, forma una barrera natural contra el agua y el oxígeno que se encuentran presentes en el ambiente marino. Los materiales de la mezcla, principalmente el agua y el cemento, forman una capa de óxido sobre la superficie del acero manteniéndolo pasivo por un largo periodo de tiempo, además, la alcalinidad del concreto ayuda a inhibir los procesos de corrosión del acero. El tiempo requerido para la generación de la capa pasiva del acero cuando este se encuentra embebido en el concreto es de siete días. (Poursae A. et al, 2007). La eficacia de esta protección, se encuentra en función de la calidad que tenga el concreto y del espesor del recubrimiento del elemento.

En el medio ambiente marino, los principales agentes agresivos que originan la corrosión del acero de refuerzo son los iones cloruro presentes en el agua de mar y en la atmosfera, los cuales se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento por medio de los poros del concreto hasta llegar al acero, los ciclos de humedecimiento y secado favorecen la aceleración de este proceso. Una vez dentro de la estructura, los iones cloruro reaccionan con el acero y destruyen la capa de óxido que lo mantiene pasivo, la superficie del acero se activa dando inicio al proceso de corrosión, conforme transcurre el tiempo de exposición, la composición química alrededor del acero se vuelve cada vez más corrosiva.

Normalmente se requiere un período de tiempo antes de que se inicie el proceso de corrosión. Tuutti Kyösti en su libro “Corrosión del acero en el concreto”, divide el proceso de corrosión en dos periodos. Los cuales se representan gráficamente en la (*figura 7 Secuencia de la corrosión del acero en el concreto*).

- Periodo de iniciación: Se define como el tiempo que tarda el agente agresivo en traspasar el recubrimiento, alcanzar el acero y provocar que se rompa la capa de óxido protectora que mantenía pasivo al acero. La duración de esta etapa, estará determinado, entre otras causas por, el grosor del recubrimiento y la permeabilidad que el concreto posea contra la sustancia que lo intenta penetrar.

- Periodo de propagación: El proceso de corrosión ha comenzado y los factores que determinan la velocidad de corrosión deciden la duración de esta etapa, debido a que, el deterioro se acumula de manera progresiva hasta que alcanza un nivel inaceptable. La velocidad de avance de la corrosión, estará determinada por diversos factores como: el contenido de humedad del concreto, la presencia de oxígeno, el grado de carbonatación, el contenido de iones cloruro, la temperatura alrededor de las áreas de corrosión, la homogeneidad del concreto, el espesor del recubrimiento, el medio ambiente, etc.

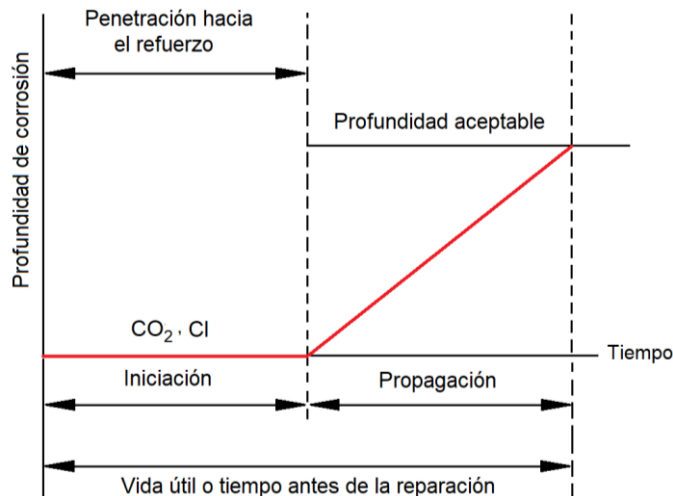


Figura 7 Secuencia de la corrosión del acero en el concreto. (Tuutti, K., 1982)

Cuando se habla de corrosión del acero de refuerzo, un factor importante que se debe considerar, es la carbonatación, ya que se considera como una de las causas principales de la corrosión, y por ende la segunda causa más común del deterioro debido al ataque producido por agentes químicos. (Martínez R., 2010).

La carbonatación en el concreto se produce por la pérdida del pH que ocurre cuando el dióxido de carbono reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral. Sólo se requiere una pequeña concentración de 0.03 por ciento de CO_2 para que ocurra la carbonatación (Montani R., 2000). El concreto, está casi siempre en contacto con el aire y la humedad, por lo que, dependiendo de la localización de la estructura, este puede estar expuesto a menores o mayores niveles de dióxido de carbono de la atmósfera. Si los valores del pH del concreto descienden hasta niveles de 9 o menos puede generarse la corrosión.

A pesar de que la carbonatación del concreto es un proceso lento, la velocidad de la penetración dependerá de la permeabilidad del concreto. La reacción de carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa en el concreto se encuentra entre 50 y 55 por ciento. Cuando la humedad es más baja, no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio, y por

arriba del 75 por ciento de humedad, la situación se revierte y los poros se bloquean progresivamente con agua (Montani R., 2000).

Existen diversos factores que influyen en el desarrollo del proceso de corrosión del acero de refuerzo, entre los cuales se encuentra: calidad del concreto con el que se fabrica el elemento, el uso que tenga la estructura y el entorno en el que es puesta en servicio. Estos factores influyen directamente en la durabilidad de la estructura ya sea de manera combinada o en forma aislada.

3.5.1.1. EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN EL CONCRETO REFORZADO

La corrosión en el concreto reforzado se desarrolla dentro de la estructura como un proceso en cadena, comenzando con la oxidación del acero de refuerzo, la cual, al alcanzar un grado de deterioro alto transmite dichas afecciones al concreto que se encuentra en el área circundante, generando daños en la adherencia que existe entre ambos materiales. La corrosión avanzada de una estructura, se manifiesta de manera externa con la presencia de manchas de óxido en la superficie del concreto, y de manera interna, con la presencia de óxido adicional al ya existente por la formación de la capa pasiva.

Con el avance de la corrosión, el óxido acumulado comienza a desprenderse de la superficie, provocando que la sección transversal del acero de refuerzo disminuya, si el proceso de corrosión sigue avanzando llegará un momento en el que el acero de refuerzo desaparecerá por completo poniendo en riesgo el funcionamiento de la estructura. La acumulación del óxido en la superficie del concreto, tiene como consecuencia la expansión del material la cual, puede llegar a aumentar hasta más de 4 veces su volumen. Derivado de dichas expansiones, el concreto se fisura en las zonas cercanas al acero, incluso, dichas fisuras, pueden estar acompañadas de delaminación. Cuando el proceso de corrosión se encuentra en un estado avanzado se pierde en su totalidad la adherencia entre estos materiales, provocando el desprendimiento del recubrimiento.

3.6. PROPIEDADES DEL CONCRETO

De acuerdo con el artículo "Propiedades del concreto" publicado por el IMCYC en el 2004, a lo largo de la cadena de producción se identifican tres estados físicos del concreto, los cuales son: plástico, fraguado y endurecido. Sin embargo, para fines de este estudio, se considera la clasificación realizada por algunos autores, que determinan solo dos estados físicos del concreto, conocidos como: estado fresco, y estado endurecido.

El concreto en estado endurecido cuenta con propiedades físicas y mecánicas mientras que el concreto en estado fresco se caracteriza por poseer solo propiedades físicas.

Las características mecánicas de un concreto, están definidas por el diseño del elemento estructural, mientras que la mayoría de las propiedades físicas las determina el proceso constructivo y el diseño propio del concreto.

3.6.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL CONCRETO

Se entiende por propiedades físicas, a aquellas que pueden ser identificadas por medio de la observación, las cuales, además de ser inherentes al material pueden ser modificadas sin alterar la composición química.

Las propiedades físicas del concreto pueden obtenerse y/o modificarse por medio de diversos factores como, el diseño de la mezcla, los materiales que se utilizan y el proceso de fabricación. En algunos casos, cuando no es posible alcanzar las características deseadas con la modificación de dichos factores, es común que se recurra al uso de aditivos químicos para conseguir los objetivos deseados.

3.6.1.1. PROPIEDADES FÍSICAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

El concreto se encuentra en estado fresco cuando posee una consistencia fluida y puede ser moldeado de diferentes formas, esta etapa comienza en el momento en el que sus componentes (cemento, agua y agregados) son mezclados y finaliza con el inicio del fraguado una vez que el concreto es colocado, pulido y curado.

El comportamiento de las propiedades del concreto en estado fresco, depende en gran medida del medio ambiente en el que va a ser fabricado y colocado, así como de las condiciones y procesos constructivos que se lleven a cabo durante su colocación.

Se considera a la trabajabilidad y a la cohesividad como las principales características del concreto en estado fresco, sin embargo, en esta etapa, existen otras propiedades que deben ser consideradas ya que de ellas también dependerá la calidad del concreto en estado endurecido.

3.6.1.1.1. TRABAJABILIDAD

Se define a la trabajabilidad, como una propiedad del concreto en estado fresco que hace referencia a la facilidad con la que este puede ser mezclado, manejado, colocado, compactado y terminado sin que se pierda su homogeneidad, exude o se segregue (Rivera G., 2013).

La trabajabilidad, no puede ser determinada por un solo parámetro de manera cuantitativa debido a que, es una propiedad compuesta por la consistencia y la cohesividad. Por lo general, se considera que un concreto fluido es más trabajable y, por consiguiente, uno que tiene menos fluidez tiene menos trabajabilidad (Cemex, 2018), sin embargo, esta premisa puede no cumplirse, ya que, un concreto fluido presenta segregación se considera que no posee una adecuada trabajabilidad.

Diversos factores como el tipo de transporte, el tiempo de mezclado, las características de los materiales, la cantidad de agua agregada a la mezcla, la temperatura del concreto y el aire incluido afectan y /o modifican la trabajabilidad del concreto.

3.6.1.1.2. FLUIDEZ Y CONSISTENCIA

En una mezcla de concreto, el término consistencia, hace referencia al carácter de la mezcla con respecto a su grado de fluidez; la cual, está determinada principalmente por la cantidad de agua que es agregada durante el mezclado, abarcando, desde la más seca cuando existe poca presencia de agua hasta la más fluida cuando la presencia de agua es abundante, (Mc Millan F. et al, 1989).

La prueba de revenimiento que se realiza utilizando el cono de Abrams sirve como método para determinar la consistencia de las mezclas de concreto, debido a que esta prueba se basa en la capacidad que tiene el concreto recién mezclado para fluir, obteniendo un valor numérico en términos de la disminución de altura (NMX-C-156, 2010), sirviendo como referencia para determinar otras características no cuantitativas del concreto.

3.6.1.1.3. SEGREGACIÓN

La segregación, es definida como, la separación de los componentes del concreto una vez que estos ya han sido mezclados, teniendo como resultado una distribución no homogénea dentro de la estructura de la mezcla. Los materiales que integran el concreto son físicamente heterogéneos por lo que tienden a separarse uno de los otros de manera natural.

El menor o mayor grado de segregación depende principalmente de la viscosidad (resistencia al flujo, relacionada con la fricción interna) y de la tixotropía (perdida de la viscosidad por efectos de agitación, recuperando su estado original después de permanecer en reposo).

Dentro de la estructura interna del concreto se pueden generar dos tipos de segregación, el primer caso, se presenta en mezclas con contenido bajo de humedad y consiste en la separación por tamaño de los agregados en finos y gruesos. El segundo tipo de segregación se genera por el exceso de humedad durante el mezclado, lo que provoca que se separe la pasta de los agregados. En ambos casos, la mala distribución de los componentes, tiene como consecuencia la generación de zonas de oquedades y zonas de acumulación de mortero, lo que en algunos casos se ve reflejado en un mal acabado superficial, en la pérdida de la durabilidad y en la disminución de la resistencia mecánica del concreto.

La segregación del concreto se origina debido a la presencia de factores internos que modifican la estructura de la mezcla como, la inadecuada proporción en el diseño (deficiencia en la cantidad de material cementante y/o finos), la presencia de diferentes densidades de los componentes y una granulométrica inadecuada, ya que cuando los agregados se encuentran bien distribuidos tanto en dirección vertical como en dirección horizontal se tiene una mayor resistencia a la segregación. De manera externa, factores como, condiciones de manejo inadecuadas, deficiencias en el transporte, exceso o falta de mezclado, colocación de agua adicional al diseño y sobrevibración en el momento de la colocación, provocan que la mezcla sea más propensa a la segregación.

3.6.1.1.4. EXUDACIÓN

La exudación, también conocido como sangrado del concreto fresco es considerada como una variante de la segregación, debido a que es el producto de la separación de una porción de agua del mezclado que asciende hacia la superficie como consecuencia de la incapacidad de los áridos de arrastrarla con ellos cuando se sedimentan en el fondo una vez que el concreto ha sido colocado. (Neville A.M.,1995).

Este fenómeno, es causado principalmente por las leyes físicas del flujo de un líquido en un sistema capilar, por lo que se produce de una manera inevitable en el concreto fresco. A pesar de ser una propiedad inherente a la estructura del concreto fresco, existen diversos factores que favorecen el incremento de la exudación, como, la diferencia de densidades de los materiales, la pérdida de la viscosidad de la pasta, la cantidad de finos en los agregados y la fineza del cemento (Pasquel E., 1998).

Es importante tener un control de los efectos negativos que puedan presentarse en el concreto, debido a que cuando el agua, asciende a la superficie del elemento se crean zonas de adherencia pobre, dejando a su paso huecos de aire en una misma dirección, aumentando así de manera considerable la permeabilidad del concreto. Cuando el proceso de sangrado no se interrumpe y el agua es evaporada, la relación efectiva de agua/cemento puede disminuir, teniendo como resultando un aumento de resistencia. Sin embargo, si el agua que sube es abundante, y lleva con ella una cantidad considerable de las partículas más finas de cemento, se formará una capa superficial porosa y débil (IMCYC, 2004).

3.6.1.1.5. COHESIÓN

La cohesión es la fuerza de adherencia que existe dentro de la estructura del concreto entre la pasta de cemento y los agregados, la cual forma parte de la resistencia interna al corte, ya que, provee la habilidad de las partículas de agregados a rotar y desplazarse dentro de la pasta, (Pasquel E., 1998).

Esta propiedad del concreto describe la facilidad o dificultad que tiene la pasta de cemento y la mezcla de los agregados a atraerse para mantenerse como suspensión evitando así la disgregación de los materiales. cuando la cohesión interna entre los constituyentes del hormigón no es la adecuada se produce segregación. La cohesión, está relacionada directamente con la trabajabilidad, y depende en gran medida de la proporción de las partículas finas de la mezcla, (IMCYC, 2004).

3.6.1.2. PROPIEDADES FÍSICAS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Cuando se realiza el mezclado de los componentes para la fabricación del concreto, el cemento y el agua entran en contacto entre sí, desencadenando el proceso de hidratación, que consiste en una serie de reacciones químicas exotérmicas que tendrán como resultado lo que se conoce como fraguado, el cual, forma parte del proceso de endurecimiento del concreto. Durante este proceso, se identifican dos etapas, la primera,

corresponde al *fraguado inicial*, es decir, cuando el concreto pierde su plasticidad y comienza a ser difícil su manejo. Esta etapa, comienza una vez que el concreto ha sido elaborado y tiene una duración aproximada de 45-60 minutos, por lo que el concreto debe estar colocado en su sitio final antes de que esta etapa termine. A medida que el tiempo transcurre el concreto entra en la segunda etapa del fraguado, denominada *fraguado final*, la cual, corresponde al momento en el que el concreto ha perdido la plasticidad por completo y la dureza de este es apreciable. Se considera que esta etapa puede tener una duración de 10 horas aproximadamente pues a pesar de que el concreto posee una apariencia sólida, aún no ha comenzado a desarrollar propiedades de resistencia ni de durabilidad.

El concreto endurecido, corresponde entonces al estado físico final del concreto, ya que, comienza una vez que el fraguado final ha concluido, es decir, el concreto ha pasado del estado plástico al estado sólido. En esta etapa el concreto comienza a adquirir valores de resistencia que se incrementara con el paso del tiempo.

3.6.1.2.1. POROSIDAD

De manera general, el proporcionamiento de los materiales para una mezcla de concreto normal, se considera dentro del rango del 61-76 % de agregados, 16-21% de agua, 7-15% de cemento y 1-3% de aire, (*ver figura 8 proporción de los materiales dentro de la mezcla*). Cuando estos elementos comienzan a ser mezclados, cada uno de ellos, incluido el aire, va tomando su lugar dentro de la estructura del concreto. Cuando el concreto se encuentra en estado fresco, algunos factores como; el proceso de fabricación, el mezclado, el transporte y la colocación influyen en la posición final que tomaran cada uno de ellos, lo cual, tendrá lugar una vez que el concreto haya endurecido por completo. Por tratarse de una mezcla heterogénea es importante cuidar que el acomodo de los materiales se realice de una manera uniforme a lo largo de todo el elemento para evitar la acumulación de componentes. A pesar de los cuidados que se tengan durante la cadena de producción, la estructura interna del concreto, se considera isotrópica debido a que no se mantienen las mismas propiedades en los diferentes sentidos.

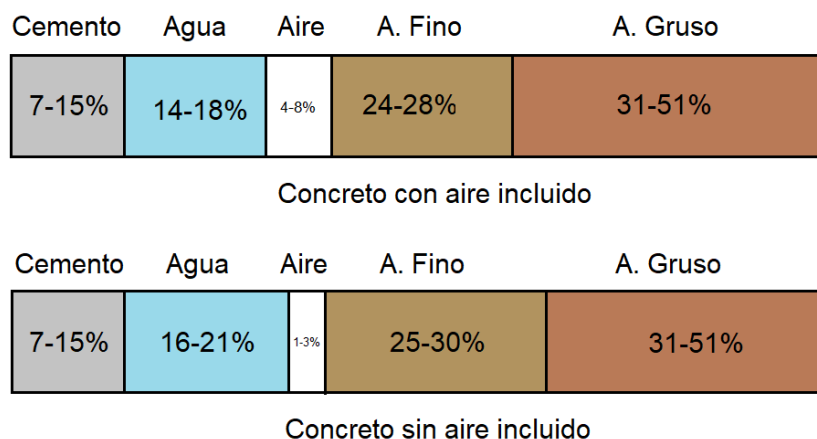


Figura 8 Proporción de los materiales dentro de la mezcla de concreto.

Gran parte del agua que interviene en la mezcla, sólo cumple la función de material lubricante cuando el concreto se encuentra en estado plástico, ubicándose dentro de la estructura en líneas de flujo y zonas de sedimentación de los sólidos, de manera que cuando se produce el endurecimiento y esta se evapora, va dejando a su paso lo que se conoce como porosidad o sistema de vacíos (Pasquel E., 1998).

El termino porosidad, hace referencia a la cantidad de huecos que puede presentar el concreto en su estructura una vez que este se encuentre en estado endurecido como resultado del aire atrapados durante le mezclado y que no fue expulsados una vez que el concreto fue colocado y compactado, así como el espacio ocupado por el agua que se absorbe y evapora durante el proceso de fraguado. Este factor, es un aspecto sumamente importante en la estructura del concreto endurecido debido a que pueden llegar a condicionar su comportamiento posterior para absorber líquidos, su permeabilidad o capacidad de flujo a través de él, además de influir en propiedades, como la resistencia a la abrasión, la estabilidad química, la gravedad específica, la adherencia de la pasta con los agregados, pero sobre todo en la resistencia a la compresión.

El grado de porosidad que presenta un concreto, determina las proporciones en las que los agentes agresivos pueden entrar en su masa y causar destrucción, ya que mientras más poroso sea el concreto menor es su resistencia mecánica, por lo que se tendrá mayor vulnerabilidad ante la agresividad del medio ambiente, (Kumar P., 2003).

3.6.1.2.2. CONTRACCIÓN

El cambio de volumen, es uno de los aspectos más importantes en el comportamiento del concreto debido a los efectos que produce, los cuales, por lo general se ven reflejados en contracciones y/o expansiones. Dichos cambios dentro de la estructura, generan problemas, principalmente de fisuras y deformaciones. Aunque en ocasiones pueden limitarse solo a condiciones estéticas, algunos de ellos pueden llegar a afectar la capacidad portante de los elementos o incluso, comprometer su operatividad (Pasquel E., 1998).

La contracción, también conocida como retracción, consiste en la reducción de tamaño del concreto que se experimenta principalmente durante el proceso de endurecimiento y secado, causada por la pérdida de agua. Este fenómeno, es asociado siempre con problemas de fisuras, sin embargo, existen otros factores que pueden llegar a generarlas. La contracción puede presentarse de tres maneras diferentes, dependiendo de las características y de las condiciones en las que se encuentre el concreto; contracción intrínseca o espontanea, contracción por secado y contracción por carbonatación, a la suma de todas ellas se le conoce como contracción total del concreto, (Pasquel E., 1998).

Cuando se realiza el proceso de hidratación dentro de la estructura del concreto, el cemento comienza a absorber el agua de la mezcla, lo que genera un cambio de volumen (disminución) dentro de la pasta del concreto de manera irreversible. A este cambio se le conoce como contracción intrínseca, la cual es inherente al proceso de endurecimiento del

concreto y solo se presenta cuando este se encuentra en estado plástico. Es decir, cuando el cemento comienza a reaccionar químicamente con el agua posee un volumen inicial (agua + cemento= 100%) que, disminuye una vez que el cemento se ha hidratado por completo (pasta + aire=100%), (ver figura 9 *Proporciones volumétricas de la pasta del cemento a diferentes etapas de hidratación*). Estos efectos varían dependiendo el contenido total de la pasta del concreto y por las características del tipo de cemento que se esté utilizando.

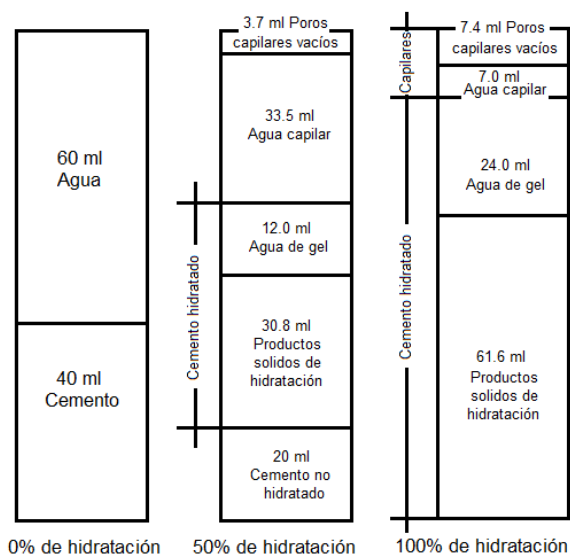


Figura 9 *Proporciones volumétricas de la pasta del cemento a diferentes etapas de hidratación (contracción intrínseca) (Pasquel E., 1998).*

Otro tipo de contracción que se presenta de manera inherente cuando el concreto se encuentra en estado plástico, es la conocida como contracción por secado, la cual, tiene lugar, una vez que el concreto comienza a secarse. Este tipo de contracción, es generada debido a la pérdida de la humedad de los poros del cemento ya hidratado por medio de la evaporación, producido de manera general por los efectos del medio sobre el concreto como la temperatura y el aire. Este tipo de contracción ocurre tanto en el estado plástico como en el inicio del estado endurecido, teniendo como consecuencia la formación de pequeñas oquedades dentro de la estructura que en ocasiones llega a desarrollar grietas debido a los esfuerzos de succión entre los granos de material sólido. A pesar de los daños que puede causar en la estructura interna, este proceso puede llegar a revertirse si se utilizan métodos de curado adecuados, ya que se ha demostrado que el concreto puede expandirse si es sometido nuevamente a condiciones a humedad.

Por último, la contracción por carbonatación, se presenta solo cuando el concreto se encuentra ya en estado endurecido, incluso puede presentarse años después de haberse colocado. A diferencia de los casos anteriores, este tipo de retracción, puede o no ocurrir, debido a que para su desarrollo es necesario que el concreto se encuentre en un entorno con abundantes concentraciones de bióxido de carbono (CO₂) y de humedad. Al entrar en contacto con estos elementos, el CO₂, reacciona con los cristales de hidróxido de calcio

(Ca(OH)²) del cemento ya hidratado formado carbonato de calcio (CaCO₃), lo que provoca una reducción de volumen, así como descompresión interna y por consiguiente una contracción adicional.

3.6.2. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO

A las propiedades que determinan el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a la acción de fuerzas externas se les conoce como propiedades mecánicas, las cuales son probablemente las propiedades de los materiales más importantes desde el punto de vista técnico debido a que están relacionadas con la capacidad de transmitir y resistir fuerzas o deformaciones. Una de las características de este tipo de propiedades, es que pueden ser determinadas por medio de ensayos aplicados a probetas o especímenes.

En el concreto la propiedad mecánica que ha sido considerada como la más importante es, la resistencia a la compresión, sin embargo, existen otras propiedades como, la durabilidad y la permeabilidad que juegan un papel de igual o mayor importancia en la vida útil del concreto.

3.6.2.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión del concreto (f_c) se define como, el esfuerzo máximo que este es capaz de soportar bajo una carga de aplastamiento sin romperse. La resistencia de los concretos va aumentando con el paso del tiempo, para concretos normales, se considera que tienen un incremento mayor dentro de los primeros 7 días después de su colocación, posteriormente, aunque la resistencia sigue aumentando, se hace de una manera más lenta hasta alcanzar el valor de diseño a los 28 días, después de 56 días de edad, el incremento de resistencia que pueda llegar a tener el concreto, ya no se considera significativo, (*ver figura 10 Evolución de la resistencia del concreto con respecto al tiempo*). Esta resistencia, es determinada por medio del ensayo de una muestra (especimen) en un laboratorio, y de manera numérica se obtiene con el cociente de la carga máxima soportada entre el área transversal de la sección original (kg/cm²).

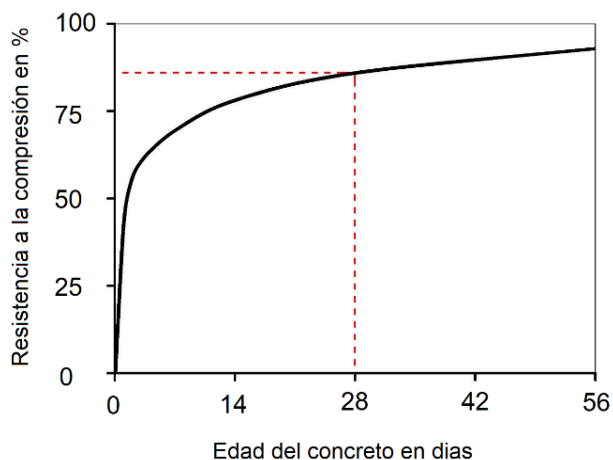


Figura 10 Evolución de la resistencia del concreto con respecto al tiempo.

Esta característica del concreto es la más común, y por lo general en la mayoría de los proyectos es la única que el diseñador llega a especificar, puesto que es un valor que considera para el dimensionamiento y el refuerzo de los elementos estructurales.

El tener un control de la resistencia a compresión para una misma mezcla de concreto no es fácil, debido a los factores que influyen en su resultado como, la relación agua cemento, la relación cemento agregado, el grado de compactación, la calidad de los materiales, las condiciones de curado, etc. Es importante mencionar que una alta resistencia no siempre es sinónimo de buena calidad en el concreto.

3.6.2.2. DURABILIDAD

La Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08, 2008), menciona que la durabilidad de una estructura de concreto, es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis.

La durabilidad del concreto depende mucho de la capacidad que tenga éste para impedir que los líquidos y los gases pasen y circulen en su interior a través de sus poros capilares, en el caso de ambiente marino se trata de los iones cloro y sulfato, (Cánovas F., 2006).

En la época de los cincuentas, se tenía la premisa de que la alta resistencia de los concretos era, sinónimo de buena calidad y por consiguiente de durabilidad, sin embargo, con la evolución de los cementos y la modificación de las características de los concretos como: la alta resistencia a edades tempranas, la disminución de la cantidad de cemento para alcanzar resistencias altas, el desmolde a menor edad, entre otros, han hecho que esta premisa deje de cumplirse.

En la durabilidad de un concreto o de una estructura realizada con él, el control de la calidad juega un papel primordial, el cual, que no debe limitarse al producto terminado, es decir, la determinación de su resistencia a compresión en probetas de concreto, ya que al hablar de durabilidad del concreto es importante mencionar que para lograr un concreto con esta característica, no solo influye el diseño, si no también otros factores como su fabricación, manejo, colocación y su curado.

A. Neville, en la revista Concrete International, decía de manera textual "Muchos proyectistas se fascinan con los resultados de control de resistencia a compresión del concreto y nada o muy pocos especifican su durabilidad.

3.6.2.3. PERMEABILIDAD

Se entiende por permeabilidad a la velocidad con que el agua y otros líquidos fluyen a través de la estructura del concreto, la cual se calcula a partir de una condición de presión hidrostática sobre una de sus caras y corresponde a la velocidad o al caudal de agua que

atraviesa el material, debido a la diferencia de presión entre la cara en contacto con el agua y la cara que no lo está.

Se puede decir que la característica más importante de un concreto en estado endurecido para poder ser utilizado en la construcción de un elemento expuesto a un ambiente agresivo, es la permeabilidad del mismo. La cual está directamente relacionada con su durabilidad ya que con esta se reduce la posibilidad de que agentes dañinos penetren a la estructura del concreto.

No es sencillo poder medir o especificar la permeabilidad de un concreto, ya que esta no solo depende de una buena dosificación y fabricación, sino también de un buen vibrado, buen curado y una buena práctica de colocación (IECA, 2013).

La permeabilidad del concreto es el factor más importante para determinar la durabilidad de largo plazo, esta depende de la relación agua/cemento, las condiciones de curado, el grado de micro-fisuración, la profundidad de la cubierta, etc. La permeabilidad dependerá de la manera en que la porosidad total está distribuida dentro de la estructura del concreto.

3.7. NORMATIVA NACIONAL

En México se encuentran dos entidades que poseen normativa aplicable a concreto, El Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE) y El Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

El ONNCCE es una Sociedad Civil reconocida a nivel nacional dedicada al desarrollo de las actividades de normalización, certificación y verificación, el cual tiene como propósito contribuir a la mejora de la calidad de los productos, procesos, sistemas y servicios.

En sus normas NMX de la serie C, establece los requisitos mínimos que deben cumplir los materiales utilizados en la construcción. Además, cuenta con normas de especificaciones y métodos de ensayo aplicables a la calidad del concreto y a sus componentes (agregados, cemento, agua y aditivos).

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) es un órgano desconcentrado de la SCT, creado por acuerdo presidencial el 15 de abril de 1987, el cual, tiene como misión proveer soluciones al sector transporte y logístico público y privado en México, que garanticen su calidad, seguridad y sustentabilidad, para contribuir al desarrollo del país a través de la investigación aplicada, servicios tecnológicos y de laboratorio, producción de normas, manuales y metodologías. También, cuenta con una serie de normas NIT-SCT aplicables a la construcción de obras portuarias, las cuales incluyen, materiales para concreto, control y aseguramiento de la calidad, muestreos de materiales para concreto y construcción.

Además de estas dos instituciones, el gobierno de la ciudad de México, expide un reglamento de construcción en el que se incluyen parámetros para el diseño por durabilidad de las estructuras de concreto, los cuales pueden ser tomados como referencia para el diseño de este tipo de elementos. A pesar de que este documento solo es de

carácter obligatorio en la ciudad de México, en otros estados puede servir como referencia para el diseño.

Después de revisar el contenido de las normas de cada uno de estas entidades, se hace un extracto de las partes que pueden ser aplicables al concreto utilizado en obras portuarias.

- **Tomado de la norma NMX-C-155-ONNCCE Concreto hidráulico – Dosificación en masa – especificaciones y método de ensayo.**

Apartado 1 de la norma: objetivo y campo de aplicación

Establecer las especificaciones para la elaboración del concreto hidráulico de peso normal, dosificado en masa, para uso estructural y mezclado por medios mecánicos, así como los métodos de ensayo para su control en estado fresco y endurecido, y los lineamientos para su comercialización.

5.2.4 de la norma “Temperatura del concreto fresco”

- En climas cálidos, la temperatura del concreto en el momento de su entrega debe ser la más baja posible, preferentemente no se debe exceder de 38 °C.

Nota 7 de la norma: En algunas ocasiones se pueden encontrar dificultades cuando la temperatura del concreto se aproxima a los 32 °C.

Clasificación	Condiciones de exposición
4a	Ambiente marino totalmente sumergido.
	Estructuras totalmente sumergidas sin exposición parcial o total al aire.
4b	Ambiente marino grado moderado.
	Área rica en sales o costera sin contacto con el agua. Estructuras con influencia del aire marino en grado moderado, colocadas entre 3 km y 300 metros de la línea de costa.
4c	Ambiente marino grado severo.
	Área rica en sales o costera sin contacto con el agua. Estructuras con influencia del aire marino en grado severo, colocadas entre la línea de costa y 300 metros.
4d	Ambiente marino zona de salpicaduras.
	Área rica en sales en contacto con el agua. Estructuras de contacto con aire y agua marina, ciclos de humedecimiento y secado.

Tabla 1 Clasificación de exposición a acciones de deterioro del concreto. (Extracto de la tabla 9 de la norma NMX-C-155-ONNCCE).

De acuerdo a lo descrito en la norma, en todos los casos registrará la condición o combinación de exposición más agresiva.

Requisitos de durabilidad	4a	4b	4c	4d
Resistencia a la compresión kg/cm ²	300	300	350	350
Relación agua/cemento	0.45	0.45	0.40	0.40

Requisitos de durabilidad	4a	4b	4c	4d
Permeabilidad al ion cloruro máxima coulombs	3000	2300	1800	1000
Contenido de iones de cloro solubles en agua (% del peso del concreto)				
Concreto premezclado	0.06	0.06	0.06	0.06
Concreto reforzado	0.08	0.15	0.15	0.08
Densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido	De acuerdo a las especificaciones particulares del proyecto			
Absorción capilar				
Tipo de cemento de acuerdo con NMX-C-414-ONNCCE Se puede utilizar otro tipo de cemento, siempre que se demuestre que cumple requisitos RS, BRA, en sayos en concreto.				
Si existe ataque químico de agentes agresivos	-	RS	RS	RS
Si los agregados son reactivos o potencialmente reactivos	BRA	BRA	BRA	BRA
Agregados de acuerdo a NMX-C-111-ONNCCE				
Reactividad con los álcalis del cemento	No reactivos			

Tabla 2 Requisitos de durabilidad según la clase de exposición a acciones de deterioro del concreto. (Extracto de la tabla 10 de la norma NMX-C-155-ONNCCE)

Tipo	Denominación	Clase resistente ¹	Características especiales
CPO	Cemento portland ordinario.	20	RS resistente a los sulfatos.
CPP	Cemento portland puzolánico.	30	BRA baja reactividad álcali agregado.
CPEG	Cemento portland con escoria granulada de alto horno.	30R	BCH Bajo calor de hidratación.
CPC	Cemento portland compuesto.	40	B blanco.
CPS	Cemento portland con humo de sílice.	40R	---
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno.	---	---

Tabla 3 Clasificación de los cementos (tabla 1 de la norma NMX-C-414-ONNCCE).

¹ clase resistente: indica la resistencia a compresión máxima en MPa que puede alcanzar el cemento a los 28 días.

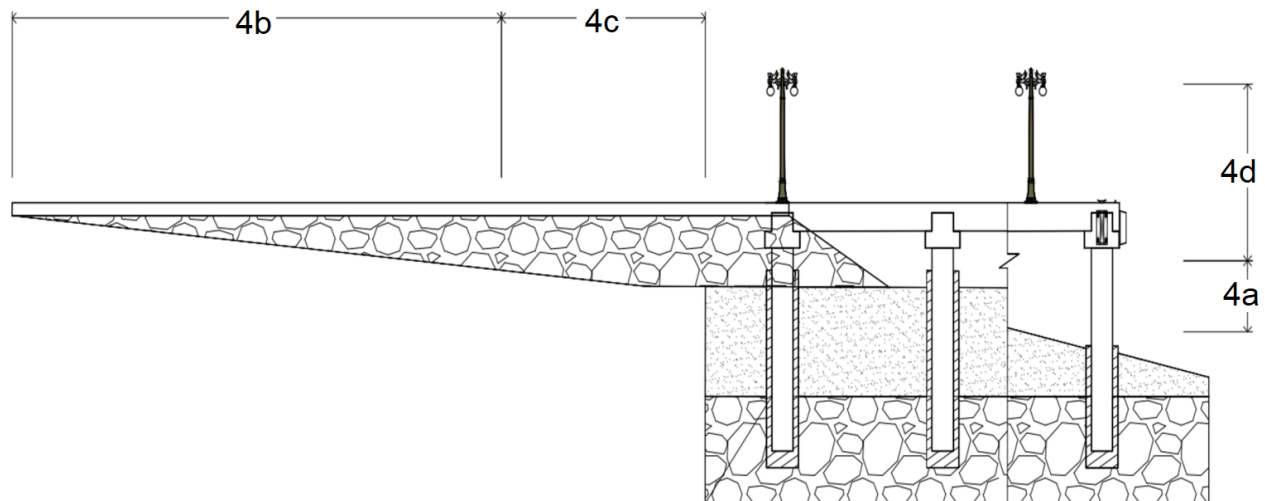


Figura 11 Condiciones de exposición de acuerdo a la NMX-C-155-ONNCE

- **Tomado de la actualización a la norma técnica complementaria para diseño y construcción de estructuras de concreto. Gaceta oficial de la ciudad de México 15 de diciembre de 2017.**

1.1 Alcance

En estas Normas se presentan disposiciones para diseñar estructuras de concreto, incluido el concreto simple, reforzado y presforzado. Se dan requisitos complementarios para concreto ligero y concretos especiales. Se incluyen estructuras coladas en el lugar y prefabricadas. Estas disposiciones deben considerarse como un complemento de los principios básicos de diseño establecidos en el Título Sexto del Reglamento de construcción del distrito federal.

Las estructuras deberán diseñarse para una vida útil de al menos 50 años.

Superficies y ambientes de exposición	Clasificación de la exposición
a) Superficie de miembros en contacto con el terreno:	
3) En suelos agresivos ¹	D
c) Superficies de miembros no en contacto con el terreno y expuestos a ambientes exteriores ³ que son:	
1) No agresivos	A2
2) Ligeramente agresivos	B1
3) Agresivos	B2
d) Superficies de miembros en agua ⁴ :	
3) En agua con más de 20 000 ppm de cloruros:	
- Sumergida permanentemente	B2
- En zonas con humedecimiento y secado	C
e) Superficies de miembros en otros ambientes:	

Superficies y ambientes de exposición	Clasificación de la exposición
En cualquier ambiente de exposición no descritos en los incisos de (a) a (d)	D

Tabla 4 Clasificación de exposición (extracto de la tabla 4.2.1 de la norma técnica complementaria para el diseño y construcción de estructuras de concreto)

¹ se deben considerar agresivos los suelos permeables con pH < 4.0 o con agua freática que contiene más de un gramo (1 g) de iones de sulfato por litro. Suelos ricos en sales con pH entre 4 y 5 deben considerarse como clasificación de exposición C;

³ la frontera entre los diferentes ambientes exteriores depende de muchos factores los cuales incluyen distancia desde la fuente agresiva, vientos dominantes y sus intensidades;

Clasificación de la exposición	Características y recomendaciones
A2	-Serán curados en forma continua bajo temperatura y presión del ambiente por al menos tres días a partir del colado. -El concreto tendrán una resistencia a compresión especificada, f'c, no menor de 20 MPa (200 kg/cm ²).
serán curados en forma continua bajo condiciones de temperatura y presión del ambiente, por al menos siete días a partir del colado.	
B1	-El concreto tendrán una resistencia a compresión especificada 20 MPa (200 kg/cm ²)
B2	-El concreto tendrán una resistencia a compresión especificada 25 MPa (250 kg/cm ²)
C	-El concreto tendrán una resistencia a compresión especificada 50 MPa (500 kg/cm ²) -Se requiere emplear un contenido de cemento portland no menor que 3 500 N/m ³ (350 kg/m ³) y una relación agua/cemento que no exceda 0.40.
D	-Se especificará para asegurar su durabilidad bajo la exposición ambiente particular que se tenga y para la vida útil de diseño escogida.
-Para concretos expuestos a sulfatos Los concretos que estarán expuestos a soluciones o a suelos que contienen concentraciones peligrosas de sulfatos serán hechos con cementos resistentes a sulfatos y cumplirán con las relaciones agua–materiales cementantes máximas y las resistencias a compresión mínimas presentadas en la tabla 4.6.1.	

Tabla 5 Requisitos para concretos de acuerdo a su clasificación de exposición (tomado de los incisos 4.2-4.5 de la norma técnica complementaria para el diseño y construcción de estructuras de concreto)

Exposición a sulfatos	Tipos de cemento ¹	Máxima relación agua– materiales cementantes, por peso, concretos con agregados de peso normal ²	f'c mínima, concreto con agregado de peso normal y ligero, MPa (kg/cm ²)
Despreciable	---	---	---
Moderada ³	CPP, CPEG, CPC	0.50	30 (300)
Severa	RS	0.45	35 (350)
Muy severa	RS más puzolana ⁴	0.45	35 (350)

Tabla 6 Requisitos para concretos expuestos a soluciones que contengan sulfatos (extracto de la tabla 4.6.1 de la norma técnica complementaria para el diseño y construcción de estructuras de concreto)

- 1 CPP Cemento portland puzolánico (Clinker de cemento portland con Aluminato tricálcico (C₃A) < 8 %);

CPEG Cemento portland con escoria granulada de alto horno (Clinker de cemento portland con Aluminato tricálcico (C₃A) < 8 %);

CPC Cemento portland compuesto (Clinker de cemento portland con Aluminato tricálcico (C₃A) < 8 %);

RS Cemento portland resistente a los sulfatos (Aluminato tricálcico (C₃A) < 5 %);
- 2 Se puede requerir relaciones agua-materiales cementantes más bajos o resistencias más altas para reducción de la permeabilidad o para protección del acero contra la corrosión;

- 3 Correspondería a agua de mar;
- 4 Puzolana que haya mostrado mediante ensaye o experiencias previas que mejora la resistencia a los sulfatos cuando se emplea en concreto fabricado con cemento portland resistente a los sulfatos.

No se adicionarán al concreto cloruros o aditivos químicos que los contengan en forma importante en elementos de concreto reforzado para clasificaciones de exposición B1, B2, o C, y en ningún elemento de concreto presforzado o curado a vapor.

Clasificación de exposición	Resistencia a compresión especificada, MPa (kg/cm ²)							
	15 (150) ⁽¹⁾	20 (200)	25 (250)	30 (300)	40 (400)	50 (500)	60 (600)	70 (700)
	Recubrimiento mínimo requerido (mm)							
A1	30	25	25	20	20	20	15	15
A2	50	40	35	30	25	25	20	20
B1	65	50	40	35	30	30	25	25
B2	--	--	50	45	40	35	30	30
C	--	--	--	--	--	70 ⁽²⁾	65 ⁽²⁾	60 ⁽²⁾

Tabla 7 Recubrimiento libre mínimo requerido (extracto de la tabla 4.9.1 de la norma técnica complementaria para el diseño y construcción de estructuras de concreto)

¹ ver tabla 8

² además se requiere emplear un contenido de cemento portland no menor que 3 500 N/m³ (350 kg/m³) y una relación agua/cemento que no exceda 0.40.

Tipo de concreto	Especificación
concretos clase 1	La resistencia especificada, f _c , igual o mayor que 25 MPa (250 kg/cm ²)
concretos clase 2	La resistencia no será menor que 20 MPa (200 kg/cm ²)

Tabla 8 Clases de concreto (inciso 2.1.2 de la norma técnica complementaria para el diseño y construcción de estructuras de concreto)

- **Tomado de la Publicación Técnica No. 292 SCT, IMT Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. Sanfandila, Querétaro, 2006.**

Apartado 1.4 de la publicación: Objetivos

- Determinar el grado de deterioro de probetas de concreto expuestos a diferentes ambientes de México.
- Correlacionar la durabilidad del concreto por carbonatación en diferentes zonas urbanas de México.

Tipo de exposición	Condiciones ambientales
4	Ambiente marino

Tabla 9 Clasificación de exposición ambiental (Extracto de la tabla 6.2.1 de la publicación técnica No. 292 SCT, IMT)

Requisito para concreto reforzado	4
f _c	≥300
a/c	≤0.55
c.c	≥300

Requisito para concreto reforzado		4
c.a	≤40mm	≥4
	≤20mm	≥5
	≤10mm	≥6

Tabla 10 Requisitos de durabilidad según la clase de exposición (extracto de la tabla 6.2.2 de la publicación técnica No. 292 SCT, IMT)

Tipo de exposición	Refuerzo normal (mm)	Presforzado (mm)
4	40	50

Tabla 11 Recubrimientos recomendados para el acero de refuerzo (extracto de la tabla 6.2.3 de la publicación técnica No. 292 SCT, IMT)

Los tipos de cemento que se mencionan en la norma de la SCT, coinciden con los que maneja la norma NMX-C-414.

- **Tomado de la Publicación Técnica No. 181 SCT, IMT Diseño de Estructuras de Concreto con Criterios de Durabilidad Sanfandila, Querétaro, 2001.**

El propósito de la publicación técnica es, reunir los conocimientos de investigaciones recientes en durabilidad del concreto en ambiente marino y transferir esta información para incluir un modelo de durabilidad al diseño estructural del elemento de concreto.

Código	Tipo de Exposición	Condición de la Exposición	Cantidad Mínima Cemento (kg/m ³)	Max. Relación a/c	Mínimo f'c (28-d) (MPa)
BS8110	Muy severo	Salpicado de agua salada	325	0.55	40
		Sales de deshielo	350	0.50	45
		Alta humedad	400	0.45	50
	Extremo	Acción abrasiva del mar	350	0.50	45
		Impacto	400	0.45	50
Puentes BS5400 parte 4	Muy severo	Sales de deshielo o Salpicado de agua salada	330	0.45	50
	Extremo	Acción abrasiva del mar	360	0.45	50
Estructuras marítimas BS6349 parte 1	Sumergidas	< 1 m bajo línea marea baja	350	0.50	-
	Zona de salpicaduras	< 1 m bajo línea marea alta	400	0.45	-
ENV 206	Agua de mar	Zona expuesta a lluvias	330	0.50	40
		Sumergida	330	0.50	40
		Zona de Salpicado	350	0.45	45
	Otras fuentes de cloros	Húmedo, sin ciclo de secas	300	0.55	40
		Ciclos de secado mojado	300	0.50	40

Tabla 12 Requerimientos mínimos para un concreto durable en ambiente marino [19] (extracto de la tabla 2.3 de la publicación técnica No. 181 SCT Diseño de Estructuras de Concreto con Criterios de Durabilidad ISSN 0188-7297.

3.8. NORMATIVA INTERNACIONAL

Normativa de Estados Unidos de América:

En EEUU las normas aplicables a concreto se encuentran a cargo del American Society for Testing and Materials (ASTM) y del American Concrete Institute (ACI).

El ASTM, es una organización que cuenta con reconocimiento a nivel mundial, encargada del desarrollo y de la publicación de acuerdos por medio de normas técnicas, las cuales tienen como finalidad mejorar la calidad de los productos, sistemas y servicios. Dentro de estos estándares, se incluye una serie de normas en las que se determinan los requisitos que debe cumplir el concreto hidráulico, así como las características de los materiales para la elaboración de este, (ASTM, 2019)

El ACI es una organización sin fines de lucro que desarrolla estándares, normas y recomendaciones técnicas involucradas en temas de materiales y propiedades del concreto, prácticas constructivas y supervisión, así como de pavimentos y losas, incluyendo también el diseño estructural y el análisis, las especificaciones para las estructuras, y los productos y procesos especiales, las cuales se encuentran recopilados en el “ACI Manual of Concrete Practice”. (ACI,2019).

- **Tomado de “Requisitos de reglamento para concreto estructural” (ACI 318S-05) y comentario (ACI 318S-05) (versión en español y en sistema métrico) producido por el comité ACI 318.**

Apartado 1.1 de la norma: Alcance

Proporcionar los requisitos mínimos para el diseño y la construcción de elementos de concreto estructural de cualquier estructura construida según los requisitos del reglamento general de construcción. En lugares en donde no se cuente con un reglamento de construcción legalmente adoptado, este reglamento define las disposiciones mínimas aceptables en la práctica del diseño y la construcción.

Condiciones de exposición	Concreto de peso normal; relación* máxima agua material cementante en peso	Concreto con agregado normal y ligero, f'c mínima, MPa*
Concreto que se pretende tenga baja permeabilidad en exposición al agua.	0.50	28
Para proteger el refuerzo en el concreto de la corrosión cuando está expuesto a cloruros de sales descongelantes, sal, agua salobre, o salpicaduras del mismo origen.	0.40	35

Tabla 13 Requisitos para condiciones de exposición especiales, (extracto de la tabla 4.2.2 “Requisitos de reglamento para concreto estructural ACI 318S-05)

Exposición a sulfatos	Sulfato (SO4) en el agua, ppm	Tipo de Cemento	Concreto de peso normal, relación máxima agua material cementante en peso*	Concreto de peso normal y ligero, f'c mínimo, MPa
Insignificante	$0 \leq SO_4 < 150$	—	—	—

Exposición a sulfatos	Sulfato (SO ₄) en el agua, ppm	Tipo de Cemento	Concreto de peso normal, relación máxima agua material cementante en peso*	Concreto de peso normal y ligero, f'c mínimo, MPa
Moderada (Agua de mar)	150 ≤ SO ₄ < 1 500	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)	0.50	28
Severa	1 500 ≤ SO ₄ < 10 000	V	0.45	31
Muy severa	SO ₄ > 10 000	V más puzolana †	0.45	31

Tabla 14 Requisitos para concretos expuestos a soluciones que contienen sulfatos, (extracto de la tabla 4.3.1 "Requisitos de reglamento para concreto estructural ACI 318S-05)

† Puzolana que se ha determinado por medio de ensayos o por experiencia que mejora la resistencia a sulfatos cuando se usa en concretos que contienen cemento tipo V.

Cuando se consideran las ambas tablas, se debe usar la menor relación máxima agua-material cementante aplicable y el mayor f'c mínimo.

- Tomado de la "Guía para el diseño y construcción de estructuras fijas de hormigón en alta mar" Informe por el Comité ACI 357R-84.

Este informe está destinado a ser utilizado como una guía para el diseño de estructuras fijas de concreto armado y/o pretensado para servicio en un ambiente marino. A pesar de que esta guía técnica tiene por objetivo el estudio de estructuras costa afuera, cuenta con valores que sirven como referencia para el estudio de las estructuras de concreto sobre la costa.

En zonas donde se pueda esperar una degradación superficial del hormigón, se recomienda una resistencia mínima a compresión f'c ≥ 42 N/mm².

Zona	Recubrimiento concreto armado (mm)	Recubrimiento concreto pos tensado (mm)
Atmosfera marina no sujeta a niebla salina	50	75
Atmosfera marina sujeta a salpicaduras	65	90
Sumergida	50	75
Enterrada	13	-

Tabla 15 Recubrimiento mínimo para acero de refuerzo (tabla 2.2 Guía para el diseño y construcción de estructuras fijas de hormigón en alta mar" Informe por el Comité ACI 357R-84).

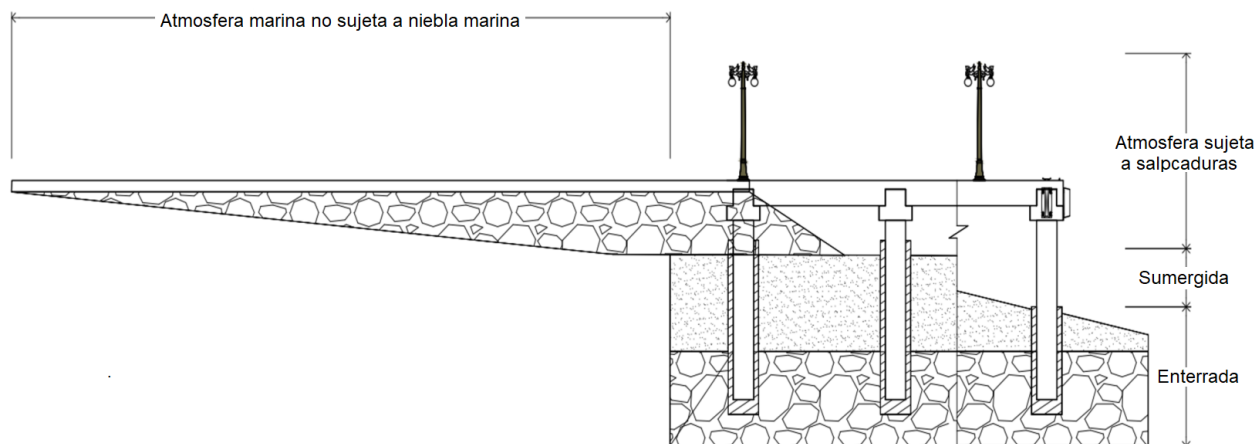


Figura 12 Condiciones de exposición de acuerdo a la ACI 357R-84

Zona	Máxima relación A/C	Mínimo contenido de cemento (kg/m ³)
Sumergida	0,45	356
Salpicaduras	0,40	356
Atmosférica	0,40	356

Tabla 16 Relación agua/cemento y resistencia a compresión mínima para diferentes condiciones de exposición del concreto en ambientes marinos (tabla 2.1 Guía para el diseño y construcción de estructuras fijas de hormigón en alta mar" Informe por el Comité ACI 357R-84).

Durabilidad del concreto de acuerdo con la ACI 357R-84.

Tipo	Denominación	Características especiales
IS	Cemento portland con escoria de alto horno	(A) Aire incluido
IP	Cemento portland puzolánico	(MS) moderada resistencia de sulfato
P	Cemento portland-puzolana para usar cuando mayores fortalezas en edades tempranas no son necesarias.	(HM) calor moderado de hidratación
I(PM)	Cemento portland con puzolana modificada	
I(SM)	Modificados de escoria de cemento portland.	
S	Cemento de escoria para su uso en combinación con cemento portland en decisiones concretas y en combinación con cal hidratada en albañilería mortero	

Tabla 17 Terminología del cemento (tomado de la especificación para cementos hidráulicos ASTM-C 595-03)

Tipo	Descripción
I	Uso general.
II	Uso general, calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos.
III	Alta resistencia inicial.
IV	Bajo calor de hidratación.
V	Alta resistencia a los sulfatos.

Tabla 18 Clasificación de los cementos (tomado de la especificación de cemento portland ASTM-C 150M-12)

Normativa de España:

En España se encuentran diversas instituciones dedicadas a la elaboración de normas y documentos que determinan la calidad y los requisitos que debe cumplir el concreto hidráulico, entre ellas están: el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) y el Ministerio de Fomento de España

IECA es un instituto privado, de carácter técnico, dedicado al estudio, asesoramiento y difusión de los conocimientos y tecnologías relativas al cemento y a sus productos derivados: concreto y morteros, el cual se encarga de la creación de guías técnicas de apoyo para el manejo del concreto en diferentes aplicaciones.

La AENOR, es una entidad dedicada al desarrollo de la normalización y de la certificación en todos los sectores industriales de productos y servicios, con ayuda de los Comités Técnicos de Normalización (CTN) crea los documentos normativos UNE (acrónimo de Una Norma Española), los cuales constituyen un conjunto de normas, algunas de ellas de carácter experimental y otros solo como informes técnicos.

El Ministerio de Fomento de España, es un departamento con competencias en obras públicas, transportes terrestre, aéreo y marítimo, así como en el área de comunicaciones, ya que, de este departamento surge la Instrucción de Hormigón Estructural la cual hace referencia a las normas UNE.

- **Tomado del Reglamento técnico “Instructivo de Hormigón estructural” EHE-08 con comentarios de la comisión permanente del hormigón.**

Este instructivo es el marco reglamentario en el que se establecen las exigencias que deben cumplir las estructuras de concreto para satisfacer los requisitos de seguridad estructural, además de la protección del medio ambiente, proporcionando procedimientos que permiten demostrar su cumplimiento con suficientes garantías técnicas.

Clase general de exposición				Descripción	Ejemplos
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
Marina	Aérea	IIIa	Corrosión por cloruros	- Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar. - Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5km).	- Elementos estructurales de edificaciones en las proximidades de la costa. - Puentes en las proximidades de la costa. - Zona aérea de diques, pantalanos y otras obras de defensa litoral. - Instalaciones portuarias.
	Sumergida	IIIb	Corrosión por cloruros	- Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de baja mar.	- Zona sumergida de diques, pantalanos y otras obras de defensa litoral. - Cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar.

Clase general de exposición				Descripción	Ejemplos
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
	En zona de carrera de mareas y en zonas de salpicaduras	IIIc	Corrosión por cloruros	- Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras o en zona de carrera de mareas.	- Zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral. - Zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea.

Tabla 19 Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras, (extracto de la tabla 8.2.2 "Instructivo de Hormigón estructural" EHE-08)

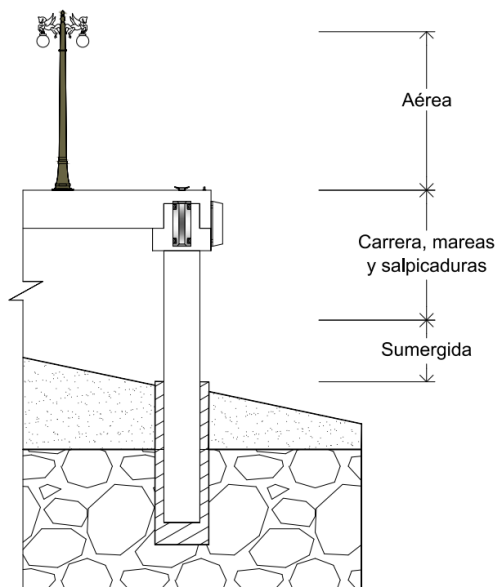


Figura 13 Condiciones de exposición de acuerdo a la EHE-08

Parámetro de dosificación	Tipo de concreto	Clasificación de exposiciones		
		IIIa	IIIb	IIIc
Máxima relación a/c	Masa	-	-	-
	Armado	0.50	0.50	0.45
	Pretensado	0.45	0.45	0.45
Mínimo contenido de cemento en kg/m ³	Masa	-	-	-
	Armado	300	325	350
	Pretensado	300	325	350

Tabla 20 Máxima relación agua /cemento y mínimo contenido de cemento, (extracto de la tabla 37.3.2.a "Instructivo de Hormigón estructural" EHE-08)

Parámetro de dosificación	Tipo de concreto	Clasificación de exposiciones		
		IIIa	IIIb	IIIc
Resistencia mínima (N/mm ²)	Masa	-	-	-
	Armado	30	30	35
	Pretensado	30	35	35

Tabla 21 Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad, (extracto de la tabla 37.3.2.b "Instructivo de Hormigón estructural" EHE-08)

Tipos de cemento	Denominación	Designación
CEM I	Cemento portland	CEM I
CEM II	Cemento portland con escoria	CEM II/A-S
		CEM II/B-S
	Cemento portland con humo de sílice	CEM II/A-D
	Cemento portland con puzolana	CEM II/A-P
		CEM II/B-P
	Cemento portland con ceniza volante	CEM II/A-V
		CEM II/B-V
	Cemento portland con caliza	CEM II/A-L
Cemento portland mixto (3)	CEM II/A-M	
	CEM II/B-M	
CEM III	Cemento de alto horno	CEM III/A
		CEM III/B
CEM IV	Cemento puzolánico	CEM IV/A
		CEM IV/B
CEM V	Cemento compuesto	CEM V/A

Tabla 22 Clasificación de los tipos de cemento (de acuerdo al "Instructivo de Hormigón estructural" EHE-08)

Concreto	Cemento	Vida útil del proyecto (tg)(años)	Clase general de exposición		
			IIIa	IIIb	IIIc
Armado	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de micro sílice superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	50	25	30	35
		100	30	35	40
	Resto de cementos utilizables	50	45	40	*
		100	65	*	*
Pretensado	CEM II/A-D o bien con adición de humo de sílice superior al 6%	50	30	35	40
		100	35	40	45
	Resto de cementos utilizables, según el Artículo 26°	50	65	45	*
		100	*	*	*

Tabla 23 Recubrimiento mínimo en mm de acuerdo a la clase de exposición (extracto de la tabla 37.2.4.1.b "Instructivo de Hormigón estructural" EHE-08)

* Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos, se recomienda comprobar el Estado Límite de Durabilidad según lo indicado en el Anejo N° 9, a partir de las características del hormigón prescrito en el Pliego de prescripciones técnicas del proyecto.

3.9. ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

Una parte fundamental en las obras de infraestructura portuaria es el proyecto ejecutivo, en el cual se debe mencionar la información específica y necesaria para la adecuada ejecución de la construcción, esta información, es expresada por medio de planos, dibujos técnicos, esquemas y textos explicativos en los que se mencionen los espacios, el tipo de

materiales a utilizar y la calidad que deben cumplir, así como los detalles de diseño que merezcan mención especial.

La integración de esta información se encuentra a cargo de diferentes áreas, cada una de ellas aportando datos relacionados con el proyecto. Cuando se habla de las especificaciones y de las características que debe cumplir el concreto hidráulico para ser utilizado en obras portuarias se identifican tres áreas principales, el área encargada del proyecto arquitectónico, el área encargada del diseño estructural y el área encargada de determinar el proceso constructivo.

Cuando se realiza el diseño arquitectónico de una obra portuaria se hace mención a diversos factores que de manera indirecta determinaran las características del concreto sin ser especificadas en esta etapa, como:

- La ubicación de los elementos con respecto a la costa.
- La ubicación de las estructuras sobre el nivel del mar.

Dicha Información es indispensable para determinar el grado de exposición a la cual los elementos van a estar sometidos, así como la función que estos van a tener dentro de la estructura.

El diseño de las estructuras requiere de información específica para determinar las propiedades de capacidad de carga de los elementos por lo que le atañe la determinación de los siguientes datos relacionados con el concreto:

- Resistencia a la compresión mínima (considerando el diseño por durabilidad).
- Espesor mínimo del recubrimiento.

Además, dentro de estas especificaciones, por lo general se hacen recomendaciones respecto a:

- El tamaño máximo de agregado.
- El revenimiento.

Estos factores, se establecen dependiendo del grado de complejidad que pueda presentar el armado de las estructuras, sin embargo, estos datos pueden ser modificados por el constructor, siempre y cuando se siga cumpliendo con las especificaciones de resistencia a compresión determinada.

Existe información relacionada con el concreto que es determinada por el proceso constructivo, ya que, dependerá de las características que este debe tener para poder ser colocado en su disposición final.

- El revenimiento.
- Tipo de resistencia (tiempo de fraguado)

El revenimiento podrá ser modificado dependiendo del proceso constructivo, ya que deberá utilizarse un revenimiento que facilite su colocación sin afectar la resistencia de diseño. El tipo de resistencia que se utilice, dependerá del tiempo establecido para el descimbrado del elemento indicado en el proceso constructivo, por lo que podrán ser solicitados concretos de resistencia acelerada a 24 horas, 3 días, 7 días o a la edad que se requiera. Cuando se realiza la solicitud de concreto al proveedor se debe ser muy específico en las características que este debe cumplir para su aprobación.

4. ESTUDIO DE CASO

Con la finalidad de verificar el estado actual de la normativa y los parámetros de calidad del concreto que se utilizan en la construcción de obras portuarias, se realiza el análisis del estudio de caso del proyecto de construcción de un puerto, a cargo de la SCT.

Después de realizar el análisis de la información, se hace una comparativa de los datos del proyecto y las normas nacionales e internacionales existente para determinar oportunidades de mejora y poder establecer procedimientos para controlar de una mejor manera la calidad final del concreto.

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

El proyecto sujeto a revisión y análisis para fines de este proyecto de investigación es, la construcción de muelle pesquero en Chuburná, Yucatán, con fecha de mayo de 2012, el cual se encontró a cargo de la coordinación general de puertos y marina mercante, de la Secretaría de comunicaciones y transportes.

1. Ubicación geográfica:

Chuburná, se encuentra localizado en el municipio de Progreso, en el estado de Yucatán en México, en el litoral norte de la Península de Yucatán, al poniente del puerto de Progreso, (ver figura 14 *Ubicación geográfica Chuburná, Yucatán*). Se encuentra 20 km al poniente del puerto de Progreso y 56 km al norponiente de la ciudad de Mérida, la capital del estado de Yucatán.

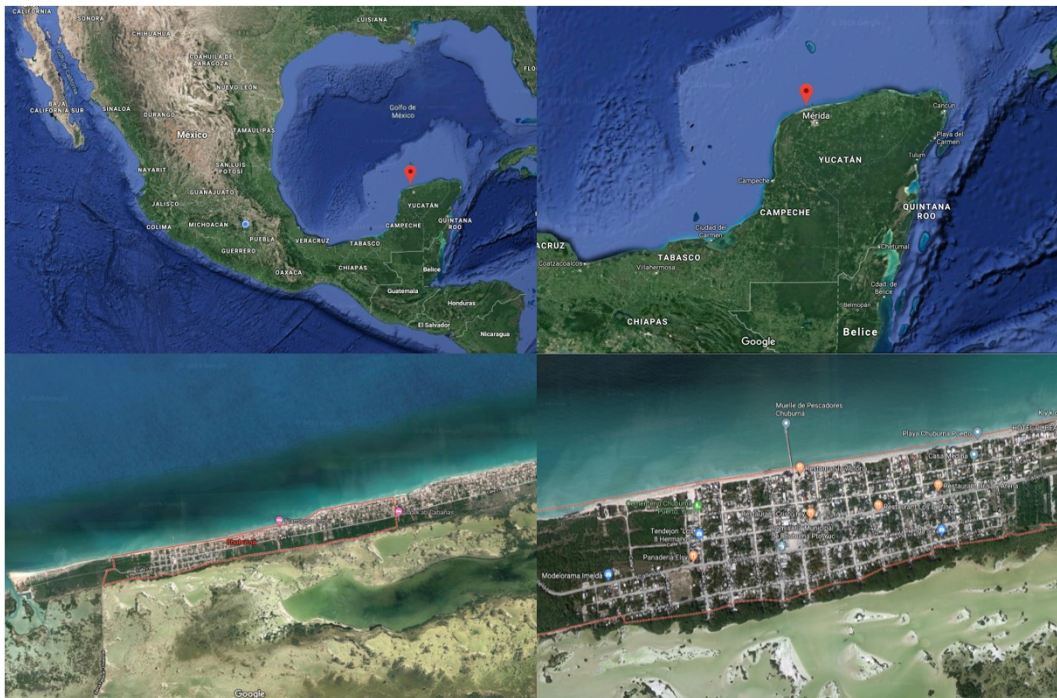


Figura 14 *Ubicación geográfica Chuburná, Yucatán*

2. Clima:

Chuburná está dominada por el clima cálido subhúmedo, (ver figura 15 *Climograma Chuburná puerto*). A lo largo del año, se presentan precipitaciones regulares generalmente en verano de 480 mm, de acuerdo con Köppen y Geiger se clasifica como clima BSh (semiárido cálido) (García E.,2004), por lo que la temperatura media anual oscila alrededor de los 25.5 °C. La máxima temperatura se registra en el mes de mayo y la mínima se registra en enero, con brisas marinas y vientos del sur y del oeste.

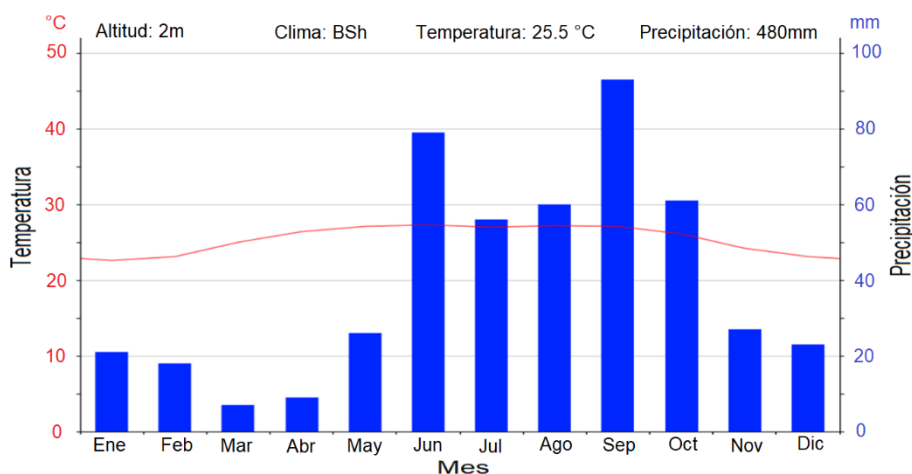


Figura 15 *Climograma Chuburná puerto*

El mes más seco es marzo con 7mm, y el mes en el que se tienen las mayores precipitaciones del año es septiembre con 93mm. Junio con 27.3 °C es el mes más caluroso del año y el mes más frío es enero con 22.6 °C, (ver tabla 24 *Datos históricos del clima en Chuburná*).

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media °C	22.6	23.1	25	26.4	27.1	27.3	27	27.2	27.1	26.1	24.2	23.1
Temperatura min °C	19.2	19.1	20.7	22.2	23.2	23.8	23.7	23.9	23.9	23.1	21.1	19.8
Temperatura máx. °C	26	27.1	29.3	30.7	31	30.9	30.3	30.5	30.4	29.1	27.4	26.4
Precipitación mm	21	18	7	9	26	79	56	60	93	61	27	23

Tabla 24 *Datos históricos del clima en Chuburná*

3. Mareas

De acuerdo con los resultados de la batimetría realizada en la zona, se tiene los siguientes valores, indicados de manera esquemática en la figura 16 *Nivel de pleamar y bajamar*.

Planos de mareas referidos al nivel de bajamar media inferior		
Pleamar máxima registrada	4.462 pies	1.360 m
Nivel de pleamar superior	1.887 pies	0.575 m
Nivel de pleamar media	1.784 pies	0.544 m

Planos de mareas referidos al nivel de bajamar media inferior		
Nivel medio del mar	1.064 pies	0.324 m
Nivel de bajamar media	0.425 pies	0.130 m
Nivel de bajamar media inferior	0.000 pies	0.000 m
Bajamar mínima registrada	- 2.034 pies	- 0.620 m

Tabla 25 Tabla de mareas en Chuburná

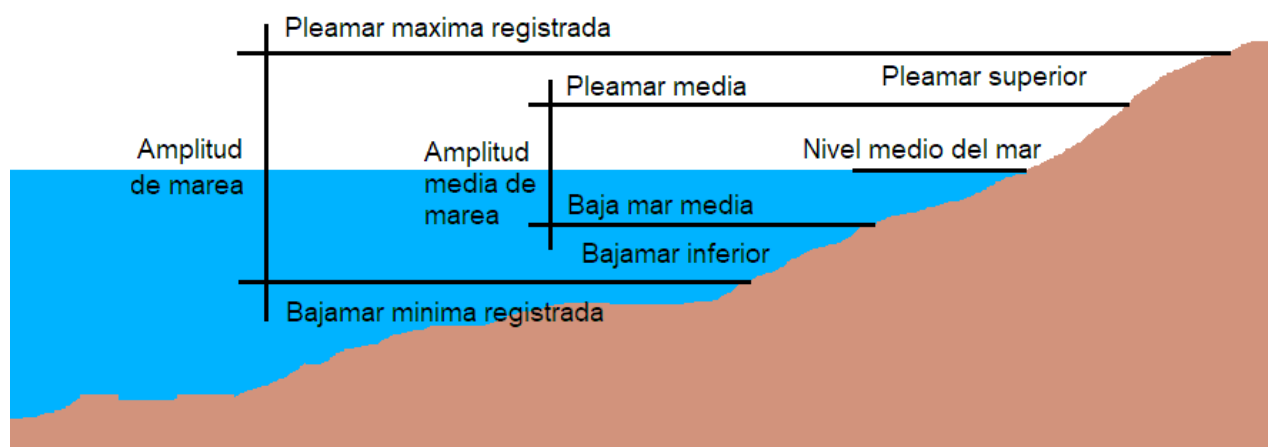


Figura 16 Nivel de pleamar y bajamar

4. Datos de embarcaciones para el proyecto

- Embarcación para pesca ribereña

Características de la embarcación para pesca ribereña	
Eslora	7.60 m
Calado	0.60 m
Manga	1.75 m
Calado promedio	0.90 m
Capacidad de carga	1.2 ton
Velocidad de atraque	0.20 m/s

Tabla 26 Características de las embarcaciones para pesca ribereña

- Embarcación para recreo

Características de la embarcación para recreo	
Eslora	12.20 m
Manga	3.85 m
Calado promedio	1.50 m
Puntal	1.90 m
Desplazamiento	31.20 ton
Velocidad de atraque	0.20 m/s
Carga viva	4.00 ton
Coefficiente sísmico	0.08

Tabla 27 Características de la embarcación para recreo

5. Información general del proyecto:

La construcción del muelle se desarrolla en una superficie de 1478.77 m² y el eje longitudinal está orientado en sentido norte-sur aproximadamente, consiste en una pasarela que arranca desde la franja libre de playa en tierra firme con una longitud de 158.65m y 5.50m de ancho en donde se ubican dos tramos de escaleras para permitir el atraque de embarcaciones pequeñas; y a continuación una plataforma de operaciones de 43.30m de longitud y 14.00m de ancho en donde también se tendrán escaleras para permitir el atraque de embarcaciones menores, (ver figura 17 Planta y sección transversal del muelle).

Para garantizar el atraque de embarcaciones se dispondrán elementos de amarre y atraque tanto en la pasarela como en la plataforma, esto quiere decir que se ubicara cornamusa, argollas y defensas marinas según proyecto estratégicamente localizados en la estructura del muelle.

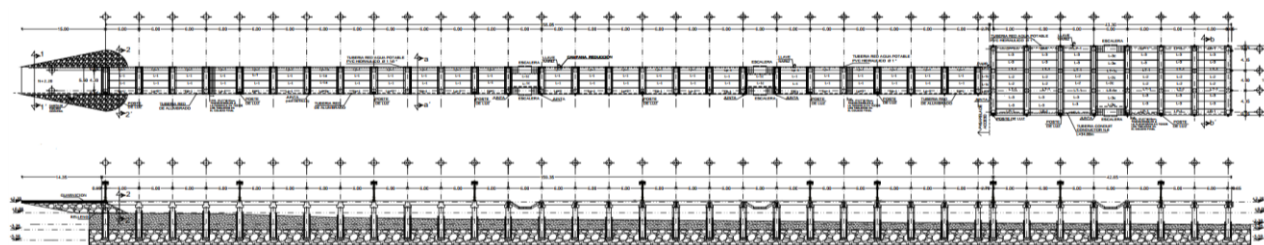


Figura 17 Planta y sección transversal del muelle

6. Elementos estructurales:

El proyecto del muelle está pensado para garantizar una afectación mínima al medio ambiente y su diseño será utilizando piezas precoladas de concreto reforzado empleando el mínimo de concreto colado in situ.

La cimentación está constituida por pilas precoladas octogonales de concreto reforzado (ver figura 18 Pilas octogonales de concreto reforzado), empotradas en el lecho rocoso, fijándolas a dicho manto con perforaciones y colado de concreto con el método “tremie” para evitar dispersión de la mezcla de concreto.

La superestructura está formada con losas prefabricadas de concreto reforzado unidas entre sí con concreto especial con cimbra adecuada para evitar fugas de lechada que contaminen el mar, en la parte superior se construiría una losa de rodamiento a base de concreto reforzado con 15 cm de espesor con juntas calafateadas que impiden la fuga del concreto colado in situ.

La pasarela está constituida por 28 ejes en cada eje se localizan las pilas que se desplantan desde el estrato resistente como lo indican los trabajos de exploración de suelo y que están localizadas a 3.50m equidistante una de otra, formando así dos ejes en el sentido longitudinal de la pasarela de tal manera que se ubican 56 pilas precoladas; entre

los ejes 14 y 15 se ubica el primer tramo de escaleras y entre los ejes 21 y 22 el segundo tramo de escaleras precoladas.

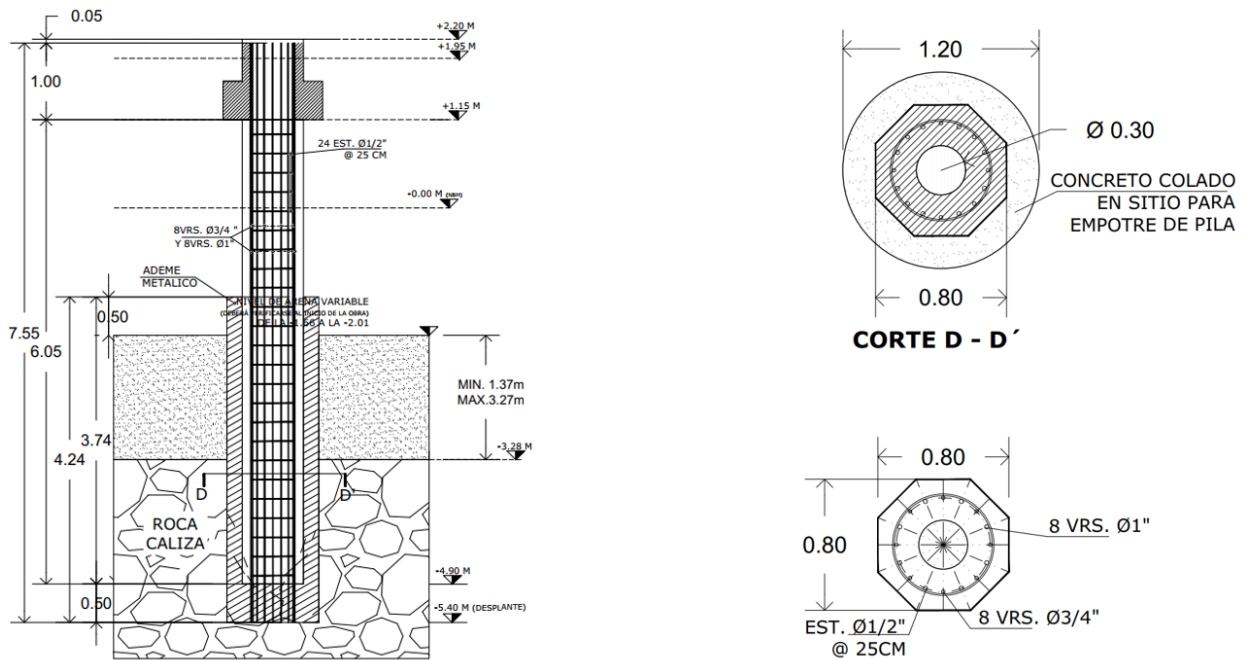


Figura 18 Pilas octogonales de concreto reforzado

La superestructura de la pasarela está formada por cabezales que soportarán las losas precoladas, el número de cabezales es de 28 piezas precoladas que obedecen al número de ejes existentes, las losas precoladas que se apoyan sobre estos mismos cabezales hacen un total de 126 piezas precoladas, (ver figura 19 Planta y sección transversal de la pasarela).

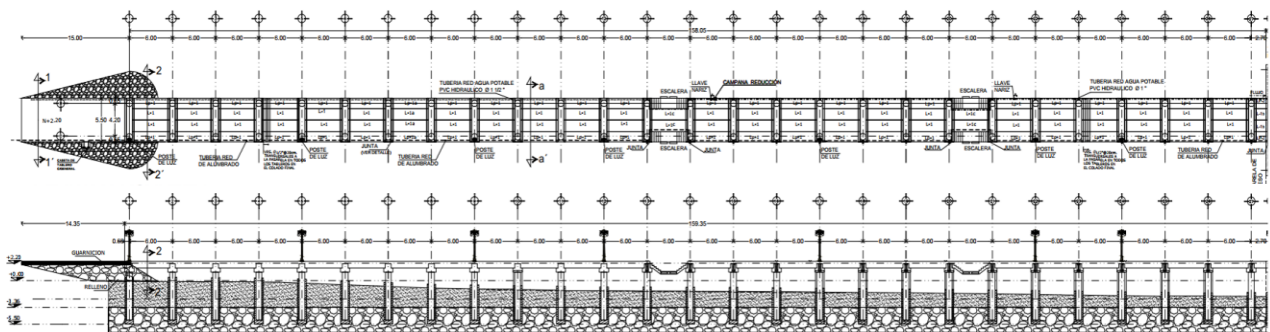


Figura 19 Planta y sección transversal de la pasarela

La plataforma de operaciones, esta está constituida por 8 ejes y en cada eje se disponen cuatro pilas precoladas como la subestructura de desplante; haciendo un total de 32 pilas y en cada eje se dispone un cabezal de 14.00 m de longitud y 1.30 m de ancho, (ver figura 20 Planta y sección transversal de plataforma de operaciones).

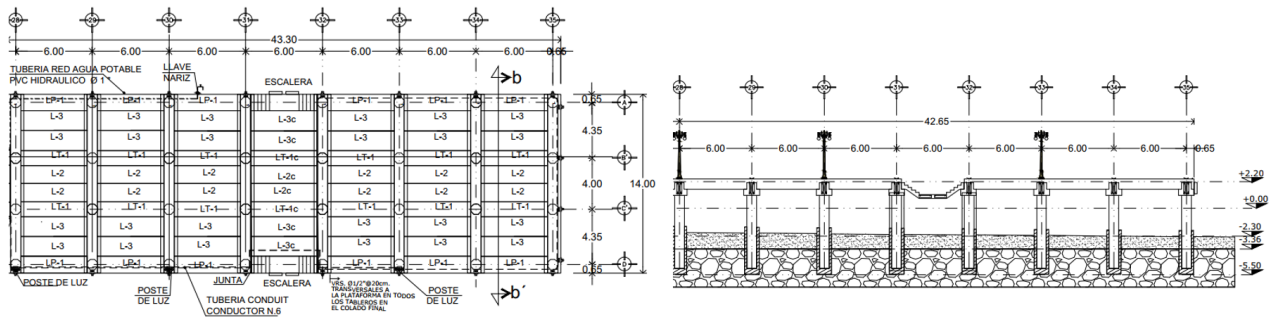


Figura 20 Planta y sección transversal de plataforma de operaciones

La superestructura de la plataforma está constituida por cabezales, (ver figura 21 detalle de cabezales), y losas precoladas que se apoyan en dichos cabezales cuyo número es de 68 losas precoladas de igual manera se ubican en las escaleras precoladas de 5.20 m de longitud y 1.30 m de ancho ubicadas entre los ejes 32 y 33. Se ubicará en cada eje cornamusa, argollas y defensas marinas para facilitar el atraque de las embarcaciones.

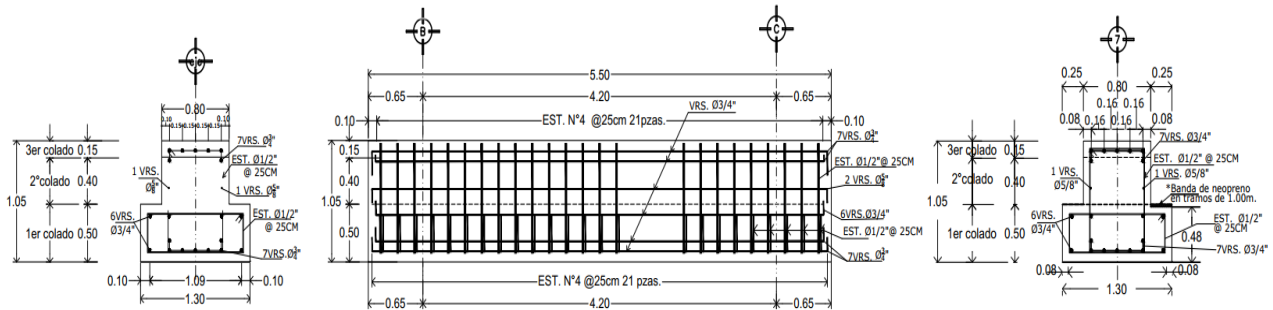


Figura 21 Detalle de cabezales

7. Proceso constructivo de elementos a base de concreto:

- Pasarela de acceso.
 - Reconocimiento general del fondo marino basado en la batimetría.
 - Perforación previa de 1.20 de diámetro hasta cota de proyecto siendo -5.90 referido al NBM, debiendo colocarse un ademe metálico para evitar que el material caiga sobre dicha perforación.
 - Preparación del área de trabajo para la cama de colado, que tendrá las dimensiones adecuadas para los colados simultáneos de los elementos mecánicos del muelle; patios de maniobras, oficinas cobertizos y área para maquinaria y equipos en el área de colados.
- Pilas de concreto prefabricadas
 - Fabricación de pila octagonal de 0.80x 0.80 m en cama de colado armado, cimbrado y colado; debiendo dejar ahogado un tubo de P.V.C. de alta resistencia para el cimbrado del hueco por donde se colará el concreto para el empotre bajo el agua usando el tubo tremie.

- Desde este momento se deberán tomar muestras de concreto para enviarlas al laboratorio.
- Transporte y colocación de pila octagonal de 0.80 x 0.80 m y 5.90 m de largo en perforación previa; ubicándola según proyecto.
- Suministro y colocación de ademe con tubo de acero de 1.30 de diámetro con una altura de longitud variable según el nivel de la arena.
- Vaciado de concreto a través de la pila octagonal con tubo tremie hasta el nivel de empotre en capa resistente, tal y como lo indica el proyecto.
- Afine de la parte superior de la pila octagonal de 0.80 x 0.80 m hasta el nivel de proyecto no permitiendo que el material de desecho caiga al fondo marino.
 - Cabezales prefabricados
 - Fabricación de cabezal de 1.30 m de base y 5.50 m de largo en cama de colado, armado, cimbrado y colado, utilizando impermeabilizante integral.
 - Transporte y colocación de cabezal de base de 1.30 m, ubicándola según proyecto sobre las pilas ya colocadas.
 - Suministro y colocación de cimbra de soporte en unión de pila y cabezal.
 - Colocación de acero de refuerzo en unión de pila y cabezal.
- Losas prefabricadas
- Fabricación de losa precolada, en cama de colado, armado, cimbrado y colado; según proyecto utilizando impermeabilizante integral
- Transporte y colocación de losas precoladas colocándola en pasarela y/o plataforma según se indica en el proyecto.
- Armado, cimbrado y colado en guarnición in situ según proyecto, colocación de la tubería red alumbrado y agua potable.
 - Escaleras prefabricadas
 - Fabricación de escalera precolada con escalones forjados de 5.20 m de largo y 1.30 m de ancho armado, cimbrado y colado; para pasarela.
 - Transporte y colocación de escalera de 5.20 m de largo y 1.30 m de ancho.
 - Suministro y montaje de banda de neopreno en junta constructiva.
 - Colocación de cimbra de contacto en unión de escalera y cabezal.
- Losas coladas en sitio
- Colado IN SITU de losa de rodamiento en pasarela de acceso.
- Colocación de acero de refuerzo transversal y longitudinal.
- Colocación de tapa para juntas ubicándola según proyecto (placa de acero).
- Elaboración, suministro y Colocación de Concreto Hidráulico en losa de rodamiento.

8. Características del concreto utilizado en los elementos estructurales:

Durante el desarrollo del proyecto, se mencionan especificaciones relacionadas con la calidad y las características que el concreto debe poseer para ser utilizado en la construcción de obras portuarias, aunque algunas de ellas se mencionan solo de manera general. Una de las principales recomendaciones que se hacen es, que los elementos estructurales, deberán ser prefabricados con la finalidad de disminuir el contacto del concreto en estado fresco directamente con el ambiente salino de la costa o en su caso con agua de mar. Además, se menciona la importancia de que el proporcionamiento del concreto se realice por personal calificado y así, asegurar su calidad.

Características del *concreto para la fabricación de pilas*

- Revenimiento 18 cm
- Resistencia del concreto de 300 kg/cm²

Para el caso del recubrimiento, considerando que se encontrara en un ambiente agresivo por su contacto con el mar se recomienda de 7.5 cm como mínimo.

En los planos de los elementos estructurales, se hace mención de las características generales que debe cumplir el concreto.

- Concreto f'c 250 kg/cm² con impermeabilizante integral sikalite o similar.
- Cemento tipo CPP 30R RS.

El Sikalite, es un impermeabilizante en polvo para concreto y mortero, que puede ser utilizado en cimentaciones, muros de contención, losas, tanques, canales, alcantarillas, subterráneos; en general para todo concreto y morteros de aplanados, sobre todo en obras hidráulicas. Contiene sustancias que sellan poros y repelen el agua debido a que, impermeabiliza el concreto, plastifica la mezcla y aumenta las resistencias, adema, es impermeable aún bajo presión de agua, evita la formación de salitre. Se debe de considerar una dosificación 1% peso de cemento. Se recomienda el revenimiento más bajo posible que permita una buena compactación y que el contenido de cemento no sea inferior a 250 kg por m³ de concreto ($a/c < 0.45$), tomado de la hoja técnica Sikalite 2010-2011-01.

9. Control de calidad:

En el proyecto, no se consideran pruebas previas para la aceptación del concreto que va a ser utilizado durante la construcción del muelle de Chuburná, sin embargo, se hace mención de la revisión de la calidad final del concreto, tomando muestras del concreto durante la fabricación de las pilas y durante su colocación, haciendo referencia a la resistencia a la compresión y las normas emitidas por la SCT.

4.2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN:

Después de hacer un análisis de los datos que contiene el proyecto del muelle de Chuburná y la normativa nacional e internacional referente a las características del concreto para ser utilizado en la construcción de obras portuarias podemos observar que:

- El muelle, se compone de 4 elementos que forman parte de la estructura principal, las pilas, los cabezales, las losas prefabricadas y la losa colada en el sitio. También cuenta con escaleras construidas a base de concreto hidráulico que, a pesar de no ser consideradas como elementos estructurales, las características del concreto que debe utilizarse para su construcción son muy similar a las de los elementos mencionados.

- Además de revisar las especificaciones del concreto para los elementos estructurales, se hace el análisis del concreto que va a ser utilizado para el empotre de las pilas en el fondo marino, debido a las características que este debe poseer por la zona de exposición y por encontrarse próximo a un elemento estructural.

- Las características propias de los estructurales y de las zonas de exposición a las que se encuentra sometido cada uno de ellos, se muestran en las tablas 28, 29, 30 y 37, así como un diagrama de cada elemento para comprender más a detalle su estructura.

- En las tablas 31 y 38, se muestran las características del concreto especificadas por el proyecto y en los planos, incluyendo la zona de exposición crítica en la que se encuentra cada uno de ellos, ya que algunos elementos pueden estar expuesto a más de una zona. En las tablas se incluye; el recubrimiento, la resistencia a compresión, tipo de cemento a utilizar y las observaciones adicionales que se requieran.

- Como parte del análisis, en las tablas 32, 33, 34, 35 y 36 se mencionan las características que el concreto debe cumplir cuando se encuentra expuesto a salpicaduras y en las tablas 39, 40, 41, 42 y 43 cuando el concreto se encuentra en zona totalmente sumergida, de acuerdo con las normas NMX, RCDF, SCT, ACI, y EHE respectivamente estudiadas en el apartado 4.7 y 4.8 de este trabajo de investigación.

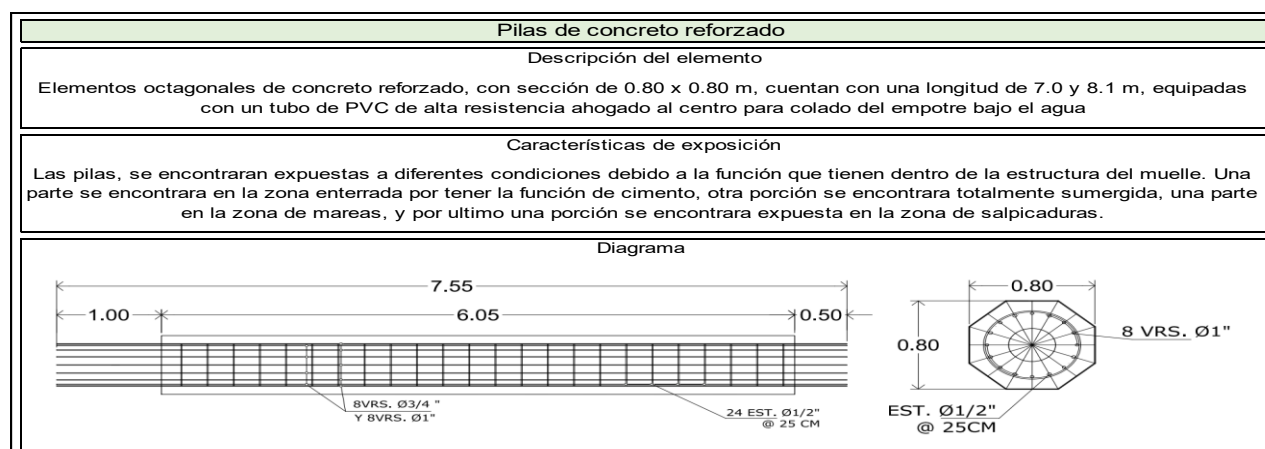


Tabla 28 Características de las pilas de concreto y zona de exposición.

Cabezales de concreto reforzado
<p align="center">Descripción del elemento</p> <p>Los cabezales prefabricados cuentan con dimensiones de 1.30 de base y 5.50 m de largo, se colocaran empotrados a las pilas una vez que estas se encuentren colocadas, los cabezales servirán como base para la colocación de las losas.</p>
<p align="center">Características de exposición</p> <p>Los cabezales, se encontraran expuestos a dos diferentes condiciones por la función que tienen dentro de la estructura del muelle. Una parte se encontrara en la zona mareas, y otra porción se considera expuesta en la zona de salpicaduras.</p>
<p align="center">Diagrama</p>

Tabla 29 Características de los cabezales de concreto y zona de exposición.

Losas de concreto reforzado
<p align="center">Descripción del elemento</p> <p>Las losas servirán para la construcción de la superestructura, sobre ellas se deberá colar una capa de concreto de 15 cm de espesor. Las losas, se colocaran apoyadas sobre los cabezales.</p>
<p align="center">Características de exposición</p> <p>Las losas, se encontraran expuestas a dos diferentes condiciones por la función que tienen dentro de la estructura del muelle. Una parte se encontrara en la zona mareas, y otra porción se considera expuesta en la zona de salpicaduras</p>
<p align="center">Diagrama</p>

Tabla 30 Características de las losas de concreto y zona de exposición.

Especificaciones del concreto determinadas en el proyecto									
<table border="1"> <tr> <td>Recubrimiento especificado</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Pilas</td> <td>14 cm</td> </tr> <tr> <td>Cabezales</td> <td>8 cm</td> </tr> <tr> <td>Losas</td> <td>7 y 5 cm</td> </tr> </table>	Recubrimiento especificado		Pilas	14 cm	Cabezales	8 cm	Losas	7 y 5 cm	<p align="center">Zonas de exposición crítica</p> <p align="center">Salpicaduras</p>
Recubrimiento especificado									
Pilas	14 cm								
Cabezales	8 cm								
Losas	7 y 5 cm								
<table border="1"> <tr> <td>f_c</td> <td>250 kg/cm²</td> </tr> <tr> <td>Relación a/c</td> <td>No especificada</td> </tr> <tr> <td>Tipo de cemento</td> <td>CPP 30R RS</td> </tr> </table>	f_c	250 kg/cm ²	Relación a/c	No especificada	Tipo de cemento	CPP 30R RS	<p align="center">Observaciones</p> <p>En las especificaciones del plano se indica que en el concreto se le debe agregar impermeabilizante integral sikalite o similar. En el proyecto se hace la observación que por ser estructuras expuestas a condiciones del medio marino, el recubrimiento deberá ser por lo menos de 7.5 cm</p>		
f_c	250 kg/cm ²								
Relación a/c	No especificada								
Tipo de cemento	CPP 30R RS								

Tabla 31 Especificaciones de concreto determinadas en el proyecto para zona de salpicaduras.

Especificaciones del concreto determinadas por la NMX-C-155-ONNCCE			
Zonas de exposición crítica		Características de la zona crítica	
3d		Área rica en sales en contacto con el agua. Estructuras de contacto con aire y agua marina, ciclos de humedecimiento y secado.	
Recubrimiento	N/E	cm	mínimo
f _c	350	kg/cm ²	mínimo
Relación a/c	0.4		
Tipo de cemento	RS / BRA		
		Observaciones	
		Se recomienda baja permeabilidad en el concreto para evitar el ingreso de cloruros. Se deben utilizar agregados de baja reactividad, además de considerar la absorción y contenido de vacíos conforme al proyecto.	

Tabla 32 Especificaciones de concreto determinadas por la NMX-C-155-ONNCCE para zona de salpicaduras.

Especificaciones del concreto determinadas por el reglamento de construcción del DF			
Zonas de exposición crítica		Características de la zona crítica	
C		Superficies de miembros en agua con mas de 20 000 ppm de cloruros (el agua de mar contiene 35 000 ppm) incluye zonas de humedecimiento y secado	
Recubrimiento	7	cm	mínimo
f _c	500	kg/cm ²	mínimo
Relación a/c	no exceda de 0.4		
Tipo de cemento	CPP, CPEG, CPC - RS		
		Observaciones	
		Se recomienda una cantidad de cemento no menos a 350 kg/m ³ . En la tabla 4.6.1 Requisitos para concretos expuestos a soluciones que contengan sulfatos, agua de mar se encuentra en la clasificación "moderada" especificando relación a/c de 0.50 y una f _c mínima de 300 kg/cm ²	

Tabla 33 Especificaciones de concreto determinadas por el reglamento de construcción del DF para zona de salpicaduras.

Especificaciones del concreto determinadas por las normas de la SCT			
Zonas de exposición crítica		Características de la zona crítica	
4		Ambiente marino, condiciones de exposición a sulfatos de manera general.	
Recubrimiento	4	cm	mínimo
f _c	≥300	kg/cm ²	mínimo
Relación a/c	≤0.55		
Tipo de cemento	N/E		
		Observaciones	
		Se especifica un contenido de cemento ≥300. En la tabla 2.3 de la publicación técnica 181 cuando hace referencia a la exposición a el agua de mar en zona de salpicaduras se recomienda un contenido de cemento de 350 kg/m ³ mínimo, una relación a/c de 0.55 y una f _c 450 kg/cm ² mínima.	

Tabla 34 Especificaciones de concreto determinadas por las normas de la SCT para zona de salpicaduras.

Especificaciones del concreto determinadas por las normas ACI			
Zonas de exposición crítica		Características de la zona crítica	
Moderada (agua de mar)		Zonas susceptibles a la corrosión, ambiente expuesto a cloruros de sales y agua de mar	
Recubrimiento	6.5	cm	mínimo
f _c	280	kg/cm ²	mínimo
Relación a/c	0.5		
Tipo de cemento	II, IP(MS), IS(MS), P(MS), I(PM)(MS), I(SM)(MS)		
		Observaciones	
		Cuando el concreto se encuentra expuesto a cloruros de sales y se debe proteger el refuerzo en el concreto de la corrosión se recomienda una relación a/c de 0.40 y una f _c de 350 kg/cm ²	

Tabla 35 Especificaciones de concreto determinadas por las normas ACI para zona de salpicaduras.

Especificaciones del concreto determinadas por las normas EHE	
Zonas de exposición crítica IIIc	Características de la zona crítica Corresponde a la zona de carrera de las mareas y en zonas de salpicaduras
Recubrimiento 3.5 cm mínimo	Observaciones Se recomienda un contenido mínimo de cemento 350 kg/m ³
f _c 350 kg/cm ² mínimo	
Relación a/c 0.45	
Tipo de cemento CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D	

Tabla 36 Especificaciones de concreto determinadas por las normas EHE para zona de salpicaduras.

Concreto para colocación de pilas	
Descripción Concreto utilizado en sitio para la colocación y empotre de las pilas	<p>Diagrama</p>
Características de exposición El concreto que se colocará en el sitio para soporte de las pilas, se encuentra expuesto a dos zonas, la primera corresponde a la zona enterrada y la segunda a la zona totalmente sumergida	
Zonas de exposición crítica Totalmente sumergida	

Tabla 37 Características del concreto para colocación de pilas y zona de exposición.

Especificaciones del concreto determinadas en el proyecto	
Recubrimiento N/E cm mínimo	Observaciones En las especificaciones del plano se indica que en el concreto se le debe agregar impermeabilizante integral sikalite o similar. En el proyecto se hace la observación que por ser estructuras expuestas a condiciones del medio marino, el recubrimiento deberá ser por lo menos de 7.5 cm
f _c 250 kg/cm ² mínimo	
Relación a/c no especificada	
Tipo de cemento CPP 30R RS	

Tabla 38 Especificaciones de concreto determinadas por el proyecto para zona totalmente sumergida.

Especificaciones del concreto determinadas por la NMX-C-155-ONNCCE	
Zonas de exposición crítica 4a	Características de la zona crítica Estructuras totalmente sumergidas sin exposición parcial o total al aire
Recubrimiento N/E cm mínimo	Observaciones En esta zona, una de las principales características es la falta de oxígeno suficiente para desarrollar el proceso de corrosión.
f _c 300 kg/cm ² mínimo	
Relación a/c 0.45	
Tipo de cemento BRA	

Tabla 39 Especificaciones de concreto determinadas por la NMX-C-155-ONNCCE para zona totalmente sumergida.

Especificaciones del concreto determinadas en el reglamento de construcción del DF	
Zonas de exposición crítica B2	Características de la zona crítica Superficies de miembros en agua con mas de 20 000 ppm de cloruros (el agua de mar contiene 35 000 ppm) sumergidas permanentemente
Recubrimiento 5 cm mínimo	Observaciones Se recomienda una cantidad de cemento no menos a 350 kg/m ³ . En la tabla 4.6.1 Requisitos para concretos expuestos a soluciones que contengan sulfatos, agua de mar se encuentra en la clasificación "moderada" especificando relación a/c de 0.50 y una f _c mínima de 300 kg/cm ²
f _c 250 kg/cm ² mínimo	
Relación a/c N/E	
Tipo de cemento S/E	

Tabla 40 Especificaciones de concreto determinadas por el reglamento de construcción del DF para zona totalmente sumergida.

Especificaciones del concreto determinadas por las normas de la SCT	
Zonas de exposición crítica A	Características de la zona crítica Condiciones de exposición a sulfatos de manera general.
Recubrimiento 4 cm mínimo	Observaciones Se especifica un contenido de cemento ≥ 300 . En la tabla 2.3 de la publicación técnica 181 cuando hace referencia a la exposición a el agua de mar en zona sumergida se recomienda un contenido de cemento de 330 kg/m ³ mínimo, una relación a/c de 0.5 y una f _c 400 kg/cm ² mínima.
f _c ≥ 300 kg/cm ² mínimo	
Relación a/c ≤ 0.55	
Tipo de cemento N/E	

Tabla 41 Especificaciones de concreto determinadas por las normas de la SCT para zona totalmente sumergida.

Especificaciones del concreto determinadas por las normas ACI	
Zonas de exposición crítica Moderada (agua de mar)	Características de la zona crítica Zonas susceptibles a la corrosión, ambiente expuesto a cloruros de sales y agua de mar
Recubrimiento 5 cm mínimo	Observaciones El contenido mínimo de cemento utilizado en los concretos para este tipo de exposición debe ser de 356 kg/m ³
f _c 280 kg/cm ² mínimo	
Relación a/c 0.45	
Tipo de cemento II, IP (MS), IS (MS), P (MS), (PM) (MS), (SM) (MS)	

Tabla 42 Especificaciones de concreto determinadas por las normas ACI para zona totalmente sumergida.

Especificaciones del concreto determinadas por las normas EHE	
Zonas de exposición crítica IIIb	Características de la zona crítica Estructuras que se encuentran sumergidas debajo del nivel mínimo de baja mar
Recubrimiento 3 cm mínimo	Observaciones Se recomienda un contenido mínimo de cemento 325 kg/m ³
f _c 300 kg/cm ² mínimo	
Relación a/c 0.5	
Tipo de cemento N/E	

Tabla 43 Especificaciones de concreto determinadas por las normas EHE para zona totalmente sumergida.

5. MANUAL DE CONTROL DE LA CALIDAD

Como ya se mencionó, la calidad del concreto está determinada por los materiales que se requieren para su fabricación y por su proporcionamiento. Aunque, también puede verse afectada por diversos factores, como; el proceso de fabricación utilizado, el transporte y el tiempo de mezclado, así como el manejo, los procesos de colocación y el curado que se le dé una vez que este ha sido colocado en su disposición final.

Para realizar el diseño de la mezcla de concreto se deberán revisar las siguientes fases, con la finalidad de abarcar todos los procesos que pueden llegar a afectar y/o modificar su calidad final:

- Ubicación del elemento y zonas de exposición.
- Parámetro para el diseño del elemento.
- Proceso constructivo del elemento
- Parámetro para el diseño del concreto.
- Diseño de la mezcla de concreto.

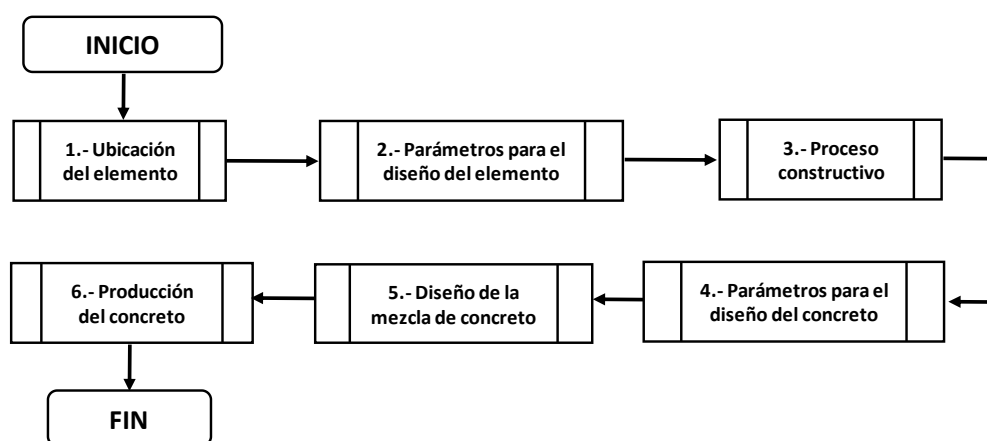


Figura 22 Diagrama de flujo de la cadena de producción del concreto.

En cada una de las fases, se indican los datos de entrada que se debe tener y los datos de salida que se obtendrán después del análisis. Es importante contar con parámetros para la aceptación y/o rechazo de los materiales y del producto, así como las pruebas que se requieren para el control de la calidad, incluyendo los registros que se deben generar como evidencia de su cumplimiento.

Adicional a ellos, se mencionan las recomendaciones para, la elaboración, el transporte, el manejo y la colocación.

5.1. UBICACIÓN DEL ELEMENTO Y ZONAS DE EXPOSICIÓN

Uno de los primeros pasos para poder determinar las características que el concreto debe cumplir para ser utilizado en la construcción de obras portuarias es, la ubicación de los elementos con respecto a la costa, es decir, que tan próximo o alejado se encuentran de

ella, así como su ubicación sobre el nivel del mar. Esta información es importante para identificar las condiciones de exposición a las que va a estar sometido el elemento.

Datos de entrada: La información que se requiere en esta etapa es, la ubicación del elemento, dimensiones del elemento, batimetría de la costa que incluya el nivel de pleamar máximo y de bajamar mínimo.

Datos de salida: Después del análisis de la información se podrán determinar, las zonas de exposición y la zona crítica de exposición que será utilizada para el diseño del elemento.

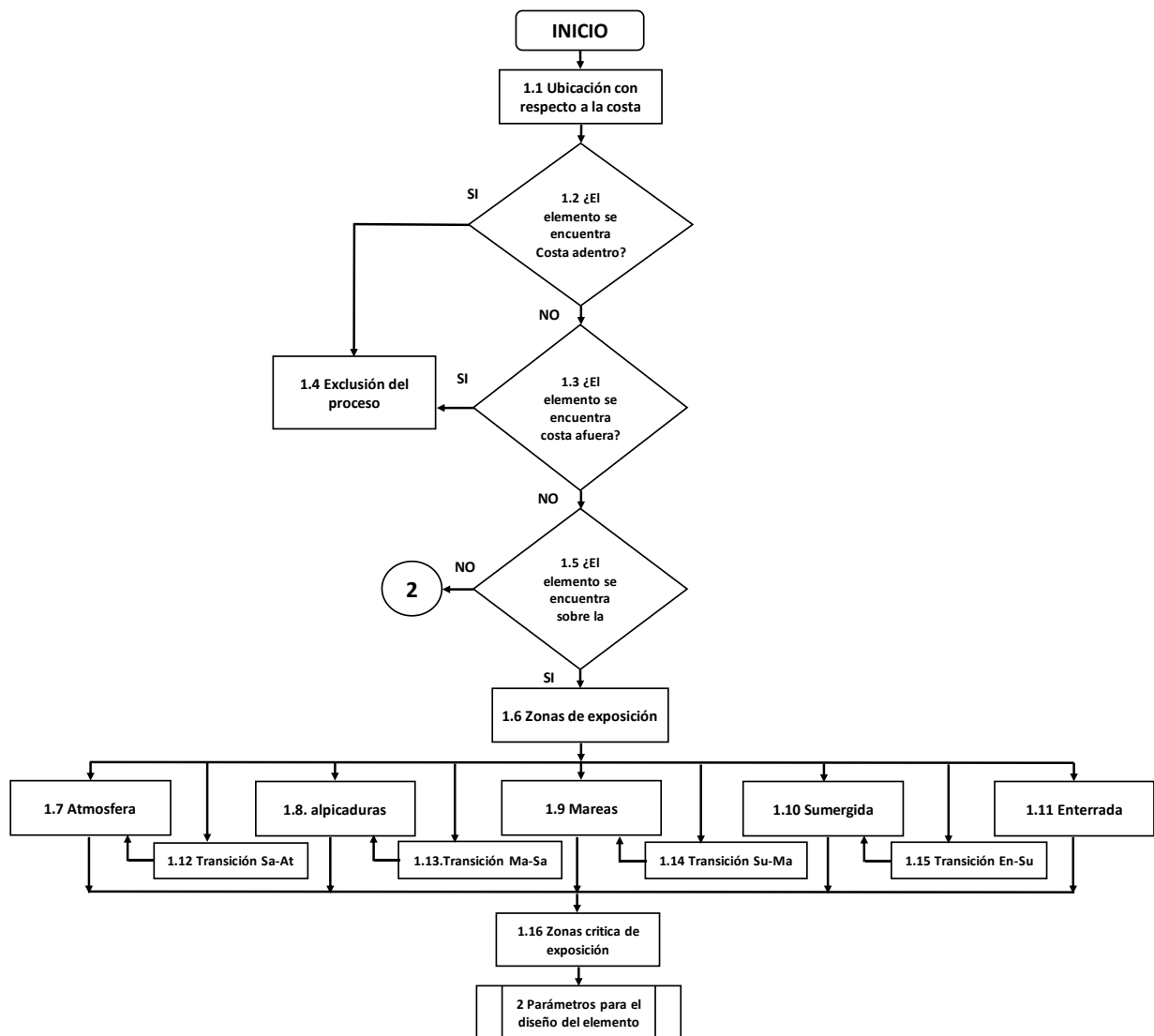


Figura 23 Diagrama de flujo para determinar la ubicación del elemento y la zona de exposición.

- Ubicación sobre el nivel del mar

Un elemento puede encontrarse en más de una de las zonas de exposición, a pesar de ello, se deberá diseñar con las características de la zona más crítica, aunque la porción que se encuentre en ella sea menor que el de alguna otra, ya que por cuestiones de diseño estructural y por proceso constructivo es poco viable que un mismo elemento posea diferentes características a lo largo de su estructura.

Como ya se mencionó en el *apartado 4.4 de este trabajo de investigación*, las zonas de exposición en las que puede encontrarse un elemento estructural dentro de una obra portuaria son: zona de atmosfera marina, zona de salpicaduras, zona de mareas, zona sumergida, y zona enterrada. Entre cada una de estas zonas, se encuentra una zona de transición (*ver figura 24 Zonas de exposición y sus límites*), llamada así debido a que, es el lugar en el que se unen dos zonas con diferentes características.

Con la finalidad de ubicar un elemento de una obra portuaria de manera precisa, se realiza la siguiente delimitación de las zonas de exposición:

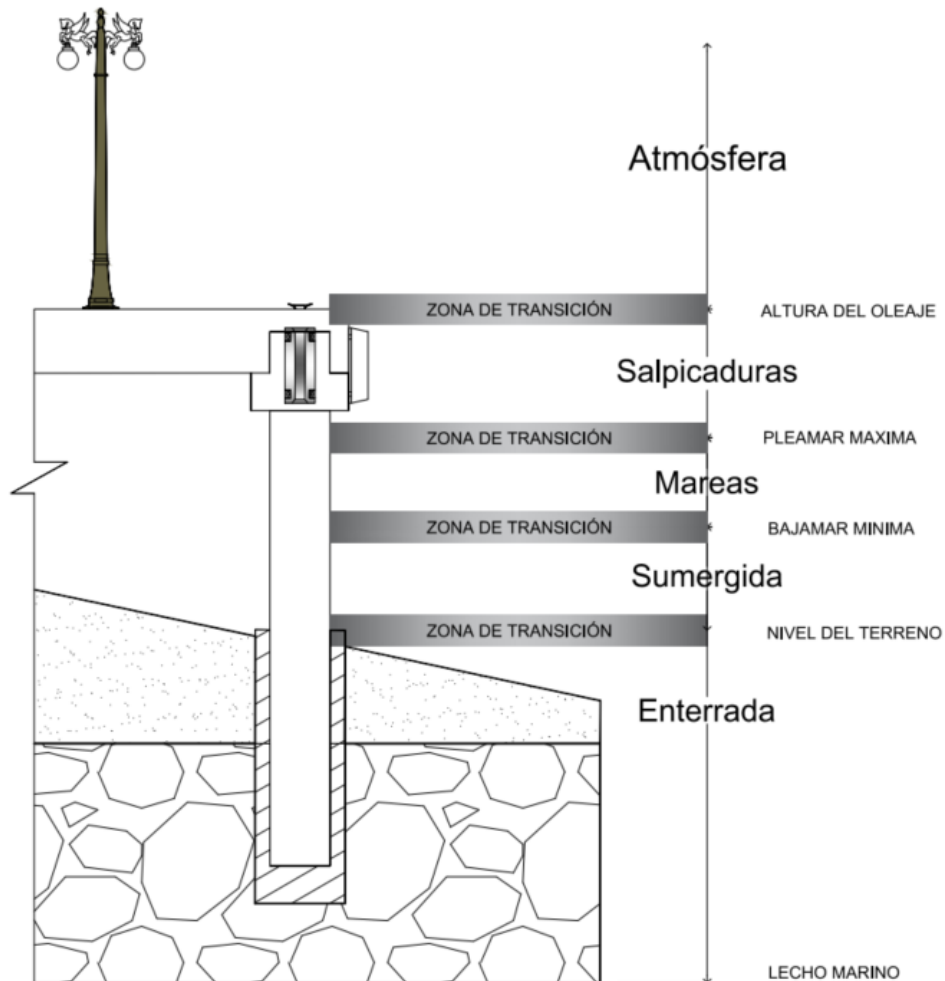


Figura 24 Zonas de exposición y sus límites.

Zona de atmosfera marina

Se encuentra delimitada en su parte inferior por la altura del oleaje, y en la parte superior, se considera que no tiene un límite, sin embargo, conforme aumenta la altura, las concentraciones de la atmosfera marina van disminuyendo.

Zona de salpicaderas

El límite inferior de esta zona, estará determinado por el nivel de pleamar máxima registrada y la altura del oleaje.

Zona mareas

Esta zona se encontrará delimitada por las mareas, en su parte superior por el nivel de pleamar máxima registrada y en su límite inferior por el nivel de bajamar mínima registrada.

Zona sumergida

Se encuentra localizada desde el nivel del terreno natural o de relleno, hasta el nivel de baja mar mínima.

Zona enterrada

Esta zona se encuentra por debajo del terreno natural, y puede ser de altura muy variable dependiendo de la configuración que presente la costa. Estará comprendida desde el nivel del desplante del elemento hasta el nivel de terreno natural o hasta el nivel de relleno cuando así corresponda.

Zonas de transición

Se le denomina así al lugar ubicado entre dos zonas de exposición con características diferentes. Se distinguen 4 zonas de transición, las cuales se encuentran localizadas entre la zona de atmosfera marina y la zona de salpicaduras, entre la zona de salpicaduras y la zona de mareas, entre la zona de mareas y la zona sumergida y entre la zona sumergida y la zona enterrada. La zona de transición abarcará 20% de la zona superior y 20% de la zona inferior, ubicada desde el límite de las zonas hacia arriba y hacia abajo respectivamente como se muestra en la *figura 24 Zonas de exposición y sus límites*. Para fines del diseño del concreto, en toda la zona de transición se deberán considerar las características de la zona de exposición subsiguiente.

Zona critica de exposición

Sé conoce cómo zona critica aquella que posee las condiciones de exposición más desfavorables a lo largo del elemento, aunque este se encuentre en más de una zona. El diseño del concreto se deberá realizar considerando las características de esta zona con la finalidad de garantizar la calidad de todo el elemento. En el apartado *4.4 de este trabajo de investigación*, se mencionan las características de cada zona y los efectos que estas tienen sobre el concreto.

- Ubicación del elemento sobre el horizonte marino

En el eje horizontal paralelo a la costa, se distinguen tres diferentes zonas, denominada costa adentro, área sobre la línea de costa y costa afuera, las estructuras construidas en el área de costa adentro, no tendrán contacto con agua de mar, solo con el terreno y la atmosfera marina, en cambio, los elementos construidos en las áreas sobre la línea de costas y costa adentro, podrán estar sometidas a diferentes condiciones de exposición.

5.2. PARÁMETRO PARA EL DISEÑO DEL ELEMENTO.

Una vez identificadas las zonas en las que se encuentra el elemento, y se determina la zona critica de exposición, se establecerán las características específicas que son necesarias para el diseño estructural del elemento. En esta parte del proyecto, es importante contar con el apoyo de un experto en análisis estructural.

Datos de entrada: Zona critica de exposición.

Datos de salida: Resistencia a la compresión determinada por el calculista, cumpliendo con los valores mínimos de acuerdo con la zona de exposición y por durabilidad del elemento. Además, el calculista determinará el armado del elemento y el recubrimiento mínimo requerido.

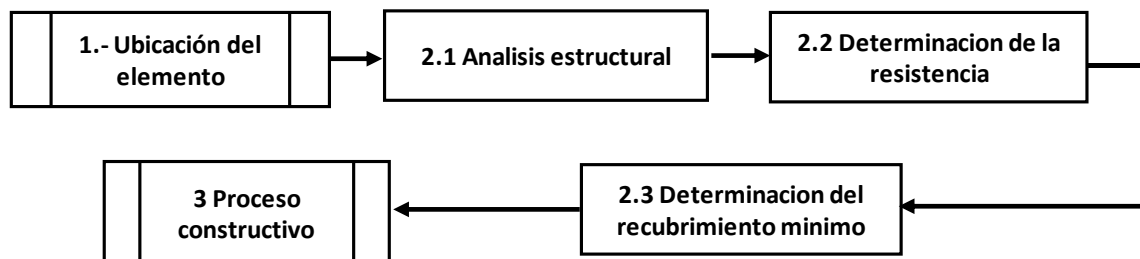


Figura 25 Diagrama de flujo para el diseño del elemento.

El calculista encargado del diseño, deberá determinar la resistencia a compresión y el recubrimiento del concreto que el elemento estructural requiere para ser capaz de soportar las cargas de diseño, considerando los valores mínimos que se muestran en *la tabla 44 Resistencia a compresión y recubrimiento mínimo para las diferentes zonas de exposición*, y la resistencia mínima requerida.

Zona de exposición	f'c mínima en kg/cm ²	Recubrimiento mínimo en mm
Atmosfera marina	350	75-90
Salpicaduras		
Mareas	300	50-60
Sumergida		
Enterrada	250	40-50

Tabla 44 Resistencia a compresión y recubrimiento mínimo para las diferentes zonas de exposición.

5.3. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL ELEMENTO.

El proceso constructivo debe ser establecido acorde al elemento que se va a construir, considerando las especificaciones determinadas por el calculista. En esta parte del proyecto, es importante contar con el apoyo de un experto de la construcción.

Datos de entrada: Resistencia a compresión del concreto, armado del elemento y recubrimiento mínimo determinados por el análisis estructural.

Datos de salida: Revenimiento del concreto, tamaño máximo de agregado grueso determinados por el armado del elemento y edad de resistencia.

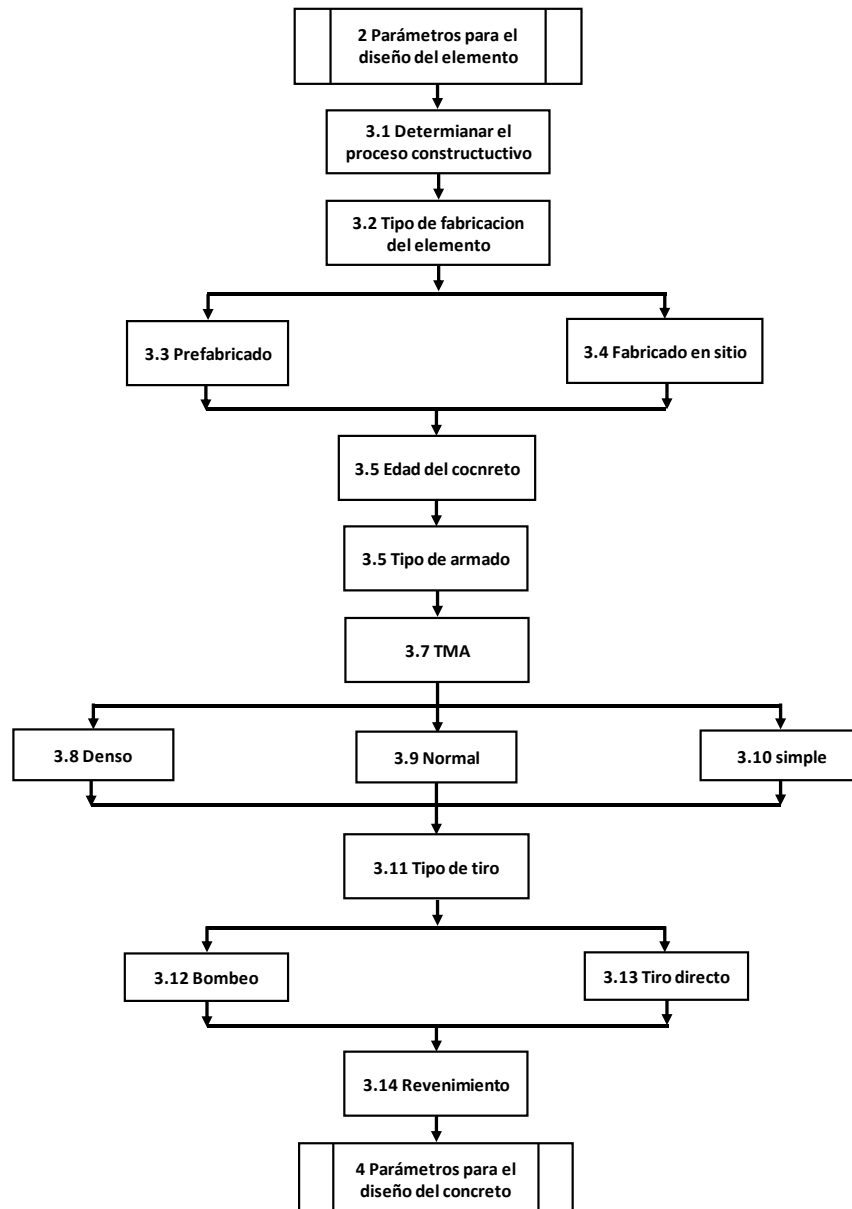


Figura 26 Diagrama de flujo para determinar el proceso constructivo del elemento.

Los elementos estructurales, pueden ser prefabricados o fabricados en el sitio. Se recomienda que en medida de lo posible la mayoría de estos elementos sean prefabricados, con la finalidad de disminuir el contacto del concreto fresco con el ambiente agresivo.

Dependiendo del proceso constructivo que se utilice para la fabricación de los elementos, se determina la edad a la que se requiere la resistencia a compresión, es decir si se trata de una resistencia rápida a 24 horas ,3 días o si se trata de una resistencia normal a 28 días.

Establecer un valor específico para el revenimiento del concreto tiene como objetivo facilitar su acomodo durante el proceso constructivo, para garantizar la expulsión de todo el aire atrapado y evitar la presencia de oquedades en la estructura que comprometan su funcionamiento.

En la *tabla 45 Revenimiento del concreto de acuerdo con tipo de tiro y a las características del armado*, se hacen algunas recomendaciones, sobre el valor del revenimiento que se requiere, de acuerdo con el armado y el tipo de tiro que se realice.

Tipo de armado	Tipo de tiro	
	Bombeo	Directo
Denso	22-24	18-20
Normal	20-22	16-18
Simple	16-20	12-16

Tabla 45 Revenimiento del concreto de acuerdo con tipo de tiro y a las características del armado.

Otro factor a determinar es, el tamaño máximo del agregado, el cual se encuentra en función del armado del elemento y del espesor del recubrimiento del concreto ya que este deberá ser por lo menos de un 3/4 de la separación del armado o 1/5 de la menor dimensión estructural. Este valor, también podrá ser recomendado por el calculista.

5.4. PARÁMETRO PARA EL DISEÑO DEL CONCRETO.

Una vez determinada la resistencia a la compresión como resultado del análisis estructural y el revenimiento del concreto de acuerdo con el proceso constructivo, se establecerán diversos parámetros necesarios para el diseño de la mezcla de concreto.

Datos de entrada: Resistencia a la compresión determinada por el calculista, cumpliendo con los valores mínimos de acuerdo con la zona de exposición y los criterios de durabilidad, y el revenimiento requerido de acuerdo con el proceso constructivo.

Datos de salida: Porosidad y permeabilidad del concreto, además de las características específicas para el diseño de la mezcla de concreto hidráulico, incluyendo, relación agua cemento y cantidad mínima de cemento.

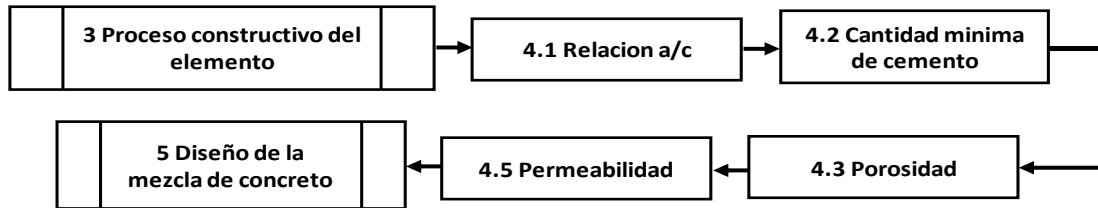


Figura 27 Diagrama de flujo para el diseño del concreto.

Zona de exposición	f'c mínima en kg/cm ²	Relación a/c	Cantidad mínima de cemento kg/m ³
Atmosfera marina	350	0.40	350
Salpicaduras			
Mareas	300	0.45	300
Sumergida			
Enterrada	250	0.50	250

Tabla 46 Parámetros para el diseño del concreto.

La porosidad del concreto debe cumplir con lo descrito en la tabla siguiente:

Porosidad total %	Observaciones
≤ 10%	Buena calidad
10 – 15 %	Moderada calidad
> 15%	Durabilidad inadecuada

Tabla 47 Criterios para la evaluación de la permeabilidad.

El valor de la permeabilidad puede ser establecido por medio de pruebas o utilizando los criterios de la gráfica siguiente:

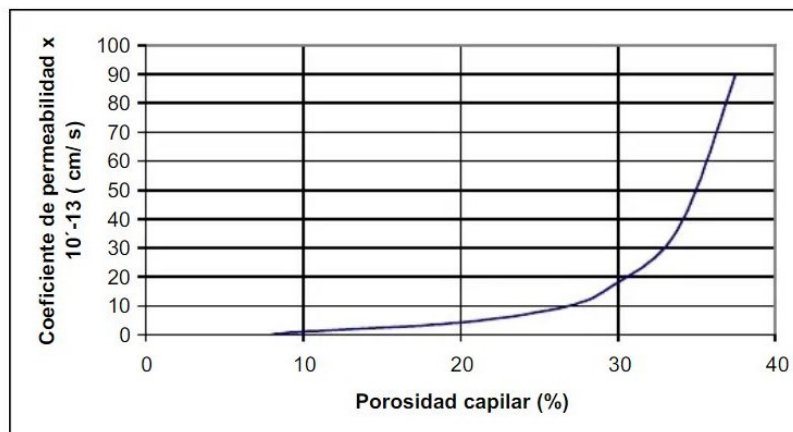


Figura 28 Relación entre la permeabilidad y la porosidad.

La información obtenida en este apartado, sirve como base para el diseño de la mezcla del concreto. Es importante que el diseño y el proporcionamiento de la mezcla de concreto se realice por un experto en el tema.

Los datos indicados en las tablas 46 parámetros para el diseño del concreto, 47 criterios para la evaluación de la permeabilidad y la figura 28 relación entre la permeabilidad y la porosidad, se establecen con base en los estudios existentes de la velocidad del avance de la corrosión en las estructuras de concreto.

5.5. DISEÑO DE LA MEZCLA

El diseño de la mezcla, es una de las etapas más importantes dentro de la cadena de producción, ya que de ella depende en gran medida el buen funcionamiento del concreto dentro de la estructura del elemento.

Datos de entrada: Resistencia a la compresión determinada por el calculista, edad de resistencia, revenimiento de acuerdo con el proceso constructivo, relación agua cemento, cantidad mínima de cemento y tamaño máximo de agregado.

Datos de salida: Diseño de la mezcla de concreto, indicando el proporcionamiento de los materiales por metro cubico.

Para realizar el diseño de la mezcla de concreto incluyendo todos los requisitos y características que este debe cumplir, se deben considerar los siguientes pasos:

- Contar con las especificaciones para el diseño del concreto.
- Conocer las características de los materiales.
- Seleccionar un método de diseño.
- Realizar el diseño cuantitativo de la mezcla.
- Realizar la mezcla base en el laboratorio y toma de muestras.
- Validación de resultados y aprobación del diseño.
- Entrega de informe.

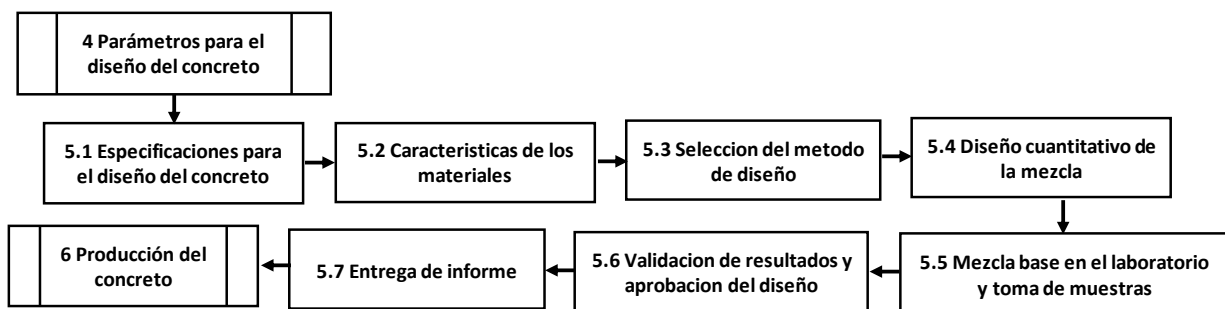


Figura 29 Diagrama de flujo para el diseño de la mezcla de concreto.

A continuación, se describe cada una de las etapas que se requieren para realizar el diseño de la mezcla de concreto.

a) Especificaciones para el diseño del concreto.

- *Resistencia a la compresión en kg/cm^2* , este valor es determinado por el calculista de acuerdo con lo establecido en el *apartado 6.2 parámetros para el diseño del elemento*.
- *Edad de la resistencia a la compresión*, este dato se define en el *apartado 6.3 proceso constructivo del elemento*.
- *Revenimiento en cm*, se establece de acuerdo con el proceso constructivo que se requiere para la fabricación de los elementos, como se indica en el *apartado 6.3 proceso constructivo del elemento*.

- *Porosidad en % y permeabilidad cm/s*, estos valores del concreto, se establecen en el *apartado 6.4 parámetros para el diseño del concreto*, los cuales son necesarios para garantizar la durabilidad del elemento.
- *Relación agua/cemento*, este valor adimensional, se especifica en el *apartado 6.4 parámetros para el diseño del concreto*, el cual esta determina por la zona critica de exposición en la que se encuentra el elemento.
- *Cantidad mínima de cemento en kg/m³*, en el *apartado 6.4 parámetros para el diseño del concreto* se determina este valor, el cual está relacionado con la resistencia a la compresión requerida.
- *Tamaño máximo de agregado en mm*, este valor se determina en el *apartado 6.3 proceso constructivo del elemento*.

b) Características de los materiales.

Los materiales disponibles para la fabricación del concreto, varían de una zona geográfica a otra, por ello, es importante conocer sus características y verificar que cumplan con los requisitos mínimos para ser utilizado en la elaboración del concreto.

- Cemento:

Todo el cemento utilizado para la fabricación de concreto en obras portuarias, deberá ser resistente a los sulfatos (tipo RS) y contar con una resistencia mínima 30R, 40 o 40R.

Para el diseño del concreto se deberá contar con el valor de la densidad del cemento que va a ser utilizado.

o Calidad del cemento:

El cemento que se utilice, debe cumplir con lo establecido por la SCT en la norma N CMT 2 02 001/02, en la cual, se indican los requisitos de calidad de los cementos portland que se utilice en la elaboración del concreto hidráulico.

- Agua:

El agua a utilizar en todo el proceso de producción, deberá ser potable y libre de impurezas orgánicas. En ningún caso deberá ser utilizada el agua de mar como materia prima, para lavado de agregados o en alguna etapa de la cadena de producción.

o Calidad del agua:

El agua que se utilice, debe cumplir con lo establecido por la SCT en la norma N CMT 2 02 003/02, en la cual, se indican los requisitos que debe cumplir el agua para la elaboración del concreto hidráulico.

- Agregados:

Es importante conocer todas las características de los agregados con los que se cuenta para la fabricación del concreto, en ningún caso, se aceptará el uso de agregados ligeros

para la fabricación del concreto. Para realizar el diseño de la mezcla de concreto, es necesario conocer los siguientes datos de los agregados.

- Densidad.
- Peso volumétrico suelto (kg/m^3)
- Peso volumétrico compacto (kg/m^3)
- Porcentaje de absorción (%)
- Granulometría.
- Contaminación organica en el agregado fino.
- Material que pasa la malla No. 200.
- Resistencia al desgaste.
- Reactividad de los agregados.
- Tamaño máximo del agregado para el agregado grueso.
- Módulo de finura para el caso del agregado fino.

○ Calidad de los agregados:

Los agregados que se utilicen, deben cumplir con lo establecido por la SCT en la norma N CMT 2 02 002/02, en la cual, se indican las características de calidad de los agregados que se utilizan en la fabricación del concreto hidráulico.

- Aditivos:

Los aditivos, serán utilizados de acuerdo con las necesidades del proceso constructivo, de las condiciones climáticas y de colocación, pudiendo utilizar reductores de agua, retardantes, plastificantes, etc.

○ Calidad de los aditivos

Los aditivos que se utilice, deben cumplir con lo establecido por la SCT en la norma N CMT 2 02 004/02, en la cual, se indican las características de calidad de los aditivos químicos que se utilizan en la fabricación del concreto hidráulico.

c) Seleccionar un método de diseño.

El método de diseño de la mezcla, será determinado por el especialista del concreto, ya que, por lo general, las plantas productoras de concreto premezclado cuentan con un procedimiento específico con el que trabajan de manera permanente, sin embargo, si no se cuenta con un método, se puede utilizar algunos de los siguientes, siempre y cuando se cumplan con las especificaciones para el diseño del concreto requeridas por el proyecto.

- Métodos de dosificación basados en el contenido de cemento.

Método de Fuller- Thompson, es utilizado cuando los agregados son redondeados y el TMA se encuentra entre 50+/-20 mm, la cantidad mínima de cemento a utilizar debe ser

superior a 300 kg/m^3 , además se recomienda su uso cuando los armados de la sección no son densos.

Método de Bolomey, es un método similar al método de Fuller- Thompson, ya que para determinar diversos valores utilizan las mismas tablas, sin embargo, la diferencia radica en el hecho de que el método de Bolomey, utiliza una curva granulométrica variable para el proporcionamiento de los agregados, la cual se encuentra en función de relación grava/arena, en función de la consistencia deseada.

- Métodos de dosificación basados en la resistencia a compresión.

Método ACI, este método se toma como base la resistencia a la compresión que se desea obtener en el concreto, considerando una relación agua cemento que garantice la durabilidad y la resistencia. Este tiene dos aplicaciones principales, para concretos convencionales y para concretos secos.

Método de la Peña, este método de dosificación se utiliza en concretos estructurales partiendo de un contenido mínimo de cemento de 300 kg/m^3 .

Los procedimientos mencionados se describen de una manera más detallada en el anexo A Métodos de diseño de mezclas de concreto.

d) Diseño cuantitativo de la mezcla.

Se realiza el diseño de la mezcla de concreto, utilizando el método seleccionado, tomando en cuenta todos los requisitos y características requeridas por el proyecto, con la finalidad de contar con el proporcionamiento de los materiales requerido para la fabricación de un metro cubico de concreto. Después de realizar el diseño, se debe contar con la siguiente información:

- *Datos obtenidos en el diseño*
 - Resistencia a la compresión de diseño (kg/cm^2)
 - Revenimiento de diseño (cm)
 - Relación agua/cemento.
 - Relación grava/arena.
 - Cantidad de los materiales por metro cubico de concreto:
 - Cemento en kg/m^3
 - Agregado fino en kg/m^3
 - Agregado grueso en kg/m^3
 - Agua en l/m^3
 - Aditivo cc

e) Mezcla base en el laboratorio y toma de muestras

Es importante que se verifique el cumplimiento del diseño de la mezcla de concreto que se realizó de manera teórica en el paso anterior, este procedimiento, tendrá lugar en el

laboratorio, en el cual, se realizara una serie de pruebas para verificar su cumplimiento, y realizar los ajustes que se requieran en diseño.

1. Determinar las pruebas de laboratorio.

Antes de comenzar con la elaboración de la mezcla de prueba en el laboratorio, es necesario que se establezca un plan de pruebas, en el cual se indican las pruebas de laboratorio que se requieren para verificar el cumplimiento del diseño realizado:

- Revenimiento (cm)
- Peso volumétrico del concreto fresco (kg/m^3)
- Contenido de aire (%)
- Resistencia a la compresión (kg/cm^2)
- Peso volumétrico del concreto endurecido (kg/m^3)
- Porosidad %
- Permeabilidad cm/s
- Absorción (%)

2. Volumen de mezcla requerido.

El volumen de mezcla a fabricar en el laboratorio, estará determinado por la cantidad de muestreos que se realicen de acuerdo con el plan de pruebas. Las pruebas al concreto en estado fresco, no desechan el material por lo que este puede ser utilizado para las probetas para determinar la resistencia a la compresión. Por lo general las mezclas base de laboratorio, no exceden los 50 litros.

3. Contenido de humedad de los agregados y ajuste por humedad.

Los agregados a utilizar, están sujetos a diferentes contenidos de humedad, dependiendo del clima y las condiciones en las que se encuentre, por ello es importante establecer el % de agua que posee de manera interna cada uno de ellos, después, se debe realizar un ajuste en la cantidad de agua de mezclado.

El procedimiento para determinar el % de humedad de los agregados, debe realizarse conforme al procedimiento establecido por la norma N CMT 2 02 002/02.

4. Calcular los pesos de los materiales.

Una vez que se ha establecido, el volumen de la mezcla y se ha hecho el ajuste por humedad, es necesario pesar los materiales para realizar la mezcla base. de acuerdo con el volumen que se requiere para las pruebas, establecido en el *punto 2 Volumen de la mezcla requerido*.

5. Preparar el equipo de laboratorio.

Los materiales, herramientas y equipos que se requieren para realizar las muestras, estarán determinados en el procedimiento descrito en cada una de las normas, sin

embargo, para realizar la mezcla en el laboratorio se requieren, bascula de 50 kg, trompo revolvedor, botes de 19 litros.

6. Pesaje los materiales.

En esta parte del procedimiento, se pesan los materiales necesarios para la mezcla, de acuerdo con los valores que se establecieron el punto 5.

7. Realizar la mezcla.

- Se humedece el trompo para que no absorba la humedad de los materiales.
- Se coloca la arena, la grava y el cemento en el trompo y se mezcla.
- Se coloca el agua mezclada con el aditivo, reservando algunos litros de agua para hacer el ajuste si se requiriere.
- Se mezcla el concreto durante 2 minutos y se deja reposar, para posteriormente retomar el mezclado.
- Se va colocando la cantidad de agua de acuerdo a la consistencia que se vaya viendo en el concreto.

8. Determinar el revenimiento.

El primer muestreo a realizar es, determinar la consistencia por medio de la prueba de revenimiento, la cual se deberá realizar conforme a lo descrito en el manual M MMP 2 02 056/06 Revenimiento del concreto fresco.

9. Ajuste de la cantidad de agua utilizada en la mezcla.

Si después de realizar la prueba del revenimiento, este no cumple con lo establecido en la norma, se deberá realizar un ajuste de agua mayor o menor cantidad, dependiendo del resultado obtenido, hasta obtener el revenimiento de diseño, de acuerdo con el siguiente criterio de corrección:

- Aumentar o disminuir el contenido de agua en 2 kg/m^3 del concreto, si se desea aumentar o disminuir en 1 cm el revenimiento.

10. Determinar el peso volumétrico

Cuando se ha llegado al valor de revenimiento de diseño, se procederá a determinar el peso volumétrico del concreto en estado fresco como lo establece la norma M·MMP·2·02·053/04 Características del concreto con inclusor de aire.

- Para reestimar el peso por metro cúbico del concreto fresco tras el ajuste, reducir o aumentar el obtenido en la mezcla de prueba en igual porcentaje al incremento o disminución del contenido de aire atrapado.

- Reducir o aumentar el contenido de agua en 3 kg/m^3 del concreto, si se desea aumentar o disminuir en un 1% el contenido de aire atrapado.

11. Toma de temperatura.

Como ya se mencionó en el apartado 4.3.1.1 efectos del clima en el concreto de este trabajo de investigación, la temperatura es un factor importante en la calidad final del concreto, por lo que es importante determinar tanto la temperatura ambiente, como la temperatura propia del concreto como se describe en el apartado D.3 de la norma N CTM 2 02 005/04 Calidad del concreto hidráulico.

12. Establecer el contenido de aire.

El contenido de aire del concreto en estado fresco, se deberá determinar siguiendo el procedimiento del manual M MMP 2 02 053/04 Características del concreto con inclusor de aire.

13. Tomar muestra y llenado las probetas.

Con la finalidad de determinar el cumplimiento de la resistencia a la compresión del concreto, se elaboran probetas conforme al manual M·MMP·2·02·055/04, Muestreo de concreto hidráulico.

14. Descimbrado y curado de los especímenes.

Las muestras tomadas, deberán ser resguardadas para no alterar los resultados, al manual M·MMP·2·02·055/04, Muestreo de concreto hidráulico establece el procedimiento que se debe seguir

15. Determinar la resistencia a la compresión.

Los especímenes de concreto, deberán ser ensayados para determinar su resistencia a la compresión, a las edades determinadas en el apartado 6.3 de este trabajo de investigación, proceso constructivo del elemento. Este procedimiento deberá ser realizado como lo indica el manual M·MMP·2·02·058/04, Resistencia a la compresión simple de cilindros de concreto

16. Determinar la absorción y la porosidad del concreto.

Estos valores, pueden ser determinados como lo indica la norma NMX-C-263-ONNNCCE, concreto hidráulico endurecido- determinación de la masa específica, absorción y vacíos, o con la norma ASTM-C-642 densidad absorción y vacos en concreto endurecido, ya que la SCT no cuenta con una norma para estas especificaciones.

Para optimizar el tiempo requerido para determinar la mezcla que será utilizada para la construcción de los elementos estructurales en obras portuarias, se recomienda realizar varias pruebas por día, aplicando variables de diseño y/o materiales.

f) Validación de resultados y aprobación del diseño.

Después de realizar la mezcla en el laboratorio y someterla a pruebas, se deberá realizar un análisis de los resultados obtenidos con el fin de verificar el cumplimiento de cada uno

de los requisitos de diseño establecido en *el inciso A, especificaciones para el diseño del concreto*.

Solo se aprobará el diseño de mezcla que cumpla al 100% con los requisitos solicitados.

g) Entrega de informe.

Con la finalidad de contar con evidencia que demuestre el cumplimiento de los requisitos del concreto para ser utilizado en la construcción de obras portuarias, se deberán entregar los siguientes documentos:

De las características de los materiales

- Cemento: certificado de la calidad del producto, emitido por el fabricante, en el que se cumplan las especificaciones para el tipo de cemento solicitado de acuerdo con la norma N CMT 2 02 001/02.

- Agregados: certificado de la calidad de los materiales, emitido por el proveedor, los cuales deben incluir los resultados de las pruebas de laboratorio siguientes, conforme a la norma N CMT 2 02 003/02.

- Densidad.
- Peso volumétrico suelto (kg/m^3)
- Peso volumétrico compacto (kg/m^3)
- Porcentaje de absorción (%)
- Granulometría.
- Contaminación orgánica en el agregado fino.
- Material que pasa la malla No. 200.
- Resistencia al desgaste.
- Reactividad de los agregados.
- Tamaño máximo del agregado para el agregado grueso.
- Módulo de finura para el caso del agregado fino.

En caso de no contar con laboratorio interno, el certificado, podrá ser emitido por un laboratorio externo acreditado ante EMA en las pruebas mencionadas.

- Aditivo: Ficha técnica del producto a utilizar en la que se garantice el cumplimiento de la norma N CMT 2 02 004/02.

Del diseño de la mezcla

- Resistencia a la compresión de diseño (kg/cm^2)
- Revenimiento de diseño (cm)
- Relación agua/cemento.
- Contenido mínimo de cemento.

Del cumplimiento de los requisitos

- Resistencia a la compresión obtenida (kg/cm²)
- Revenimiento (cm)
- Porcentaje de absorción.
- Porosidad.
- Permeabilidad.

5.6. PROCESO DE PRODUCCIÓN DEL CONCRETO

El proceso de producción, juega un papel fundamental en la calidad final del concreto, por esta razón, se debe seguir una serie de controles durante el proceso de elaboración, transporte, manejo y colocación, con la finalidad de tener un control más estricto de la calidad del concreto.

Se recomienda realizar una lista de verificación de los puntos de cada etapa para confirmar su cumplimiento.

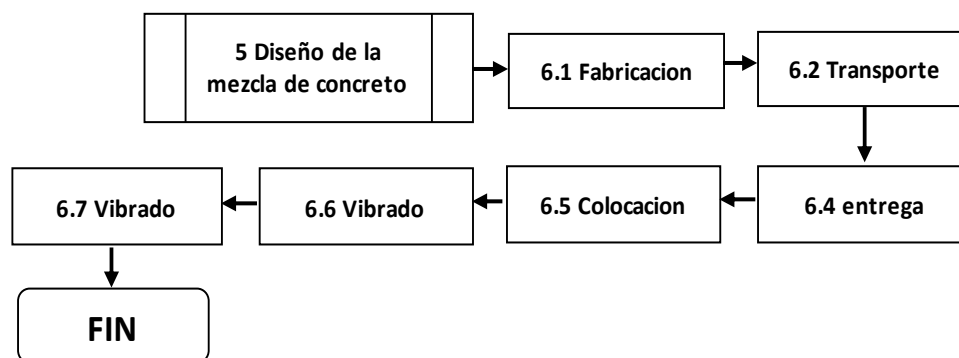


Figura 30 Diagrama de flujo proceso de producción del concreto

a) Fabricación.

- Cuando los elementos estructurales son prefabricados, se puede tener un mejor control de la calidad del concreto.
- No se acepta el método de carga de los materiales por volumen para la fabricación del concreto, debido a que la variación de cantidades durante la carga de los materiales aumenta la desviación en los resultados obtenidos de una mezcla a otra.
- El concreto deberá ser mezclado por medios mecánicos, ollas revolvedoras o mezcladoras fijas, en ningún caso se aceptarán medios de mezclado manuales.
- Los equipos deberán estar limpios, libres de concreto endurecido de mezclados anteriores para evitar la contaminación del material y la pérdida de humedad de la mezcla.
- Los agregados deberán almacenarse de tal manera que no exista contaminación entre ellos o de agentes externos que comprometan su calidad.

- Se deberá realizar el ajuste por humedad de los agregados para tener un mejor control del revenimiento y no afectar la relación agua/cemento de diseño.

- Se deberán revisar todos los equipos de dosificación y mezclado antes de comenzar con la fabricación del concreto.

b) Transporte.

- El concreto deberá transportarse utilizando equipos que eviten la segregación de los materiales y mantengan su consistencia.

- El transporte podrá realizarse por medio de camiones mezcladores o tolvas, dependiendo del proceso constructivo que se utilice y si los elementos son prefabricados o colados en el sitio.

- El tiempo máximo permitido, desde que el cemento comienza a hidratarse al hacer contacto con el agua de la mezcla hasta que el concreto recibe un acabado en la superficie, no deberá ser mayor a los 90 minutos. Este tiempo, podrá ser prolongado con algún aditivo siempre y cuando se realice bajo la supervisión de un experto.

c) Entrega del concreto

- El concreto podrá ser suministrado por un proveedor o fabricado por el constructor, siempre y cuando se cumpla con los requisitos solicitados.

- Si el concreto es suministrado por un tercero, durante la entrega, se debe revisar que la remisión que cumpla con los requisitos solicitados, (f'c, revenimiento, TMA, hora de fabricación, volumen suministrado).

- Antes de su colocación, es importante verificar que el concreto cumpla con el revenimiento solicitado como se indica en el manual M MMP 2 02 056/06 Revenimiento del concreto fresco, para su aceptación o rechazo.

- También, se deberá tomar muestra del concreto como lo indica el manual M·MMP·2·02·055, Muestreo de concreto hidráulico, para determinar la resistencia a compresión a la edad requerida, como lo indica el manual M·MMP·2·02·058/04, Resistencia a la compresión simple de cilindros de concreto.

d) Colocación.

- El cimbrado del elemento, podrá ser fabricado a base de metal, madera, plástico o material no absorbente, siempre y cuando se asegure su resistencia para no presentar deformaciones durante la colocación del concreto.

- Antes de comenzar el vaciado del concreto, se deberá verificar que el cimbrado se encuentre libre de residuos de concreto, grasas, o cualquier tipo de contaminación que comprometa la calidad del concreto que va a ser colocado.

- El acero de refuerzo deberá encontrarse libre de grasas o materiales contaminantes que afecten su adhesión con el concreto.
- Cuando se trate de cimbras recuperables, se deberá colocar desmoldante para facilitar el descimbrado.
- El concreto se colocará por tiro directo o por bombeo dependiendo del proceso constructivo que se esté utilizando.
- El concreto, deberá ser vaciado de una altura inferior a 1.20 m. Cuando no se pueda realizar, se deberán utilizar canalones o tubos para evitar que la mezcla se impacte contra los refuerzos, provocando segregación de sus componentes.
- Cuando se utilicen canalones, es importante verifique que la pendiente de éstos se encuentre entre el 30% y 50%.
- Al momento de ser colocado el concreto, su temperatura no deberá ser mayor de 32 °C para evitar dificultades debidas a pérdida de revenimiento.
- Se deberán evitar lo retrasos en la colocación del concreto de un mismo elemento con la finalidad de evitar la formación de juntas frías que comprometan la calidad del concreto y del elemento.
- No se recomienda la adición de agua de mezclado antes de la colocación del concreto con el fin de aumentar su revenimiento, ya que esto afectara su relación agua/cemento y por consiguiente su resistencia, en caso de ser necesario se podrá colocar algún aditivo retardante siempre y cuando se realice con la autorización y supervisión de un experto.
- No se deberá colocar material ya endurecido y/o contaminado con materiales externos.
- Se recomienda que el concreto se deposite directamente en cimbrado del elemento a fabricar, por lo que se debe evitar en lo posible, depositar el concreto en artenas o depósitos de almacenamiento temporal previo a su colocación.
- Los elementos monolíticos de gran volumen, se colarán en capas horizontales que no excedan los 50 cm de espesor, que sean capaces de ser unidas por medio de la vibración.

e) Vibrado.

- El vibrado del concreto, se deberá comenzar una vez que se haya realizado el vaciado y antes de que el concreto pierda su plasticidad.
- Si se vibra el concreto cuando este ya ha comenzado a endurecerse, se verá afectada su capacidad estructural.

- El vibrado del concreto, puede realizarse de manera interna o externa dependiendo del proceso constructivo utilizado, siempre y cuando se garantice la eliminación de las burbujas de aire atrapado en el interior de la mezcla.

- Los vibradores internos no deben inclinarse o acostarse; deben permanecer verticales para garantizar una distribución homogénea de las ondas de vibración.

- Se debe evitar la sobrevibración del concreto para no producir la segregación de los componentes de la mezcla.

- El vibrado no debe durar más de diez segundos en cada punto, además, no debe usarse como método para desplazar el concreto dentro del cimbrado.

f) Curado

- El curado del concreto, puede realizarse utilizando agua, algún componente químico, o algún método físico de protección, siempre y cuando se garantice conservar la humedad del concreto.

- El curado deficientemente puede disminuir la resistencia hasta un 40 %, además, la falta de un curado adecuado favorece la aparición de fisuras.

- La prolongación del curado de 1 a 3 días puede reducir en 50 % la absorción de agua por capilaridad. La prolongación de 3 a 7 días puede reducir todavía más esta última, en 25 %, y el paso de siete a 28 días, en 15%.

- La prolongación del curado de 1 a 28 días disminuye la profundidad de carbonatación entre 10 y 15 %, de acuerdo con la composición del concreto y el tipo de cemento.

6. CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación realizada, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Se realizó la revisión del estado del arte de las características del concreto hidráulico para ser utilizado en la construcción de elementos estructurales en obras portuarias (ver capítulo 4), incluyendo información relacionada con;

- Elementos estructurales en este tipo de obras,
- Componentes del medio marino y sus efectos en el concreto,
- Zonas de exposición,
- Patologías del concreto armado en obras portuarias y
- Propiedades del concreto.

2. Un elemento de concreto, utilizado en la construcción de estructuras portuarias, puede estar expuestos a cinco condiciones diferentes, las cuales son: zona enterrada, sumergida, mareas, salpicaduras, y atmosfera, (ver apartado 6.1 Ubicación del elemento y zonas de exposición). En el apartado 4.4 zonas de exposición en el ambiente marino, se mencionan las características de cada una de ellas, así como los efectos que tienen sobre el concreto. Después de su análisis se establece que:

- La zona de salpicaduras, es condenadora con la zona de exposición más agresiva para el concreto.

3. Se realizó la revisión de la normativa nacional (NMX, SCT, NTC.) e internacional (EEUU-ACI y España EHE) aplicable al concreto para la construcción de elementos estructurales de concreto en obras portuarias, concluyendo lo siguiente:

- México, no cuenta con una normativa específica en la que se establezcan las características necesarias para el concreto utilizado en la construcción de obras portuarias.
- A pesar de que la norma NMX-C-155-ONNCCE, contiene información relacionada con concreto utilizado en obras portuarias, esta es muy generalizada.
- La norma que contiene especificaciones más estrictas para el diseño de concreto expuesto a ambientes agresivos, es el reglamento de construcción del DF ya que llega a solicitar concretos con resistencia de hasta 500 kg/cm^2 para la construcción de este tipo de obras, sin embargo, para su construcción, las obras portuarias en México se rigen por la normativa de la SCT.
- Las normas de la SCT contienen información referente a las características que debe poseer el concreto hidráulico para cumplir con la calidad, a pesar de ello la información se encuentra generalizada y en los casos específicos lo hace referente a la construcción de carreteras.

- La SCT, en la publicación técnica No. 181 SCT, en el apartado relacionado con las características de concreto durable en ambiente marino, hace mención de los estándares británicos, uso estructural de concreto código de prácticas para el diseño y construcción (BS8110), diseño de puentes de concreto (BS5400 parte 4), Estructuras marítimas prácticas para el diseño de muros de muelles (BS6349 parte 1), sin embargo, algunos de estos códigos se consideran obsoletos desde el año 2010, como es el caso de la norma BS 8110, ya que en el año 2010, fue reemplazado por la EN 1992 (Eurocódigo 2), que es más preciso, económico y adecuado para el diseño estructural y la construcción, aunque algunas partes de la norma anterior se han conservado en el Anexo Nacional del Eurocódigo.
- La normativa de la SCT, tuvo su última actualización en el año 2004 por lo que es importante realizar una revisión y actualización de datos.
- En EEUU, las normas ASTM que contienen información relacionada a la calidad del concreto hidráulico, cuentan con información generalizada, es decir no hacen referencia de manera específica al concreto utilizado para la construcción de obras portuarias, sin embargo, las normas ACI en el apartado de durabilidad del concreto, hacen mención a algunas características relacionadas con este tipo de concreto.
- España cuenta con información de concreto para uso marino de una manera más específica, haciendo referencia a diferentes tipos de concretos, además de mencionar con detalle las características de cada zona de exposición en la que puede encontrarse. También, cuenta con una Guía técnica Hormigón en Ambiente Marino, (IECA, 2013).

4. La revisión del contexto actual de las características de los concretos utilizados en obras portuarias y los procesos de control de calidad se realizó por medio de un estudio de caso del proyecto de construcción de un puerto, a cargo de la SCT, mostrado en el capítulo 5 en el cual se observa que:

- La información especificada en el proyecto referente a las características del concreto es muy limitada, ya que solo se indica,
 - o La resistencia a compresión del concreto
 - o Revenimiento
 - o Tipo de cemento a utilizar
 - o El uso de impermeabilizante integral

Sin embargo, falta especificar datos importantes como,

- o La relación agua cemento
- o Cantidad mínima de cemento
- o Porosidad y permeabilidad
- La resistencia a la compresión del concreto que se indica en el proyecto (250 kg/cm²), es baja considerando que este tipo de obras, se encuentran expuestas a

ambientes agresivos, en algunas normas se recomienda incluso una $f'c$ de 350 kg/cm² es decir casi 30% más que la establecida en el proyecto.

- Cuando en el proyecto se hace referencia a las características del concreto, se indica la resistencia a la compresión y el uso de impermeabilizante integral, a pesar de ello, no se muestran estudios, o ensayos que justifiquen su uso.
- Algunos elementos estructurales del proyecto, cuentan con un recubrimiento adecuado (7.5cm), sin embargo, en el proyecto se encuentran elementos con recubrimientos muy bajos (2.5 cm) en zonas que se consideran altamente agresivas.
- Es importante que el análisis de las características de los concretos y sus especificaciones se realicen de manera individual dependiendo del elemento y de la zona de exposición en la que este se encuentre.
- En algunos casos podrán generalizarse las características del concreto por cuestiones de proceso constructivo para todos los elementos, sin embargo, se deberá diseñar conforme a la condición de exposición más crítica para no poner en riesgo la seguridad de ninguna estructura.

5. Después de realizar el análisis del estado del arte y de la normativa relacionada con el tema, en el capítulo 6 de este trabajo de investigación “**Manual de control de calidad**”, se ha establecido la metodología, en la que se indican:

- Las características y recomendaciones para el diseño de la mezcla de concreto,
- Los procedimientos y cuidados adecuados que se deben tener, durante el diseño, la fabricación, el manejo, la colocación y el curado, así como
- Las pruebas de control de la calidad que se deben realizar para verificar su cumplimiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- García Rivero José Luis, (2008), *Manual Técnico de Construcción*, cuarta edición, Ciudad de México, México, Editorial Fernando Porrúa. (García J.L., 2008)
- Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussara Tanesi (2004), *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Skokie, Illinois, EE. UU, Portland Cement Association. (Steven H. et al,2004)
- Instituto Español de Cemento y sus aplicaciones IECA, (2013), *Guía técnica Hormigón en Ambiente Marino*, Madrid, España. (IECA, 2013)
- Buslov M. Valery, (1983). Corrosion of Steel Sheet Piles in Port Structures, ASCE Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering. (Valery B., 1983).
- Kumar Mehta P., (2003) *Concrete in the Marine Environment*, New York, NY USA, Taylor & Francis Books, Inc. (Kumar P., 2003).
- Coordinación General de Puertos y Marina Mercante CGP y MM (2016) *Manual de dimensionamiento portuario SCT*. México (CGP y MM, 2016)
- Esteban Chapapría V. (2015), *Obras Marítimas*, editorial Limusa, Balderas 95 México. (Esteban V., 2015).
- Real Academia Española. (2019). *Diccionario de la lengua española*. Madrid, España (RAE, 2019)
- Kurt Hermann (2001) *Colado del concreto en altas temperaturas*. Revista Construcción y Tecnología diciembre del instituto mexicano del cemento y el concreto IMCYC. (Hermann K., 2001)
- Girón Vargas Humberto A. (1988), *Ataque por cloruros en el concreto*, Revista Construcción y Tecnología del instituto mexicano del cemento y el concreto IMCYC. (Girón H., 1988).
- E.F. Irassar, A. Di Maio y O.R. Batic, (2010), *tópico 1 patologías de las construcciones deterioro del hormigón por cristalización de sales*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (Irassar E. et al, 2010)
- Bermúdez Odriozola, Miguel Á. (2007). *Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España. (Bermúdez M., 2007).
- Subdirección de tecnología y desarrollo profesional unidad de normatividad técnica (2001) *El manual de inspección de plataformas marinas*, PEMEX, exploración y producción. (PEMEX, 2001)
- Mederos Martín Luis (2009) *Las mareas -Atracción Gravitatoria entre el Sol y la Luna*, Editorial Rodamedia. (Mederos L., 2009).

- Sociedad Americana para pruebas y materiales, 2007, *standard terminology Relation to Corrosion and Corrosion Testing*, designation G15, ASTM. (ASTM G15, 2007)
- Martínez Ramón, director técnico de Sika, S.A.U. (2010) *¿Por qué se deteriora una estructura de hormigón?*, revista iARQCO, Madrid España. (Martínez R., 2010)
- Poursaeed, Amir & Hansson, C.M., (2007) "Reinforcing Steel passivation in mortar and pore solution". *Cement and concrete research* (Poursaeed A. et al, 2007)
- Tuutti, Kyösti. (1982), *Corrosion of steel in concrete*. Report 4.82, The Swedish Cement and Concrete Association, Stockholm, (Tuutti, K.,1982)
- Montani Rick (2000), *La carbonatación, enemigo olvidado del concreto*, Revista Construcción y Tecnología diciembre del instituto mexicano del cemento y el concreto IMCYC. (Montani R., 2000)
- IMCYC, (2004), *Propiedades del concreto*, Instituto mexicano del cemento y el concreto. (IMCYC, 2004)
- Rivera L Gerardo A, (2013) *Concreto simple*, Universidad de Cauca, Colombia. (Rivera A., 2013)
- Cemex, (2018), Artículo *Trabajabilidad del concreto normal*. Cementos Mexicanos (Cemex, 2018)
- (McMillan F.R. y Tuthill, Lewis H., (1989), *Cartilla del Concreto*, Instituto mexicano del cemento y el concreto IMCYC, México D.F. (McMillan F. et al, 1989)
- ONNCCE, (2010), *NMX-C-156-ONNCCE-2010, Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico - Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. Ciudad de México, México, (NMX-C-156, 2010)
- Neville A. M. (1999), *Tecnología del Concreto*, primera edición, Ciudad de México, México, Editorial Trillas. (Neville A.M.,1995).
- Pasquel Carbajal Enrique 1998, *Tópicos de tecnología del concreto*. Segunda edición, Colegio de Ingenieros del Perú, Consejo Nacional, Lima – Perú. (Pasquel E., 1998)
- EHE-08: (2008), *Instrucción para el proyecto y la ejecución del hormigón estructural*, Madrid, España. Ministerio de Fomento. (EHE-08, 2008).
- Cánovas, M Fernández. (2006). *Durabilidad del hormigón en ambiente marino*, universidad politécnica de Madrid España. (Cánovas F., 2006).
- ONNCCE, (2014), *NMX-C-155-ONNCCE Industria de la construcción, concreto hidráulico, dosificación en masa, especificaciones y método de ensayo*, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la edificación A.C. Ciudad de México, México. (NMX-C-155, 2014)

- Reglamento de construcción para el distrito federal (2017), Norma técnica complementaria para diseño y construcción de estructuras de concreto. Gaceta oficial de la ciudad de México (NTC EC, 2017)
- Instituto Mexicano del Transporte (2006). 181 SCT, IMT Diseño de Estructuras de Concreto con Criterios de Durabilidad. Sanfandila, Querétaro. (IMT 181 SCT, 2001)
- Instituto Mexicano del Transporte (2001). Publicación Técnica No. 292 SCT, IMT Durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. Sanfandila, Querétaro. (IMT 292 SCT, 2006)
- American concrete Institute, (2005). Reglamento ACI 318, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*, Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute. (ACI 318, 2005)
- American concrete Institute, (1997). Reglamento ACI 357R-84, Guía para el diseño y construcción de estructuras fijas de hormigón en alta mar, Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute. (ACI 357R-84, 1997)
- Gracia Enriqueta (2004) modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen, quinta edición, Instituto de Geografía de la Universidad autónoma de México. (García E.,2004)
- Sika (2011), hoja técnica Sikalite Impermeabilizante integral en polvo para concreto y mortero Identificación no. 96652, 96653, 96654, Edición 2010-2011-01 (Sika, 2011)
- SCT (2002) Materiales para concreto hidráulico, N CMT 2 02 001/02, Calidad del cemento portland.
- SCT (2002) Materiales para concreto hidráulico, N CMT 2 02 003/02, Calidad del agua para concreto hidráulico.
- SCT (2002) Materiales para concreto hidráulico, N CMT 2 02 002/02, calidad de agregados pétreos para concreto hidráulico.
- SCT (2004) Materiales para concreto hidráulico N CMT 2 02 004/02, Calidad de Aditivos Químicos para Concreto Hidráulico.
- SCT (2006) Materiales para concreto hidráulico, M MMP 2 02 056 /06 Revenimiento del concreto fresco.
- SCT (2004) Materiales para concreto hidráulico, M·MMP·2·02·053 /04 Características del concreto con inclusor de aire.
- SCT (2004) Materiales para concreto hidráulico N CMT 2 02 005/04 Calidad del concreto hidráulico.
- SCT (2004) Materiales para concreto hidráulico, M·MMP·2·02·055 /04, Muestreo de concreto hidráulico.

- SCT (2004) Materiales para concreto hidráulico, M·MMP·2·02·058 /04, Resistencia a la compresión simple de cilindros de concreto.
- ONNCCE, (2010), NMX-C-263-ONNNCCE, *Industria de la construcción*, concreto hidráulico endurecido- determinación de la masa específica, absorción y vacíos, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la edificación A.C. Ciudad de México, México. (NMX-C-263, 2010)
- Sociedad Americana para pruebas y materiales, 2013, densidad absorción y vacos en concreto endurecido (ASTM C-642-13)

8. ANEXOS

Anexo A Métodos de diseño de mezclas de concreto

1.- Método de Fuller- Thompson

Este método es utilizado:

- Cuando los elementos a construir, no presentan armado muy complejos,
- Se cuenta con agregados redondeados para la fabricación del concreto,
- El tamaño máximo del agregado es de 50 +/- 20 mm y
- Se utiliza una cantidad mínima de cemento de 300 kg/m³

La cantidad de los agregados, estará determinada por la parábola de Gessner, la cual representa una granulometría continua, lo cual, favorece la total compenetración del conjunto de granos, lo que ayuda a una buena docilidad y densidad del conjunto, *ver figura 31 Porcentaje de agregados y parábola de Gessner*. Dicha curva está representada por la siguiente ecuación:

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

D = Abertura de la malla define el tamaño máximo del agregado a emplear en la mezcla.

d = Abertura de cada uno de las mallas empleadas para determinar la granulometría del agregado que se va a utilizar (siempre menor a **D**).

P = Representa el porcentaje de material en peso que pasa por cada una de las mallas (**d**)

Porcentajes fijos de la curva patrón de Fuller

Diámetro del árido	% de material
D	100
D/2	71
D/4	50
D/8	35
D/16	25
D/32	18
D/64	12
D/128	9
D/256	6
D/512	4

Curva de Fuller

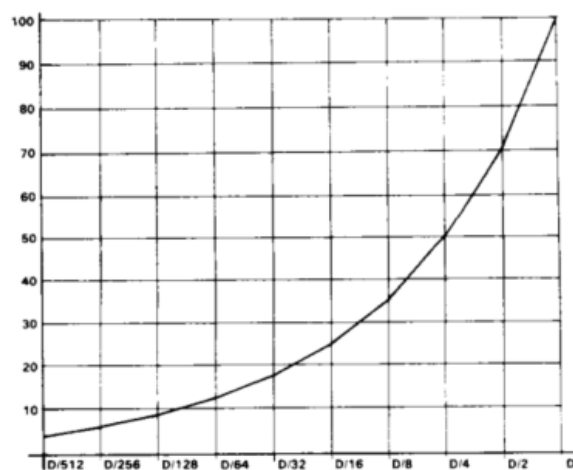


Figura 31 Porcentaje de agregados y parábola de Gessner

En el inciso 3, se explican los pasos complementarios para el diseño por el método de Fuller- Thompson.

2.- Método de Bolomey

Este método de dosificación, es considerado como un perfeccionamiento de la ley de Fuller ya que, aunque los datos para diseñar sean los mismos, se trata de obtener un concreto económico en cemento en base a sus resistencias, consistencia de la masa y forma de los agregados (redondeados o triturados).

Este método es utilizado para concretos en masa, grandes macizos, presas, etc., debiéndose tantear con mucho cuidado la curva granulométrica y los porcentajes de finos, pues aquí interviene, también, el cemento utilizado.

La fórmula propuesta por Bolomey es la siguiente:

$$P = a + (100 - a) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Donde:

P = Porcentaje de material (incluido el cemento) que pasará por el tamiz de valor **d**.

d = Abertura (mm) de cualquier malla utilizado para determinar la granulometría del agregado.

D = Abertura de la malla que define el tamaño máximo del agregado empleado en la dosificación.

a = Coeficiente variable, según la consistencia del concreto y el tipo de agregado empleado, de acuerdo a la *tabla 48 Valores del coeficiente a de Bolomey*.

Tipo de agregado	Consistencia	Valor de a
Redondeado	Seco-plástica	10
	Blanda	11
	Fluida	12
Triturado	Seco-plástica	12
	Blanda	13
	Fluida	14

Tabla 48 Valores del coeficiente a de Bolomey

En el inciso 3, se explican los pasos complementarios para el diseño por el método de Bolomey.

3.- Complemento para el cálculo de la dosificación para los métodos de Fuller-Thompson y de Bolomey

Desde el punto de vista de aplicación de estos métodos, se considera como tamaño máximo del agregado al que corresponde a la malla más pequeña de la serie utilizada que retenga menos del 15 % del peso total del agregado. Dado que la granulometría del agregado conjunto no se conoce hasta haber realizado la composición de todas las fracciones del agregado, y a fin de evitar tanteos, se considera como tamaño máximo la abertura del menor tamiz que retiene menos del 25 % al cribar por él la grava, es decir, el agregado de mayor tamaño, no entrando en esta determinación los gránulos de grandes dimensiones.

La cantidad de cemento a introducir en el diseño de la mezcla será la real que se vaya a emplear en la fabricación del concreto.

La cantidad de agua se elige de acuerdo con el tipo de agregado utilizado, su tamaño máximo y la consistencia que deba tener el concreto. Si los concretos han de colocarse mediante bombeo o en secciones estrechas es conveniente emplear consistencia blanda. Si se van a consolidar por vibración la consistencia más adecuada es la plástica y si estos van a consolidarse con vibración enérgica e incluso compresión, puede emplearse consistencia seca, *ver tabla 49 Determinación del agua de mezclado.*

Consistencia del concreto	Agregados redondeados			Agregados triturados		
	80 mm	40 mm	20 mm	80 mm	40 mm	20 mm
Seca	135	155	175	155	175	195
Plástica	150	170	190	170	190	210
Blanda	165	185	205	185	205	225
Fluida	180	200	220	200	220	240
Líquida	198	215	235	215	235	255

Tabla 49 Determinación del agua de mezclado

El paso siguiente es calcular el volumen relativo de las partículas de agregado a incorporar al concreto. Para ello, se parte de la base de que 1000 ℓ de concreto endurecido suponen 1025 ℓ de concreto fresco.

$$1025 = A + V_c + V_a$$

Donde:

A = Volumen de agua tomado de la tabla X (ℓ/m³).

V_c = **C**/**ρ_c** = Volumen relativo de cemento, con **C** = dosificación de cemento (kg/m³).

V_a = Volumen relativo del total del agregado.

En el caso de la dosificación por el método de Fuller, el último paso consiste en repartir **V_a** proporcionalmente a los porcentajes obtenidos tras el ajuste de la parábola de Gessner.

El método de Bolomey considera al cemento como un agregado más, por lo tanto, el volumen a repartir en esta situación es:

$$V_c + V_a = 1025 - A$$

4.- Método ACI

En este método se parte de la resistencia que debe tener el concreto, siendo adecuado para cualquier tipo de obra realizada con este material. Según el tipo de construcción en que se vaya a emplear el concreto la consistencia medida en cono de Abrams recomendada es la indicada en la *tabla 50. Asiento en el cono de Abrams recomendado.*

Tipo de construcción	Sentamiento en cm	
	Máximo	Mínimo
Muros armados de cimientos y zapatas	8	2
Zapatas, cajones y muros de concreto en masa	8	2
Vigas y muros armados	10	2
Pilares y muros armados	10	2
Pavimentos y losas	8	2
Grandes macizos	6	2

Tabla 50 Asiento en el cono de Abrams recomendado

La cantidad de agua a utilizar en el concreto será función de la consistencia que deba tener el mismo, del tamaño máximo de agregado elegido, de su forma y de su granulometría, viniendo, también, influenciada por la cantidad de aire incorporado y siendo independiente de la cantidad de cemento empleada.

En la *tabla 51 Determinación del agua de mezclado.* se indican las cantidades máximas de agua a emplear en un primer tanteo, suponiendo que los agregados son machacados y que tienen una granulometría y forma adecuada. Si se supone más agua que la indicada sería señal de que la forma o la granulometría de los agregados no son las adecuadas, en cuyo caso el aumento de agua debe ir acompañado de un aumento en la dosificación de cemento a fin que la relación agua/cemento permanezca constante. Si, por el contrario, los agregados exigen menos agua de la indicada en la *tabla 51 Determinación del agua de mezclado*, no se reducirá la dosificación de cemento.

Asentamiento del cono de Abrams cm	Agua, en l/m ³ , para los tamaños máximos en mm							
	10	12.5	20	25	40	50	70	150
Concreto sin aire incluido								
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	--
Aire incluido en masa, en %	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
8 a 10	200	190	180	170	160	155	150	135
15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	--
Aire incluido total, en %	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

Tabla 51 Determinación del agua de mezclado

En la *tabla 52 Relación a/c para alcanzar diferentes resistencias a compresión*, se recogen las relaciones agua/cemento que deben emplearse para conseguir las diferentes resistencias a compresión a 28 días, medidas en probetas cilíndricas de 15 x 30 cm.

Resistencia a compresión a 28 días (N/mm ²)	Relación a/c	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
45	0.38	--
40	0.43	--
35	0.48	0.40
30	0.55	0.46
25	0.62	0.53
20	0.70	0.61
15	0.80	0.71

Tabla 52 Relación a/c para alcanzar diferentes resistencias a compresión

La cantidad de cemento se deduce al conocer la relación agua/cemento y la cantidad de agua de amasado. La cantidad de agregado grueso se determina mediante ensayos de laboratorio, aunque si no se dispone de ellos, se puede obtener su contenido aproximado mediante la *tabla 53 Determinación de la cantidad de agregado grueso*, en la que ésta se ha calculado para producir concretos armados de buena docilidad.

Tamaño máximo del agregado(mm)	Volumen de agregado grueso, compactado en seco, por unidad de volumen de concreto, para diferentes módulos de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.76	0.74	0.72	0.70
50	0.78	0.76	0.74	0.72
70	0.81	0.79	0.77	0.75
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Tabla 53 Determinación de la cantidad de agregado grueso

El contenido de agregado fino se determina mediante el sistema de los volúmenes absolutos o el de los pesos. En el primero, el volumen de arena fina se encuentra restando a 1025 el volumen de agregado grueso, cemento, agua y aire; en el segundo, el peso de la arena es la diferencia entre el peso del concreto fresco y la suma de los pesos de los otros componentes. Para ello, pueden emplearse los valores dados en la *tabla 54. Peso estimado del m³ del concreto fresco*.

Tamaño máximo del agregado(mm)	Peso estimado del metro cubico de concreto fresco (kg/m ³)	
	Sin aire incluido	Con aire incluido
10	2285	2190
12.5	2315	2235
20	2355	2280
25	2375	2315
40	2420	2355
50	2445	2375
70	2465	2400
150	2505	2435

Tabla 54 Peso estimado del m³ del concreto fresco

5.- Método de la Peña

Este método de dosificación por resistencias se aplica en concretos estructurales de edificios, pavimentos, canales, depósitos de agua, puentes, etc., partiendo de un contenido de 300 kg/m³ de cemento y cuando las condiciones de ejecución puedan estimarse como buenas.

Conociendo la resistencia media, bien directamente o a través de la característica, se determina la concentración o relación cemento/agua, en peso, por medio de:

$$Z = K \cdot f_{cm} + 0,5$$

En donde:

Z = es la concentración o relación cemento/agua, en peso

f_{cm} = es la resistencia media del concreto en N/mm², a 28 días, medida en probeta de 15x30 cm

K = es un parámetro que toma los valores dados en la *tabla 55 Valores del parámetro K*, cuando la resistencia está expresada, en N/mm²

Conglomerante (clase)	Agregados redondeados	Agregados triturados
22.5	0.072	0.045
32.5	0.054	0.035
42.5	0.045	0.030
52.5	0.038	0.026

Tabla 55 Valores del parámetro K

Este método considera como tamaño máximo del agregado al de la abertura del tamiz más pequeño de la serie empleada que retenga menos del 25% de la fracción más gruesa del agregado.

La consistencia del concreto depende de las características de los medios de puesta en obra. Generalmente, en estructuras vibradas se emplean las consistencias secas y plásticas, aunque si los concretos se van a colocar en obra por bombeo, pueden emplearse las blandas. Las consistencias blandas permiten, por otra parte, colocar el concreto mediante picado con barra, logrando un ahorro importante de energía, si bien estas consistencias no deben emplearse nada más que en casos extremos.

La cantidad de agua por metro cúbico de concreto necesaria, en función del tipo y tamaño del agregado a emplear, se obtiene de la *ver tabla 49 Determinación del agua de mezclado*. El peso de cemento se determina una vez conocida la concentración, Z, y el volumen de agua por metro cúbico, V_a, dado en la *tabla 49 Determinación del agua de mezclado*, por medio de:

$$P_c = V_a \cdot Z$$

La proporción en que deben mezclarse los agregados se obtendrán por medio del gráfico de la *figura 32 Porcentaje de arena referido a la suma de los volúmenes reales de los dos*

agregados que se van a mezclar. Si se trata de una arena y un agregado grueso, el porcentaje de arena, en volumen real, con referencia al volumen real de todo el agregado, se determina en el gráfico entrando con el módulo granulométrico de la arena en ordenadas y viendo el punto en que la horizontal corta a la curva correspondiente al tamaño máximo del agregado, en cuya vertical se tiene el porcentaje de arena en volumen, que, restado a cien, da el porcentaje de agregado grueso.

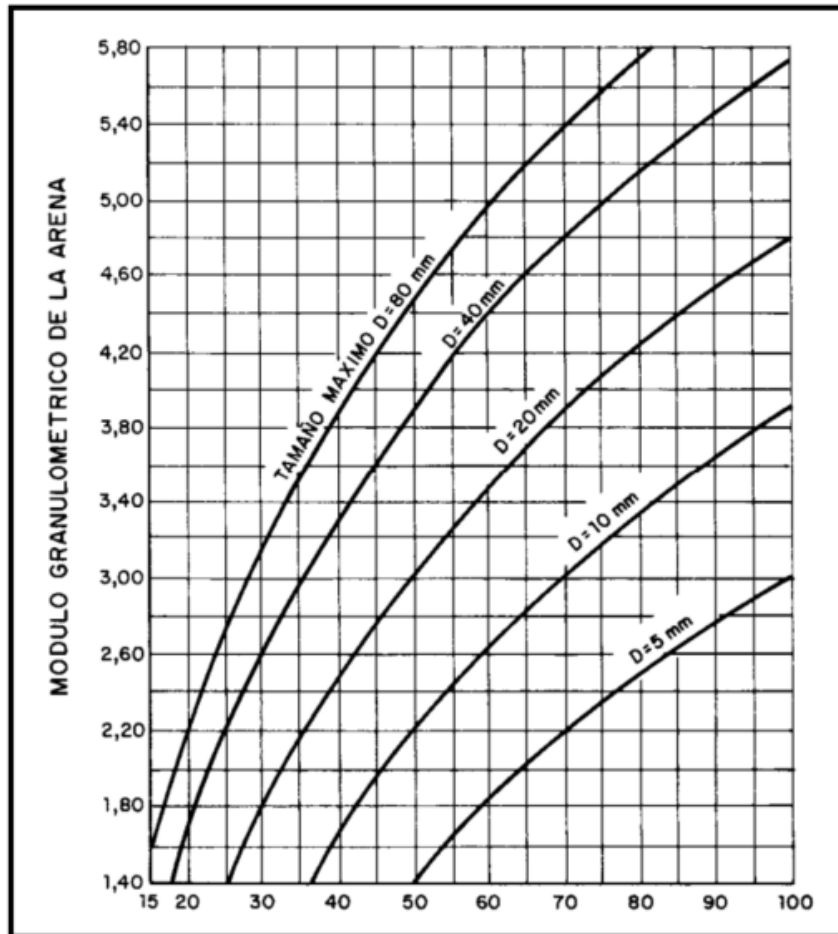


Figura 32 Porcentaje de arena referido a la suma de los volúmenes reales de los dos agregados que se van a mezclar

Si en la composición del concreto han de entrar más de dos agregados, se considera al de menor tamaño de ellos como "arena" y a los demás como "gravas". Se determina por medio del gráfico el porcentaje de "arena" con cada una de las "gravas" tomadas una a una.

Sean $t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}, \dots, t_{ai}, \dots, t_{an}$ los porcentajes de arena que resultan al considerar mezclas binarias con cada una de las fracciones de agregado tomadas de menor a mayor tamaño.

El tanto por ciento de arena en volumen absoluto, con respecto a la suma del volumen absoluto de todos los agregados que entran en el concreto, es:

$$t_0 = t_{an}$$

El tanto por ciento de la mezcla total correspondiente a la fracción de menor tamaño, es:

$$t_2 = t_{an} \frac{100 - t_{a2}}{t_{a2}} - t_1$$

El porcentaje que corresponde a la fracción situada en segundo lugar por su tamaño, es:

$$t_2 = t_{an} \frac{100 - t_{a2}}{t_{a2}} - t_1$$

El porcentaje de una fracción que ocupe el lugar i, por su tamaño máximo, contado de menor a mayor, es:

$$t_i = t_{an} \frac{100 - t_{ai}}{t_{ai}} - (t_1 + t_2 + \dots + t_{i-1})$$

La suma de todos los porcentajes de agregados debe cumplir:

$$t_0 + t_1 + t_2 + \dots + t_n = 100$$

Los valores hallados en el gráfico corresponden a un concreto armado de consistencia adecuada para consolidar por picado con barra y en el que se han empleado agregados naturales de forma redondeada. Para concretos de otras características es aplicable el método haciendo las correcciones que se indican a continuación y que habrá que realizar después de haber calculado los porcentajes de la mezcla de agregados en la forma que se ha indicado anteriormente.

Las correcciones serán las siguientes:

- Si el concreto se compacta por vibración debe aumentarse el agregado más grueso en un 4 %, restando este aumento a los demás agregados, proporcionalmente a su porcentaje.
- Si se trata de un concreto en masa, se aumentará el agregado más grueso en un 3%, que se restará de los demás agregados como en el caso anterior.
- Si se emplean agregados triturados, se aumentará el agregado más fino en un 4%, que se restará de los demás en la forma antes indicada.
- Dado que el método está diseñado para concretos de una dosificación de 300 kg/m³ de cemento, cualquier exceso o defecto sobre esta cifra debe compensarse con una disminución o aumento, respectivamente, de la arena en igual volumen.
- Si el concreto lleva aire ocluido, debe restarse su volumen del volumen real de arena disponible.
- Como en cualquier método de dosificación, deben hacerse las correcciones oportunas en la composición de los agregados y en la cantidad de agua, cuando los agregados estén húmedos. La dosificación del concreto se determina sabiendo que la suma de los volúmenes relativos de agua, cemento, agregados, aire, etc., debe ser igual a 1025 litros, a fin de obtener, aproximadamente, un metro cúbico de concreto fraguado, suponiendo que la contracción que experimenta el concreto fresco es del 2.5%.